

Das Economic Lot Scheduling Problem bei überlappender Fertigung

–

Berücksichtigung von Transportvorgängen bei simultaner Losgrößen- und Reihenfolgeplanung mit zyklischen Auflagemustern

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Wirtschaftswissenschaften (Dr. rer. pol.)
an der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät
der Julius-Maximilians-Universität Würzburg



vorgelegt von

Diplom-Kaufmann Florian Feser

Würzburg 2016

Betreuer und Erstgutachter: Prof. Dr. Ronald Bogaschewsky
Lehrstuhl für BWL und Industriebetriebslehre
Julius-Maximilians-Universität Würzburg

Vorwort

Die vorliegende Arbeit wurde von mir während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre und Industriebetriebslehre an der JULIUS-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT Würzburg verfasst und im September 2016 von der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät als Dissertation angenommen. Ihr Entstehen wurde maßgeblich durch meinen akademischen Lehrer und Doktorvater, Herrn Prof. Dr. RONALD BOGASCHEWSKY, gefördert. Ihm gebührt daher in besonderem Maße mein Dank für seine fortwährende Unterstützung und fachliche Expertise sowie für die Schaffung eines produktiven Arbeits- und Forschungsumfelds mit überaus schätzenswerten wissenschaftlichen als auch persönlichen Freiräumen.

Einen besonderen Dank möchte ich zudem Herrn Prof. Dr. CHRISTOPH GLOCK (Technische Universität Darmstadt) aussprechen, dessen Forschungsleistungen mich nicht zuletzt zur Vertiefung des Themengebiets der vorliegenden Arbeit inspiriert haben und dessen konstruktive Anregungen im Rahmen der Tätigkeit als Zweitgutachter äußerst wertvoll waren.

Darüber hinaus gilt mein Dank allen ehemaligen und aktuellen Lehrstuhlkollegen für die gute Zusammenarbeit und das exzellente Arbeitsklima. Explizit erwähnen möchte ich an dieser Stelle Frau Dipl.-Ing. (FH) ISABELL HECKEL sowie meinen langjährigen Bürokollegen Dr. SIMON HOCHREIN, der mir stets als kompetenter Ansprech- und Diskussionspartner, sowohl in fachlichen als auch persönlichen Belangen, zur Verfügung stand.

Abschließend danke ich von ganzem Herzen meiner Familie, allen voran meiner Frau NICOLA für die größtmögliche Unterstützung, ihr einfühlsames Verständnis und den kontinuierlichen Rückhalt in allen Lebenslagen. Ihr und unseren beiden Kindern BEN und LISA ist diese Arbeit gewidmet. Danke, dass ihr stets an meiner Seite steht!

Florian Feser

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	X
Algorithmenverzeichnis	XIII
Abkürzungsverzeichnis	XIV
Symbolverzeichnis	XVII
1 Einführung	1
1.1 Problemstellung und Zielsetzung	1
1.2 Aufbau der Arbeit.....	3
2 Simultane Losgrößen- und Reihenfolgeplanung	7
2.1 Planungsaufgaben und -umfeld	7
2.2 Das Economic Lot Scheduling Problem	8
2.2.1 Problemformulierung und Prämissen	8
2.2.2 Einordnung und Abgrenzung	13
2.2.2.1 Modelle mit dynamisch-deterministischer Nachfrage	14
2.2.2.2 Modelle mit statisch-deterministischer Nachfrage	17
2.2.3 Problemkomplexität und Klassifizierung von Lösungsverfahren.....	19
2.3 Lösungsansätze und Kostenschranken des ELSP	21
2.3.1 Die isolierte Lösung als untere Kostenschranke.....	21
2.3.2 Das Common Cycle Modell als obere Kostenschranke	25
2.3.3 Der Basisperiodenansatz.....	28
2.3.3.1 BOMBERGER (1966).....	29
2.3.3.2 DOLL/WHYBARK (1973)	30
2.3.3.3 HAESSLER/HOGUE (1976).....	32
2.3.3.4 ELMAGHRABY (1978).....	36
2.3.3.5 Zusammenfassung und Vergleich.....	37
2.3.4 Der Ansatz variierender Losgrößen.....	40
2.3.5 Zusammenhänge und erweiterter Literatureinblick.....	44

3 Lagerhaltungsmodelle mit Lossplitting	51
3.1 Ausgangspunkt „offene“ und „geschlossene“ Fertigung.....	51
3.2 Gleich große Transportlose nach SZENDROVITS.....	55
3.3 Dynamische Transportlosgrößen nach GOYAL.....	58
4 Lossplitting in den Lösungsansätzen zum ELSP	65
4.1 Literaturüberblick und Konklusion der Forschungsziele.....	65
4.2 Isolierte Lösung.....	69
4.2.1 Gleich große Teillose.....	69
4.2.2 Dynamische Teillosgrößen.....	74
4.3 Common Cycle Modell.....	78
4.3.1 Gleich große Teillose.....	78
4.3.2 Dynamische Teillosgrößen.....	89
4.4 Basisperiodenansatz.....	98
4.4.1 Gleich große Teillose.....	99
4.4.2 Dynamische Teillosgrößen.....	107
4.5 Ansatz variierender Losgrößen.....	109
4.5.1 Erläuterungen zu den Auswirkungen aufgrund der spezifischen Eigenschaften des Ansatzes.....	110
4.5.2 Gleich große Teillose.....	114
4.5.3 Dynamische Teillosgrößen.....	120
5 Modellperformance	125
5.1 Fallbeispiele zum reduzierten Rechenaufwand der optimierten Lösungsverfahren bei einheitlicher Transporthäufigkeit im CCM.....	125
5.1.1 Zahlenbeispiel zur Anwendung und Performance von Algorithmus 3.....	125
5.1.2 Zahlenbeispiel zur Anwendung und Performance von Algorithmus 4.....	128
5.2 Kostensenkungspotential.....	130
5.2.1 Verbesserung der Lösungsqualität des BPA durch Erweiterung des Suchraums.....	130
5.2.2 Referenzmodell „geschlossene Fertigung“.....	137

5.2.3	Berücksichtigung von Lossplitting bei Referenzdatensätzen aus der Literatur	139
5.2.3.1	Diskussion zur Höhe des Transportkostensatzes	139
5.2.3.2	Auswertung der Ergebnisse.....	142
5.2.4	Auswertung und Diskussion der Lösungen zufallsgenerierter Datensätze.....	146
5.2.4.1	Rahmenbedingungen.....	146
5.2.4.2	Analyse und Bewertung der Ergebnisse	148
5.2.4.3	Diskussion eines modifizierten Lösungsansatzes mit erweitertem Suchraum.....	150
5.3	Interpretation und Ableitung von Handlungsempfehlungen.....	154
6	Einordnung der Ergebnisse und Ausblick	159
6.1	Kritische Reflexion.....	159
6.2	Perspektiven.....	162
	Anhang.....	167
	Anlage A: Mathematische Umformungen und Herleitungen	167
	Anlage B: Konvexitätsnachweise	171
	Anlage C: Liste der für Abbildung 6 ausgewerteten Publikationen	178
	Anlage D: Parameter der Referenzdatensätze.....	182
	Anlage E: Ergebnistabellen der Referenzdatensätze	186
	Anlage F: Erläuterungen zur Funktion „NMinimize“	201
	Literaturverzeichnis.....	203

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Teilbereiche der PPS.....	7
Abbildung 2: Teilbereiche der Produktionsprozessplanung.....	8
Abbildung 3: Klassifizierung deterministischer Losgrößen- und Bestellmengenprobleme	13
Abbildung 4: Teilprobleme des ELSP	20
Abbildung 5: Maschinenbelegungspläne zum Vergleich der Entwicklungsstufen des BPA	39
Abbildung 6: Relative Verbreitung der unterschiedlichen Lösungsverfahren in der Literatur.....	46
Abbildung 7: Lagerbestandsverlauf bei offener und geschlossener Fertigung	52
Abbildung 8: Optimale Losgröße bei offener und geschlossener Fertigung.....	53
Abbildung 9: Lagerbestandsverlauf eines Produktionsloses bei „geschlossener Fertigung“ bzw. bei Aufteilung in drei gleich große Transportlose	56
Abbildung 10: Vergleich des Lagerbestandsverlaufs eines Fertigungsloses bei drei gleich großen und drei ungleich großen Transportlosen sowie bei „geschlossener Fertigung“	59
Abbildung 11: Optimalitätskriterium des GOYAL-Algorithmus.....	62
Abbildung 12: Verlauf der Kostenfunktion $K^{SZ}(t_v, TH)$ bei optimaler und restringierter Verbrauchszeit.....	81
Abbildung 13: Kostenfunktionsverläufe zur Fallunterscheidung bei dynamischen Teillosten im CCM mit einheitlicher Transporthäufigkeit.....	92
Abbildung 14: Zwei aufeinanderfolgende Losauflagen eines Produkts bei gleich großen Teillosten und positionsspezifischen Transporthäufig- keiten (Veranschaulichung zu Nebenbedingung (4–52)).....	112
Abbildung 15: Kostenfunktionsverläufe zum Zahlenbeispiel von BUSCHER/LINDNER.....	127

Abbildung 16: Kostenfunktionsverläufe zum Zahlenbeispiel von LINDNER.....	129
Abbildung 17: Unzulässiger Maschinenbelegungsplan für $m_i=(1 2 4)$ bei optimaler BP-Länge	133
Abbildung 18: Überschneidungsfreier Maschinenbelegungsplan für $m_i=(1 2 4)$ bei angepasster BP-Länge	133
Abbildung 19: Überschneidungsfreier Maschinenbelegungsplan für $m_i=(1 2 2)$ bei angepasster BP-Länge	134
Abbildung 20: Überschneidungsfreier Maschinenbelegungsplan für $m_i=(1 1 2)$ bei angepasster BP-Länge	135
Abbildung 21: Überschneidungsfreier Maschinenbelegungsplan für $m_i=(1 1 1)$	136

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einsatz rechnergestützter Verfahren zur Termindisposition	2
Tabelle 2: Wesentliche Entwicklungsstufen des BPA.....	37
Tabelle 3: Zahlenbeispiel zum Vergleich der Entwicklungsstufen des BPA	37
Tabelle 4: Ergebnisse des Zahlenbeispiels zum Vergleich der Entwicklungsstufen des BPA.....	38
Tabelle 5: Literatureinblick zur Berücksichtigung von Teillosen bei Abwandlungen des ELSP	66
Tabelle 6: Äquivalente Bestimmungsgleichungen bei sortenindividuellen Transporthäufigkeiten.....	107
Tabelle 7: Äquivalente Bestimmungsgleichungen bei sortenindividuellen Transporthäufigkeiten.....	109
Tabelle 8: Anpassungen von Algorithmus 6 bei sortenindividuellen Transporthäufigkeiten und gleich großen Teillosen	119
Tabelle 9: Anpassungen von Algorithmus 6 bei einheitlicher Transporthäufigkeit und gleich großen Teillosen	120
Tabelle 10: Anpassungen von Algorithmus 6 bei positionsspezifischen Transporthäufigkeiten und dynamischen Teillosen.....	123
Tabelle 11: Anpassungen von Algorithmus 6 bei einheitlicher Transporthäufigkeit und dynamischen Teillosen.....	124
Tabelle 12: Parameterwerte des Zahlenbeispiels von BUSCHER/LINDNER.....	125
Tabelle 13: Anzahl Rechen- und Vergleichsoperationen nach BUSCHER/LINDNER bzw. Algorithmus 3	126
Tabelle 14: Parameterwerte des Zahlenbeispiels von LINDNER	128
Tabelle 15: Anzahl Rechen- und Vergleichsoperationen nach LINDNER bzw. Algorithmus 4	130
Tabelle 16: Parameterwerte des Zahlenbeispiels von CARSTENSEN.....	131
Tabelle 17: Lösungsweg nach dem originären Verfahren von HAESSLER.....	136

Tabelle 18: Netto- und Bruttoauslastungen der Referenzdatensätze.....	142
Tabelle 19: Prozentuale Kostendifferenz des BPA bei „geschlossener Fertigung“ und bei dynamischen Teillosten mit sortenindividuellen Transporthäufigkeiten	143
Tabelle 20: Intervallgrenzen für die Parameterwerte der zufallsgenerierten Datensätze.....	147
Tabelle 21: Zusammenfassung der Ergebnisse zufallsgenerierter Datensätze.....	149
Tabelle 22: Zusammenfassung der Ergebnisse zufallsgenerierter Datensätze bei erweitertem Suchraum	152
Tabelle 23: Anstieg der Rechenzeiten durch die Modifikation von Schritt 9.2 in Algorithmus 5	153
Tabelle 24: Kostenvorteil des Lossplittings beim BPA im Vergleich zum TVL- Ansatz	161
Tabelle 25: Parameter der Datensätze von BOMBERGER (B1 bis B3).....	183
Tabelle 26: Parameter des zweiten Datensatzes von FUJITA (F2)	183
Tabelle 27: Parameter des dritten Datensatzes von FUJITA (F3)	184
Tabelle 28: Parameter des vierten Datensatzes von FUJITA (F4).....	184
Tabelle 29: Parameter des fünften Datensatzes von FUJITA (F5).....	185
Tabelle 30: Parameter des sechsten Datensatzes von FUJITA (F6).....	185
Tabelle 31: Parameter des Datensatzes von MALLYA im Original sowie unter Berücksichtigung der modifizierten Rüstzeiten	186
Tabelle 32: Parameter des Datensatzes von PINEDO.....	186
Tabelle 33: Parameter des Datensatzes von CARSTENSEN	186
Tabelle 34: Ergebnisse des Referenzdatensatzes BOMBERGER 1 (B1)	187
Tabelle 35: Ergebnisse des Referenzdatensatzes BOMBERGER 2 (B2)	188
Tabelle 36: Ergebnisse des Referenzdatensatzes BOMBERGER 3 (B3)	189
Tabelle 37: Ergebnisse des Referenzdatensatzes FUJITA 2 (F2).....	190

Tabelle 38: Ergebnisse des Referenzdatensatzes FUJITA 3 (F3)	191
Tabelle 39: Ergebnisse des Referenzdatensatzes FUJITA 4 (F4)	192
Tabelle 40: Ergebnisse des Referenzdatensatzes FUJITA 5 (F5)	193
Tabelle 41: Ergebnisse des Referenzdatensatzes FUJITA 6 (F6)	194
Tabelle 42: Ergebnisse des Referenzdatensatzes MALLYA (original)	195
Tabelle 43: Ergebnisse des Referenzdatensatzes MALLYA (M Mod. 1)	196
Tabelle 44: Ergebnisse des Referenzdatensatzes MALLYA (M Mod. 2)	197
Tabelle 45: Ergebnisse des Referenzdatensatzes MALLYA (M Mod. 3)	198
Tabelle 46: Ergebnisse des Referenzdatensatzes PINEDO	199
Tabelle 47: Ergebnisse des Referenzdatensatzes CARSTENSEN	200

Algorithmenverzeichnis

Algorithmus 1: Ermittlung der optimalen, ganzzahligen Transporthäufigkeit nach GOYAL.....	62
Algorithmus 2: Ermittlung der optimalen Losgrößenpolitik bei sorten- einheitlicher Anzahl gleich großer Teillose im CCM.....	80
Algorithmus 3: Optimierte Lösungsfindung bei sorteneinheitlicher Anzahl gleich großer Teillose im CCM.....	86
Algorithmus 4: Optimierte Lösungsfindung bei sorteneinheitlicher Anzahl dynamischer Teillose im CCM	96
Algorithmus 5: Eine Heuristik zur Lösung des ELSP nach dem BPA mit POT- Politik bei der Einbeziehung von Lossplitting	101
Algorithmus 6: Eine Heuristik nach dem TVL-Ansatz bei der Einbeziehung von Lossplitting	116

Abkürzungsverzeichnis

AIIE	American Institute of Industrial Engineers
APO	Advanced Planning and Optimization
B1 bis B3	BOMBERGER Datensätze 1 bis 3
BP	Basisperiode
BPA	Basisperiodenansatz
CC	Common Cycle
CCM	Common Cycle Modell
CLSP	Capacitated Lotsizing Problem
CSLP	Continuous Setup Lotsizing Problem
DLSP	Discrete Lotsizing and Scheduling Problem
DLZ	Durchlaufzeit
eBPA	erweiterter Basisperiodenansatz
ELDSP	Economic Lot and Delivery Scheduling Problem
ELSP	Economic Lot Scheduling Problem
ELSSP	Economic Lot and Supply Scheduling Problem
EPQ	Economic Production Quantity
et al.	et alii
etc. pp.	et cetera perge perge
FEMM	Faculty of Economics and Management Magdeburg

f. / ff.	folgende / fortfolgende
F2 bis F6	FUJITA Datensätze 2 bis 6
GE	Geldeinheiten
geschl.	geschlossen
GLSP	General Lotsizing and Scheduling Problem
GOR	German Operations Research Society
GY	Lossplitting nach GOYAL (dynamische Transportlose)
Hrsg.	Herausgeber
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IIE	Institute of Industrial Engineers
IS	Independent Solution
Jg.	Jahrgang
JRP	Joint Replenishment Problem
Lsg.	Lösung
ME	Mengeneinheiten
mehrst. Prod.	mehrstufige Produktion
M (Mod. 1) bis M (Mod. 3)	Modifikationen 1 bis 3 des Datensatzes von MALLYA
Nr.	Nummer
OR	Operations Research
POT / 2 ^x	power of two / Zweierpotenzen

PPS	Produktionsplanung und -steuerung
PLSP	Proportional Lot Sizing and Scheduling Problem
SCM	Supply Chain Management
S.	Seite
Sp.	Spalte
SZ	Lossplitting nach SZENDROVITS (gleich große Transportlose)
TEIP	Two Echelon Inventory Problem
TVL	Time Varying Lotsizes
Verallg.	Verallgemeinerung(en)
Vgl. / vgl.	Vergleiche / vergleiche
vs.	versus
WiSt	Wirtschaftswissenschaftliches Studium (Zeitschrift)
WISU	Das Wirtschaftsstudium (Zeitschrift)
ZE	Zeiteinheiten
zfbf	Schmalenbachs Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung

Symbolverzeichnis

Kapitelübergreifende, mathematische Notation:

Die verwendeten Symbole sind gegebenenfalls zusätzlich mit dem Index „i“ für die entsprechende Produktsorte bzw. „j“ für die jeweilige Fertigungsposition gekennzeichnet.

A(TH)	Platzhalter für $\frac{\left(\frac{x_p}{x_v}\right)^{TH} - 1}{\frac{x_p}{x_v} - 1}$ im Lagerhaltungsmodell mit dynamischen Teillosen
BP	Basisperiodenlänge [ZE]
BP _{min}	Mindestlänge der Basisperiode [ZE]
BP _{opt}	optimale Basisperiodenlänge [ZE]
c _L	Lagerhaltungskostensatz $\left[\frac{\text{GE}}{\text{ME} \cdot \text{ZE}} \right]$
D(TH)	Platzhalter für $\frac{\left(\frac{x_p}{x_v}\right)^{2 \cdot TH} - 1}{\left(\frac{x_p}{x_v}\right)^2 - 1}$ im Lagerhaltungsmodell mit dynamischen Teillosen
γ	Platzhalter für $\sqrt{\sum_{i=1}^I \frac{c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2}{x_{p,i}} \cdot \sum_{i=1}^I k_{T,i}}$ [GE/ZE]
h ^g	Platzhalter für den konstanten Teil des Lagerhaltungskostenterms bei „geschlossener Fertigung“: $\frac{1}{2} \cdot c_{L,i} \cdot x_{v,i} \cdot \left(1 + \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}\right)$ [GE/ZE ²]
h ^o	Platzhalter für den konstanten Teil des Lagerhaltungskostenterms bei „offener Fertigung“: $\frac{1}{2} \cdot c_{L,i} \cdot x_{v,i} \cdot \left(1 - \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}\right)$ [GE/ZE ²]
h ^{GY} (TH)	Platzhalter für den konstanten und den von TH abhängigen Teil des Lagerhaltungskostenterms bei dynamischen Teillosen: $h_i^o + \frac{c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2}{A(TH) \cdot x_{p,i}}$ [GE/ZE ²]
h ^{SZ} (TH)	Platzhalter für den konstanten und den von TH abhängigen Teil des Lagerhaltungskostenterms bei gleich großen Teillosen: $h_i^o + \frac{c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2}{TH \cdot x_{p,i}}$ [GE/ZE ²]
I	Anzahl der Produkte I = {1, 2, 3, ... }
i	Produktindex i ∈ {1, 2, 3, ..., I}

J	Anzahl der Positionen beim TVL-Ansatz ($J = \sum_{i=1}^I n_i$)
J_i	Menge aller Positionen in denen Produkt i gefertigt wird
j	Positionsindex $j \in \{1, 2, 3, \dots, J\}$
$j'(j)$	Position der nächsten Losauflage des in Position j gefertigten Produkts
K	Gesamtkosten (-funktion) [GE/ZE]
k	Indizes der jeweiligen Produkte, die gemeinsam in einer BP gefertigt werden ($k \in \{1, 2, 3, \dots, I\}$)
k_R	Rüstkostensatz [GE] je Rüstvorgang
k_T	Transportkostensatz [GE] je Transportvorgang
λ	LAGRANGE-Multiplikator
m	Multiplikator beim BPA
n	Auflagehäufigkeit im Gesamtzyklus beim TVL-Ansatz (Die Hochindizes a, b, c und d dienen im Rahmen von Algorithmus 6 lediglich der Unterscheidung von vier explizit definierten Ausprägungen dieses Werts.)
n_{rel}	relative Auflagehäufigkeit je Zeiteinheit beim TVL-Ansatz [1/ZE]
q_z	z-te Transportlosgröße bei dynamischen Teillosen [ME] $z \in \{1, 2, 3, \dots, TH\}$
s	Laufindex der Summe $\sum_{s=j+1}^{j'(j)-1} (t_{R,s} + t_{p,s} + t_{f,s})$ beim TVL-Ansatz
T_{zyk}	Gesamtzykluszeit eines Aufagemusters [ZE] (Die Hochindizes a, b, c und d dienen im Rahmen von Algorithmus 6 lediglich der Unterscheidung von vier explizit definierten Ausprägungen dieses Werts.)
TH	Transporthäufigkeit bzw. Anzahl der Teillose eines Fertigungsloses
t_B	Belegungszeit (Rüst- und Produktionszeit) eines Fertigungsloses [ZE]
t_f	freie Maschinenzeit [ZE]
t_p	Produktionszeit eines Fertigungsloses [ZE]
t_R	Rüstzeit [ZE] je Rüstvorgang
t_v	Verbrauchs- bzw. Zykluszeit eines Fertigungsloses [ZE]
t_v^*	isoliert optimale Verbrauchs- bzw. Zykluszeit eines Fertigungsloses [ZE]

x	Fertigungslosgröße [ME]
x_p	Produktionsgeschwindigkeit [ME/ZE]
x_v	Verbrauchsgeschwindigkeit bzw. Absatzrate [ME/ZE]
z	Nummer eines Transportloses bei dynamischen Teillosen $z \in \{1, 2, 3, \dots, TH\}$

Zusätzlich in Kapitel 3 verwendete Notation:

Die Symbole sind gegebenenfalls entsprechend dem jeweils zugrundeliegenden Lagerhaltungsmodell zusätzlich indiziert mit „g“ für „geschlossene Fertigung“ bzw. „o“ für „offene Fertigung“ sowie „SZ“ für gleich große und „GY“ für dynamische Transportlose.

B	Gesamtbedarf im Planungszeitraum [ME]
DLZ	Durchlaufzeit eines Fertigungsloses [ZE]
K^{ges}	Gesamtkosten für einen gegebenen Bedarf [GE]
K^{Lager}	Lagerhaltungskosten für einen gegebenen Bedarf [GE]
K_{Los}^{Lager}	Lagerhaltungskosten für ein Fertigungslos [GE]
K^{min}	Gesamtkostenminimum [GE]
$K^{Rüst}$	Rüstkosten für einen gegebenen Bedarf [GE]
L^{max}	maximal auftretender Lagerbestand [ME]
L^{min}	minimal auftretender Lagerbestand [ME]
L^\emptyset	durchschnittlich vorliegender Lagerbestand [ME]
T	Planungszeitraum [ZE]
TH_{GY}^{opt}	ganzzahlig optimale Transporthäufigkeit bei dynamischen Teillosen
TH_{SZ}^{opt}	reellwertig optimale Transporthäufigkeit bei gleich großen Teillosen
x^{opt}	optimale Fertigungslosgröße [ME]

Zusätzlich in Kapitel 4 verwendete Notation:

α_i	Platzhalter für $\frac{c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2}{x_{p,i}}$ [GE/ZE ²]
β_i	Platzhalter für $\sum_{i=1}^I \frac{c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2}{A(\text{TH}) \cdot x_{p,i}}$ [GE/ZE ²]
BP_{ab}	zu m_{ref} und TH_{ab}^{GZ} korrespondierende Basisperiodenlänge [ZE]
BP_{auf}	zu m_{ref} und TH_{auf}^{GZ} korrespondierende Basisperiodenlänge [ZE]
BP_{ref}	Basisperiodenlänge der aktuellen Referenzlösung [ZE]
K^{GY}	Gesamtkosten je Zeiteinheit bei dynamischen Teillosen [GE/ZE]
K_{ref}	zu BP_{ref} , m_{ref} und TH_{ref} korrespondierende Kosten der aktuellen Referenzlösung [GE/ZE]
K_{ref}^{GY}	Gesamtkosten je Zeiteinheit der aktuellen Referenzlösung bei dynamischen Teillosen [GE/ZE]
K_{ST}^{GY}	erste, partielle Ableitung der $K^{GY}(t_v, TH)$ -Funktion nach TH
K^{SZ}	Gesamtkosten je Zeiteinheit bei gleich großen Teillosen [GE/ZE]
K_{ref}^{SZ}	Gesamtkosten je Zeiteinheit der aktuellen Referenzlösung bei gleich großen Teillosen [GE/ZE]
K^-	zu BP , m^- und TH bzw. T_{zyk} , n^- und TH^- korrespondierender Kostenwert [GE/ZE]
K^+	zu BP , m^+ und TH bzw. T_{zyk} , n^+ und TH^+ korrespondierender Kostenwert [GE/ZE]
m_{ref}	Multiplikatoren der aktuellen Referenzlösung
m^-	nächstkleinerer Zweierpotenzmultiplikator zum Quotienten $\frac{t_{v,i}^*}{BP}$
m^+	nächstgrößerer Zweierpotenzmultiplikator zum Quotienten $\frac{t_{v,i}^*}{BP}$
n^-	nächstkleinere Zweierpotenzauflagehäufigkeit zu n^a , n^b , n^c bzw. n^d
n^+	nächstgrößere Zweierpotenzauflagehäufigkeit zu n^a , n^b , n^c bzw. n^d
TH_{opt}	reellwertig optimale Transporthäufigkeit

TH_{ref}	Transporthäufigkeit der aktuellen Referenzlösung
TH_{tan}	Transporthäufigkeit im Tangentialpunkt der Kostenfunktionen $K^{SZ}(TH)$ und $K^{SZ}(\bar{t}_v, TH)$ (vgl. Abbildung 12)
TH^-	zu BP und m^- bzw. T_{zyk} und n^- korrespondierende Transporthäufigkeit
TH^+	zu BP und m^+ bzw. T_{zyk} und n^+ korrespondierende Transporthäufigkeit
TH^{gz}	ganzzahlige Transporthäufigkeit
TH_{ab}^{gz}	abgerundete, ganzzahlige Transporthäufigkeit $\lfloor TH^{opt} \rfloor$ bzw. $\lfloor TH_{ref} \rfloor$
TH_{auf}^{gz}	aufgerundete, ganzzahlige Transporthäufigkeit $\lceil TH^{opt} \rceil$ bzw. $\lceil TH_{ref} \rceil$
TH_{opt}^{gz}	ganzzahlig optimale Transporthäufigkeit
TH_{ref}^{gz}	ganzzahlige Transporthäufigkeit der aktuellen Referenzlösung
$TH_{t_v,opt}^{min}$	reellwertige Transporthäufigkeit des globalen Minimums von $K^{GY}(TH)$
$TH_{\bar{t}_v}^{min}$	reellwertige Transporthäufigkeit des globalen Minimums von $K^{GY}(\bar{t}_v, TH)$
$TH_{t_v,opt}^{opt}$	ganzzahlig optimale Transporthäufigkeit der $K^{GY}(TH)$ -Funktion
$TH_{\bar{t}_v}^{opt}$	ganzzahlig optimale Transporthäufigkeit der $K^{GY}(\bar{t}_v, TH)$ -Funktion
$TH_{t_v,opt}^-$	abgerundete, ganzzahlige Transporthäufigkeit $\lfloor TH_{t_v,opt}^{min} \rfloor$
$TH_{\bar{t}_v}^-$	abgerundete, ganzzahlige Transporthäufigkeit $\lfloor TH_{\bar{t}_v}^{min} \rfloor$
$TH_{t_v,opt}^+$	aufgerundete, ganzzahlige Transporthäufigkeit $\lceil TH_{t_v,opt}^{min} \rceil$
$TH_{\bar{t}_v}^+$	aufgerundete, ganzzahlige Transporthäufigkeit $\lceil TH_{\bar{t}_v}^{min} \rceil$
$t_{v,opt}$	optimale Verbrauchs- bzw. Zykluszeit eines Fertigungsloses [ZE]
\bar{t}_v	Mindestlänge der Verbrauchszeit im CCM [ZE]
\bar{t}_v^a, \bar{t}_v^b	Mindestlängen der Verbrauchszeiten im CCM für zwei unterschiedliche Parameterkonstellationen a und b, wobei gilt: $\bar{t}_v^a < \bar{t}_v^b$ [ZE]

1 Einführung

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Die Produktionsplanung und -steuerung (PPS) ist für nahezu jedes fertige Unternehmen – sowohl im Hinblick auf Lagerbestands- und Kostenoptimierung, als auch für eine termintreue Lieferbereitschaft sowie die dadurch bedingte Kundenzufriedenheit – von zentraler Bedeutung und leistet somit einen erheblichen Beitrag für den Erhalt bzw. den Ausbau der Wettbewerbsfähigkeit. Dabei stellen die Interdependenzen der verschiedenen Teilbereiche innerhalb der PPS sowie zwischen den vor- und nachgelagerten Planungsaufgaben eine – im Zuge der zunehmend angestrebten Integration der gesamten Wertschöpfungskette – immer größer werdende Herausforderung dar.¹ Um die damit verbundenen, komplexen Zusammenhänge bestmöglich erfassen, abbilden und das darin begründete Potential weitestgehend erschließen zu können, ist der Einsatz computergestützter Systeme bzw. entsprechender Softwarelösungen unumgänglich. Diesbezügliche empirische Umfragen in Produktionsunternehmen bestätigen zum einen den hohen Stellenwert der PPS als primären Ansatzpunkt für Optimierungen bei Auftreten diffiziler Probleme im Bereich der Produktion. So sehen bspw. 76,9% der Geschäftsführer mittelständischer Betriebe an erster Stelle die PPS als eine hierfür wesentliche Ursache, gefolgt von der Arbeitskräftequalifikation und Arbeitszeitregelung mit 23,1%, der Maschinen- und Arbeitsplatzstruktur mit 12,8% sowie den Fertigungsverfahren mit 7,7%.² Zum anderen wird aufgrund der Ergebnisse der Befragungen ersichtlich, bei welchen Planungsaufgaben noch Nachholbedarf für die Anwendung rechnergestützter Verfahren besteht. Nach Angaben auf Ebene der Produktionsbereichsleitung mittelständischer Unternehmen war diesbezüglich zumindest in der Vergangenheit (1992) speziell in den Bereichen Durchlaufterminierung, Kapazitätsabgleich und Feinterminierung ein deutliches Defizit festzustellen (vgl. Tabelle 1).³ Einen Grund hierfür stellen sicherlich die komplexen Interdependenzen dieser Teilbereiche und die dadurch bedingten, hohen Anforderungen an eine qualifizierte Softwarelösung dar.

¹ Vgl. bspw. BLOECH, J. et al., 2008, S. 117 und GLOCK, C. H., 2014, S. 129.

² Die angeführten Prozentsätze beziehen sich dabei auf die jeweils am wichtigsten erachtete Problemursache (insgesamt wurde eine vierstufige Rangfolge gebildet). Die Auswertung berücksichtigt Unternehmen, die ihre Produktion selbst als Problembereich eingestuft haben (55,7% der Fälle). Vgl. hierzu GLASER, H.; GEIGER, W.; ROHDE, V., 1992, S. 286, Tabelle 49 und 50.

³ Vgl. GLASER, H.; GEIGER, W.; ROHDE, V., 1992, S. 371.

	Einsatz von Planungssoftware		
	Ist-Zustand	Soll-Zustand	Differenz
Durchlaufterminierung	41,7 %	87,7 %	-46,0 %
Kapazitätsabgleich	38,6 %	89,6 %	-51,0 %
Feinterminierung	6,8 %	52,5 %	-45,7 %

Tabelle 1: Einsatz rechnergestützter Verfahren zur Termindisposition⁴

Aktuellere Umfrageergebnisse weisen jedoch integrierte Enterprise Resource Planning Systeme und Tabellenkalkulationsprogramme mit insgesamt ca. 70% als die in der Praxis am häufigsten eingesetzten Planungswerkzeuge aus. Spezialisierte und dadurch leistungsfähigere Advanced Planning Systeme kommen nur in ca. 18% der Unternehmen zum Einsatz.⁵ Hinzu kommt, dass bei der Bewertung der eingesetzten Planungstools unter anderem die mangelnde „Abbildungsmöglichkeit der betrieblichen Situation“⁶ kritisiert wird. Die vorliegende Arbeit soll daher einen Beitrag dazu leisten, das Optimierungspotential der diesbezüglich offensichtlich bestehenden Defizite in einem speziellen und komplexen Teilbereich der PPS weiter zu erschließen.

Konkret wird die Planungsaufgabe der Ermittlung kostenminimaler Losgrößen bei simultaner Festlegung der optimalen Produktionsreihenfolge betrachtet. Diese Problemstellung ist insbesondere für den Fall einer Serien- und Sortenfertigung von Relevanz, bei dem mehrere, artverwandte Erzeugnisse im Wechsel auf einer Fertigungsanlage mit beschränkter Kapazität bearbeitet werden.⁷ Da die Bestimmung der Fertigungslosgrößen und der Produktionsreihenfolge bei der Ermittlung einer überschneidungsfreien Maschinenbelegung unmittelbar miteinander korrelieren, sollte deren Planung zur bestmöglichen Ausnutzung der Kapazitäten und Minimierung der Kosten nicht sukzessiv, sondern weitestgehend simultan erfolgen.⁸ Durch diesen Zusammenhang entsteht eine im Allgemeinen nicht triviale und lediglich mittels spezieller Heuristiken adäquat lösbare Planungsaufgabe. Letztere soll in dieser Arbeit um die Möglichkeit des Lossplittings im Sinne einer überlappenden Fertigung erweitert werden. Dieses logistische Konzept innerhalb der Produktion geht im Allgemeinen sowohl mit einer Verkürzung der Durchlaufzeiten,

⁴ Erweiterte Darstellung in Anlehnung an GLASER, H.; GEIGER, W.; ROHDE, V., 1992, S. 371, Tabelle 129.

⁵ Vgl. JODLBAUER, H.; REITNER, S., 2011, S. 23.

⁶ JODLBAUER, H.; REITNER, S., 2011, S. 24.

⁷ Vgl. ADAM, D., 1969, S. 25.

⁸ Vgl. CLARK, A.; ALMADA-LOBO, B.; ALMEDER, C., 2011, S. 2457.

als auch mit einer Verringerung der Lagerbestände einher. Auch hier belegen empirische Untersuchungen zum einen den durchlaufzeitverkürzenden Effekt der überlappenden Fertigung in der Praxis⁹ sowie zum anderen das durch die Verringerung der work-in-process Bestände zu erschließende Potential¹⁰. Dies bestärkt die in dieser Arbeit fokussierte Zielsetzung, deren Konkretisierung vorab einer exakten Definition und Abgrenzung der Problemstellung sowie einer Analyse des aktuellen Forschungsstands bedarf. Ein Überblick zur diesbezüglichen Vorgehensweise sowie zum weiteren Aufbau der Arbeit folgt im anschließenden Abschnitt.

1.2 Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 findet eingangs zunächst eine allgemeine Einordnung bzw. Abgrenzung der Aufgaben und des Umfelds der simultanen Losgrößen- und Reihenfolgeplanung im Rahmen der PPS statt. Hierbei können bereits einige zentrale Eigenschaften und Planungsaufgaben des ELSP identifiziert bzw. abgeleitet werden, bevor anschließend – unter Bezugnahme auf die Entwicklung in der fachspezifischen Literatur – eine Konkretisierung des spezifischen Planungsproblems und der zugrundeliegenden Prämissen erfolgt. Auf dieser Basis wird zum einen die Abgrenzung des ELSP zu eng verwandten Problemstellungen vorgenommen sowie zum anderen die Problemkomplexität und eine diesbezüglich mögliche Klassifizierung alternativer Lösungsverfahren erörtert. Die prinzipiell unterschiedlichen Ansätze zur Lösung des ELSP, mit ihren jeweils individuellen Annahmen und Eigenschaften, werden in Abschnitt 2.3 ausführlich dargestellt. Hierbei wird insbesondere auf die chronologische Entwicklung des Basisperiodenansatzes (BPA) in der Literatur eingegangen, da dieser im weiteren Verlauf der Arbeit eine zentrale Rolle einnimmt. Abschließend werden die Zusammenhänge zwischen den strukturell verschiedenen Lösungsansätzen zum ELSP nochmals zusammenfassend erörtert sowie eine Auswertung zu deren relativer Verbreitung in der wissenschaftlichen Literatur präsentiert.

⁹ Vgl. JODLBAUER, H.; REITNER, S., 2011, S. 24 f.

¹⁰ Vgl. OBERMAIER, R., 2012, S. 974.

In Kapitel 3 werden im Wesentlichen zwei alternative, aus der Literatur bekannte Lagerhaltungsmodelle zur Berücksichtigung von Lossplitting im Sinne einer überlappenden Fertigung vorgestellt sowie deren Rolle als Bindeglieder zwischen den Extremfällen der „offenen“ und „geschlossenen Fertigung“ erläutert. Den Hauptteil der Arbeit bildet Kapitel 4 mit der Integration dieser Lossplittingalternativen in ausgewählte Lösungsansätze zum ELSP. Hierfür wird zur Identifizierung und Eingrenzung potentiellen Forschungsbedarfs zunächst ein dedizierter Literaturüberblick gegeben, der eine Kategorisierung der bis dato im engeren Sinne relevanten Veröffentlichungen beinhaltet. Die daraus abgeleiteten Forschungsziele bzw. -fragen werden anschließend in fünf Punkten konkretisiert und beinhalten im Kern die Entwicklung von Modellen zur Berücksichtigung des Lossplittings im ELSP. Dabei wird sowohl das Common Cycle Modell (CCM), als auch der Ansatz variierender Losgrößen (TVL) einbezogen, jedoch steht vor allem eine Heuristik nach dem BPA im Fokus der Ausführungen. Des Weiteren werden bestehende Ansätze zur Integration der Teillosbildung im CCM aus einer neuen Perspektive betrachtet und bezüglich eines eventuellen Optimierungspotentials des Lösungswegs analysiert. Zu den neu entwickelten bzw. erweiterten Modellen werden für die Lösungsfindung Algorithmen formuliert und implementiert, die für beide Alternativen der Teillosbildung eine für alle Produkte einheitliche oder sortenindividuelle Transporthäufigkeit erlauben. Als Basis hierfür werden vor allem für den BPA und TVL-Ansatz explizit ursprüngliche, anerkannte und insbesondere in der einschlägigen Fachliteratur weit verbreitete Lösungsansätze herangezogen, die zudem einen relativ hohen Grad an Nachvollziehbarkeit¹¹ aufweisen und somit auch eine weitestgehend akzeptierte Grundlage für zukünftige Forschungsansätze darstellen können.

Die Evaluation der entwickelten Modelle erfolgt in Kapitel 5 sowohl anhand von ausgewählten Referenzdatensätzen aus der Literatur als auch auf Basis von insgesamt 4000 zufallsgenerierten Parameterkonstellationen. Dabei liegt der Schwerpunkt der Auswertungen auf einer Ergebnisanalyse hinsichtlich der Höhe des Kosteneinsparungspotentials, das durch die Teillosbildung im BPA zum einen gegenüber der „geschlossenen Fertigung“ und zum anderen im Vergleich zu bestehenden Ansätzen mit Lossplitting im CCM er-

¹¹ Vor allem gegenüber neuartigen Heuristiken bei denen der Lösungsweg mit einem gewissen „black box“-Charakter behaftet ist, wie bspw. „evolutionäre“ bzw. „genetische Algorithmen“ oder „ant-colony optimization“ (vgl. bspw. MÜLLER-MERBACH, H., 1981 oder SILVER, E. A., 2004).

zielbar ist. Die diesbezüglich gewonnenen Erkenntnisse sowie weitere, aus den Resultaten ableitbare Zusammenhänge werden in Abschnitt 5.3 nochmals umfassend diskutiert und interpretiert, so dass letztendlich eine Grundlage zur Ableitung von Handlungsempfehlungen gelegt wird. Die Arbeit schließt in Kapitel 6 mit einem Resümee und der kritischen Würdigung der Forschungsziele bzw. -fragen sowie einem Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf.

2 Simultane Losgrößen- und Reihenfolgeplanung

2.1 Planungsaufgaben und -umfeld

Die Losgrößen- und Reihenfolgeplanung ist Teil der PPS, deren Aufgaben und Ziele im Folgenden verkürzt und mit Fokus auf das ELSP dargestellt werden sollen.¹² SCHNEEWEIß gliedert die Hauptaufgaben der PPS im Allgemeinen in einen Entscheidungsprozess (*Planung*), die Durchführung des daraus resultierenden Plans (*Vollzug*) sowie die Überwachung der Planerfüllung (*Kontrolle*) bzw. bei festgestellter Abweichung die gegebenenfalls erforderlichen Korrekturen (*Steuerung*).¹³ Das übergeordnete Ziel der PPS besteht nun darin, alle Abläufe und Geschehnisse im Produktionsbereich sowohl quantitativ und qualitativ, als auch räumlich und zeitlich zu planen, zu steuern und zu kontrollieren.¹⁴ Eine diesbezügliche Konkretisierung erfolgt bspw. bei DOMSCHKE/SCHOLL¹⁵ durch die Differenzierung der PPS in drei Teilbereiche (vgl. Abbildung 1).

Produktionsplanung und -steuerung		
Programmplanung	Bereitstellungsplanung	Prozessplanung
Entscheidung über zu fertigende Produktsorten- und -mengen sowie deren zeitliche Priorität	rechtzeitige Verfügbarkeit der Produktionsfaktoren in erforderlicher Quantität und Qualität	zeitliche, mengenmäßige und räumliche Planung der Produktionsdurchführung

Abbildung 1: Teilbereiche der PPS¹⁶

In diesen Teilbereichen lassen sich wiederum strategische Vorgaben (z. B. bezüglich Sortiment, Standort, Produktionsverfahren und -faktoren), taktische Entscheidungen (z. B. Produktionsprogramm nach Menge und Art, Kapazitätsanpassungen) sowie operative Aufgaben (wie Produktionssteuerung und -durchführung) unterscheiden, deren Planung dementsprechend lang-, mittel- oder kurzfristig ausgerichtet ist.¹⁷ Die zwischen den Bereichen und Zielen offensichtlich bestehenden, wechselseitigen Abhängigkeiten

¹² Zur PPS im Allgemeinen vgl. bspw. BLOECH, J. et al., 2008, S. 115 ff. oder DANGELMAIER, W., 2009 bzw. zur PPS im Kontext des ELSP vgl. bspw. MAYR, M., 1996, S. 7 ff.

¹³ Vgl. SCHNEEWEIß, C., 2002, S. 19 ff.

¹⁴ Zu dieser erweiterten Definition vgl. bspw. DREXL, A., 1994, S. 1022 und DOMSCHKE, W.; SCHOLL, A., 2005, S. 109 sowie DANGELMAIER, W., 2009, S. 5 ff.

¹⁵ Vgl. DOMSCHKE, W.; SCHOLL, A., 2005, S. 109.

¹⁶ Eigene Darstellung; Inhalte in Anlehnung an DOMSCHKE, W.; SCHOLL, A., 2005, S. 109.

¹⁷ Vgl. DOMSCHKE, W.; SCHOLL, A., 2005, S. 109 f.

werden bspw. bei BLOECH¹⁸ diskutiert. Zur näheren Einordnung der Losgrößen- und Reihenfolgeplanung soll eine diesbezügliche Betrachtung auf die Interdependenzen innerhalb der Prozessplanung beschränkt werden. Die Teilaufgaben dieses Bereichs sind nach DOMSCHKE/SCHOLL¹⁹ in Abbildung 2 dargestellt und ergänzend hinsichtlich ELSP-spezifischer Eigenschaften bzw. Aufgaben konkretisiert.

(Produktions-) Prozessplanung		
Losgrößenplanung	Durchlauf- und Kapazitätsterminierung	Reihenfolgeplanung
<ul style="list-style-type: none"> • Bestimmung der produktindividuellen, optimalen Fertigungslosgröße (ELSP: einstufige Fertigung mehrerer Produktsorten) 	<ul style="list-style-type: none"> • Einhalten von Terminvorgaben (ELSP: kontinuierliche Nachfragebefriedigung) • Berücksichtigung der Maschinenkapazität (ELSP: Sortenfertigung auf einer Maschine) 	<ul style="list-style-type: none"> • zeitliche Verteilung der Aufträge (ELSP: Auflagehäufigkeit und Reihenfolge der Produktsorten)

Abbildung 2: Teilbereiche der Produktionsprozessplanung²⁰

Die zwischen diesen Teilbereichen der PPS auftretenden Wechselwirkungen begründen die Notwendigkeit einer simultanen Losgrößen- und Reihenfolgeplanung unter Berücksichtigung der vorhandenen Fertigungskapazitäten. Die Entwicklung hin zu einer konkreten Problem- und Modellformulierung wird im folgenden Abschnitt thematisiert.

2.2 Das Economic Lot Scheduling Problem

2.2.1 Problemformulierung und Prämissen

Die ANDLER'SCHE²¹ Losgrößenformel erlaubt die Berechnung der optimalen Fertigungsmenge²² unter Berücksichtigung von Rüst- und Lagerhaltungskosten bei isolierter Betrachtung der Produkte. Im Kontext einer Serien- und Sortenfertigung²³ ist diese Unabhängigkeit zwischen den verschiedenen Erzeugnissen in der Regel aber nicht

¹⁸ Vgl. BLOECH, J. et al., 2008, S. 117 f.

¹⁹ Vgl. DOMSCHKE, W.; SCHOLL, A., 2005, S. 114 f.

²⁰ Eigene Darstellung; Inhalte in Anlehnung an DOMSCHKE, W.; SCHOLL, A., 2005, S. 114 f. ergänzt um Konkretisierung bezüglich des ELSP.

²¹ Vgl. ANDLER, K., 1929.

²² bzw. der optimalen Bestellmenge unter Berücksichtigung von Bestell- und Lagerhaltungskosten

²³ Vgl. ADAM, D., 1969, S. 25 ff.

gegeben, da die Produktsorten bspw. um die zur Verfügung stehende Maschinenkapazität konkurrieren.²⁴ Aus dieser erweiterten Betrachtung leitet sich die Grundproblematik des ELSP – die Notwendigkeit einer simultanen Losgrößen- und Maschinenbelegungs- oder Reihenfolgeplanung – ab, die SALVESON bereits 1956 wie folgt formuliert: „The fundamental defect in the conventional formulations is that the formulae are designed for minimizing each part's manufacturing cost independently. The formulae do not treat of the circumstances where two or more parts are produced by, or share, a common production facility.”²⁵ Basierend auf dieser Annahme äußert SALVESON weiterhin berechtigte Kritik an der praktischen Anwendbarkeit der klassischen Losgrößenformel. Unternehmen, die nur ein Produkt fertigen bzw. für jede Sorte eine eigene Fertigungsanlage vorhalten, stellt sich das Problem der Ermittlung optimaler Losgrößen nicht. Soll hingegen die Maschinenkapazität auf unterschiedliche Erzeugnisse aufgeteilt werden, so können aufgrund der unabhängigen Betrachtung der Produkte bei Ermittlung der optimalen Losgrößen etwaige Interdependenzen nicht abgebildet werden und führen bei der Umsetzung in der Regel zu Konflikten (bspw. in der Maschinenbelegung). SALVESON folgert hieraus treffend: „Thus, the economic lot size formulae developed to date are either of no use where they are technically applicable or they are not technically applicable where they may be useful.”²⁶

EILON beschreibt 1957 ebenso die grundlegende Problematik des ELSP und formuliert, im Hinblick auf einen möglichen Lösungsansatz, folgende Frage: „.. once the "best" lot-sizes for each product have been determined [independently], how can a satisfactory master production schedule be set to take account of the plant capacity and the effects of these lot-sizes on the cycle time?”²⁷. Ausgehend von der Annahme eines Produktionszyklus, bei dem die gefertigten Mengen aller Erzeugnisse für die Befriedigung der Nachfrage in diesem Zeitraum ausreichen, konstatiert EILON weiterhin, dass sich eine solche Lösung bei heterogenen Verbrauchsraten, Lagerhaltungs- und Rüstkostensätzen der Produkte nur zufällig ergeben kann. In der Regel sind die unter isolierter Betrachtung ermittelten, optimalen Losreichweiten hierfür zu kurz oder zu lang, was ein Abweichen

²⁴ Vgl. ADAM, D., 1969, S. 32 ff.

²⁵ SALVESON, M. E., 1956, S. 247.

²⁶ SALVESON, M. E., 1956, S. 247.

²⁷ EILON, S., 1957, S. 549.

von den kostenminimalen Losgrößen erforderlich macht.²⁸ Um dies umzusetzen, schlägt EILON vor für jedes Produkt einen Bereich maximal erlaubter Abweichung (mit Hinblick auf Kostenerhöhung und Performance) festzulegen. Für Produkte, deren Losgröße über den definierten Bereich hinaus angepasst werden müsste, sollte nach EILON eine mehrfache Auflagehäufigkeit während eines Produktionszyklus bzw. das Auslassen eines oder mehrerer Produktionszyklen in Betracht gezogen werden.²⁹ Damit beschreibt EILON bereits den grundlegenden Zusammenhang zwischen CCM und BPA.³⁰

ROGERS definiert 1958 den Begriff des ELSP folgendermaßen: „In practice, the economic lot quantity problem and the scheduling problem often are treated separately in production planning. However, when a number of items must be supplied continuously and the same means of production must be employed for several of the items non concurrently, the "economic lot scheduling problem" may have to be dealt with.“³¹ Zudem beschreibt er einen vierstufigen, generellen Lösungsansatz, der im Wesentlichen mit dem von EILON vergleichbar ist:³²

1. Berechnung der unrestringierten, kostenminimalen Losgrößen.
2. Ermitteln der mit einer partiellen, produktindividuellen Losgrößenänderung einhergehenden Kostenerhöhung.
3. Prüfen, ob die Kombination zweier Produkte einen zulässigen Belegungsplan ermöglicht. Gegebenenfalls Anpassung der Losgrößen unter Berücksichtigung möglichst geringfügiger Kostenerhöhung.
4. Sukzessives Einfügen weiterer Produkte in den Belegungsplan. Kommt es hierbei zu Überschneidungen, so sind diese wiederum durch Anpassung der Losgrößen bei möglichst geringfügiger Kostenerhöhung zu vermeiden.

Diese allgemein formulierten Schritte konkretisiert ROGERS anschließend im Sinne eines teilweise iterativen Rechenalgorithmus.³³

²⁸ Vgl. EILON, S., 1957, S. 557.

²⁹ Vgl. EILON, S., 1957, S. 557.

³⁰ Vergleiche zum CCM Kapitel 2.3.2 bzw. zum BPA Kapitel 2.3.3.

³¹ ROGERS, J., 1958, S. 264.

³² Vgl. ROGERS, J., 1958, S. 273.

³³ Vgl. ROGERS, J., 1958, S. 274 ff.

SALVESON, EILON und ROGERS haben somit die Grundproblematik des ELSP aus der Notwendigkeit einer simultanen Losgrößen- und Reihenfolgeplanung heraus abgeleitet und formuliert. Die damit einhergehenden, ersten Lösungsansätze sind jedoch größtenteils wenig konkret, bilden komplexe lineare Programme oder aufwendige Suchstrategien ab und sind lediglich für eine sehr geringe Anzahl an Produkten praktikabel. Vor dem Hintergrund dieser ursprünglichen Problemformulierungen können nun jedoch die grundlegenden Prämissen der Modellumgebung des ELSP vollständig benannt und erläutert werden. Die folgende Aufzählung orientiert sich überwiegend an ELMAGHRABY:³⁴

- Mehrere artverwandte Erzeugnisse werden sukzessive auf einer Anlage bearbeitet (Serien- und Sortenfertigung). Betrachtet wird ein zweistufiges System, bei dem die erste Stufe als Fertigung und die zweite Stufe als Verbrauch bzw. Absatz interpretiert werden kann.
- Alle Daten sind bekannt und im Zeitablauf konstant (statisch-deterministisch).
- Es wird ein unendlicher Planungshorizont unterstellt.
- Die produktspezifische, kontinuierliche Nachfrage (in Mengeneinheiten je Zeiteinheit) muss stets befriedigt werden können.³⁵
- Die auf der Maschine zur Verfügung stehende Zeit ist durch endliche, produktspezifische Fertigungsraten (in Mengeneinheiten je Zeiteinheit) und reihenfolgeunabhängige Rüstzeiten (in Zeiteinheiten je Rüstvorgang) indirekt begrenzt. Die Kapazität kann zur gleichen Zeit von maximal einem Produkt (durch einen Rüst- oder Produktionsvorgang) beansprucht werden.³⁶
- Die durch die nicht synchronen Fertigungs- und Nachfrageraten bedingten Lagerbestände werden in Form von produktspezifischen, linearen Lagerhaltungskosten (in Geldeinheiten je Mengeneinheiten und Zeiteinheit) berücksichtigt.
- Jede Auflage eines Fertigungsloses verursacht reihenfolgeunabhängige Rüstkosten (in Geldeinheiten je Rüstvorgang).³⁷

³⁴ Vgl. ELMAGHRABY, S. E., 1978b, S. 588.

³⁵ Fehlmengen sind demnach nicht erlaubt.

³⁶ Leerzeiten sind demnach erlaubt.

³⁷ Das heißt selbst bei Aufeinanderfolge zweier Fertigungslose derselben Produktsorte fallen Rüstkosten an.

Zwei weitere Bedingungen, die in vielen Modellen zur ELSP Anwendung finden und im Sinne einer Vereinfachung oftmals implizit unterstellt werden, sind die „zero-switch-“ und die „equal-lotsize-rule“. Erstere besagt, dass der Lagerbestand einer Produktsorte zu Beginn einer jeden Losauflage null sein muss und wird deshalb auch als „zero-inventory“-Bedingung bezeichnet.³⁸ Zum einen wird hierdurch die Berechnung der Lagerhaltungskosten vereinfacht, zum anderen stellt diese Annahme in der Regel eine Optimalitätsbedingung bei der Lösung des ELSP dar.³⁹ Aus diesen Gründen soll die „zero-switch-rule“ auch in der vorliegenden Arbeit als Prämisse vorausgesetzt werden. Dabei sei bereits an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die klassische Auffassung dieser Bedingung im Hinblick auf die Erweiterungen des ELSP in Kapitel 4 entsprechend neu interpretiert und adaptiert werden muss.

Die Annahme der „equal-lotsize-rule“ als generelle Prämisse ist differenzierter zu betrachten. Bei dieser Bedingung wird davon ausgegangen, dass die von einer Produktart gefertigte Menge bei jeder Losauflage unverändert ist.⁴⁰ Konstante Losgrößen erscheinen zunächst für zyklische Auflagemuster naheliegend, können sich aber – im Gegensatz zur „zero-inventory“-Bedingung – negativ auf die Lösungsqualität auswirken. Dabei ist allerdings zu bedenken, dass der Verzicht auf die „equal-lotsize-rule“ und das Zulassen variierender Losgrößen einhergeht mit einer deutlich komplexeren Modellierung und einem entsprechend größeren Rechenaufwand bei der Lösungsermittlung.⁴¹ In dieser Arbeit werden anhand des CCM und des BPA zwei Modelle mit „equal-lotsize-rule“, sowie mit dem TVL ein Modell mit im Zeitablauf variierenden Losgrößen berücksichtigt.⁴²

³⁸ Vgl. MAXWELL, W. L., 1964, S. 102.

³⁹ Vgl. DELPORTE, C. M.; THOMAS, L. J., 1977, S. 1071; Exakte Bedingungen sowie ein Beweis hierfür finden sich bei MATTHEWS, J. P., 1988. Ein anschauliches Beispiel zur Optimalität bzw. Nicht-Optimalität der „zero-switch-rule“ gibt MAXWELL, W. L., 1964, S. 111 ff.

⁴⁰ Vgl. MAXWELL, W. L., 1964, S. 103.

⁴¹ Vgl. hierzu die Lösungsansätze zum ELSP mit variierenden Losgrößen wie bspw. von DOBSON, G., 1987 oder ZIPKIN, P. H., 1991 bzw. die diesbezüglichen Ausführungen in Kapitel 2.3.4.

⁴² Zum CCM vgl. Kapitel 2.3.2 bzw. 4.3, zum BPA Kapitel 2.3.3 bzw. 4.4 sowie zum TVL Kapitel 2.3.4 bzw. 4.5.

2.2.2 Einordnung und Abgrenzung

Die in Abschnitt 2.1 erläuterten Aufgaben der simultanen Losgrößen- und Reihenfolgeplanung stellen sich in Theorie und Praxis unter den verschiedensten Umständen. Im Folgenden findet daher zunächst die Einordnung des ELSP im Sinne einer Klassifizierung hinsichtlich der Planungssituation statt. Anschließend erfolgt eine differenziertere Betrachtung der Modellumgebung zur Abgrenzung gegenüber verwandten Problemstellungen. Eine übersichtliche Darstellung zur Einordnung des ELSP in die Klasse der deterministischen Losgrößen- und Bestellmengenprobleme (vgl. Abbildung 3) findet sich bei DOMSCHKE/SCHOLL/VOß⁴³.

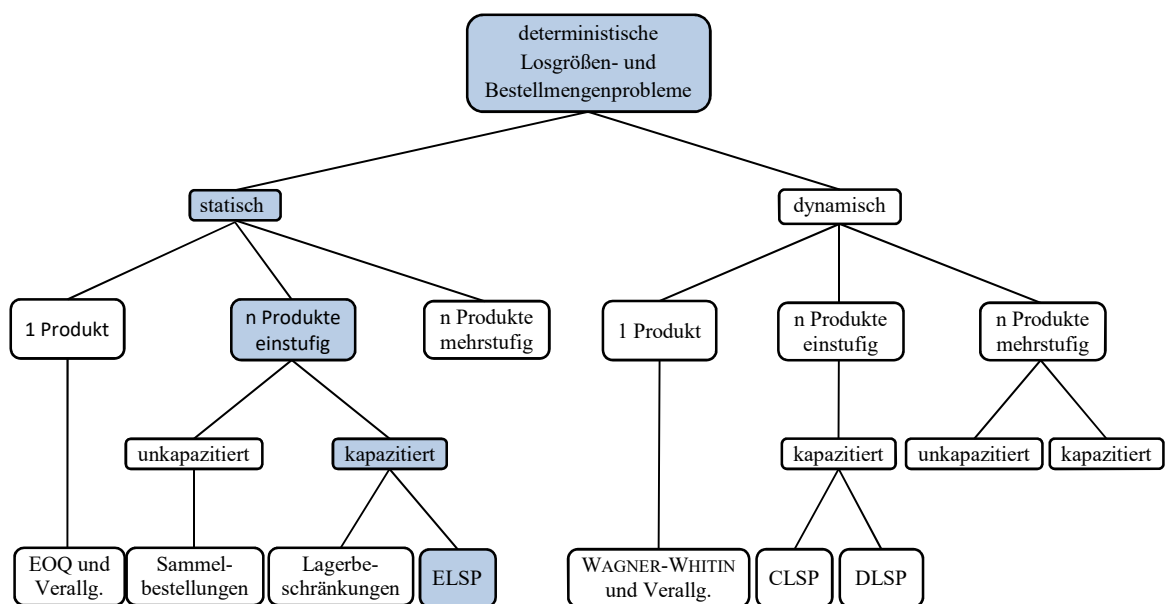


Abbildung 3: Klassifizierung deterministischer Losgrößen- und Bestellmengenprobleme⁴⁴

Demnach ist das klassische ELSP in einer statisch-deterministischen Modellumgebung angesiedelt, in der die einstufige Produktion verschiedener, artverwandter Erzeugnisse auf einer Fertigungseinrichtung mit beschränkter Kapazität betrachtet wird. Als Vertreter der direkten, deterministisch-dynamischen Pendanten werden das CLSP und das DLSP angeführt.⁴⁵ Um die Abgrenzung zum ELSP zu vervollständigen und zu konkretisieren, werden zunächst im Folgenden begrifflich und inhaltlich eng verwandte Problemstellungen näher erläutert.

⁴³ Vgl. DOMSCHKE, W.; SCHOLL, A.; VOß, S., 1997.

⁴⁴ In Anlehnung an DOMSCHKE, W.; SCHOLL, A.; VOß, S., 1997, S. 74.

⁴⁵ Eine Zusammenfassung von Reviews zu stochastischen Varianten des ELSP geben bspw. GLOCK, C. H.; GROSSE, E. H.; RIES, J. M., 2014, S. 45.

2.2.2.1 Modelle mit dynamisch-deterministischer Nachfrage

Zu den folgenden Grundmodellen mit *zeitlich variabler (dynamischer) Nachfrage* finden sich Zusammenfassungen bspw. bei SALOMON ET AL., DREXL/KIMMS und RIZK/MARTEL⁴⁶ bzw. aggregierte, tabellarische Darstellungen bei SALOMON ET AL., HAASE, PATTLOCH und REITNER⁴⁷.

Das *Capacitated Lotsizing Problem (CLSP)* kann als Erweiterung des WAGNER-WHITIN-Modells bei beschränkter Fertigungskapazität angesehen werden.⁴⁸ Ein endlicher Planungshorizont ist in diskrete (Makro-) Zeitperioden unterteilt, in denen die einstufige Fertigung mehrerer Produkte („big bucket problem“)⁴⁹ ohne das Auftreten von Fehlern zu planen ist. Der betrachtete Zeitraum umfasst dabei meist Monate oder Wochen⁵⁰, so dass das CLSP auf eine mittelfristige Produktionsplanung bei Minimierung der Rüst- und Lagerhaltungskosten abzielt. Grundsätzlich findet hierbei keine simultane Reihenfolgeplanung statt; diese kann lediglich nachgelagert erfolgen.⁵¹ Allerdings gibt es Ansätze, die eine vorläufige ELSP-Lösung an eine dynamische Nachfragesituation anpassen und so die Reihenfolgeplanung in die CLSP-Lösung einbeziehen.⁵²

Das *Discrete Lotsizing and Scheduling Problem (DLSP)* geht zurück auf LASDON/TERJUNG und wird von FLEISCHMANN systematisch aufgearbeitet und erweitert.⁵³ Das DLSP baut auf dem CLSP auf, wobei die Makro-Zeitperioden zusätzlich in Mikro-Zeitperioden⁵⁴ unterteilt werden, deren Längen somit meist Tage, Schichten oder Stunden⁵⁵ umfassen. Demnach eignet sich das DLSP für die mittel- und kurzfristige Produktions-

⁴⁶ Vgl. SALOMON, M. et al., 1991, DREXL, A.; KIMMS, A., 1997 und RIZK, N.; MARTEL, A., 2001.

⁴⁷ Vgl. SALOMON, M. et al., 1991, S. 803, HAASE, K., 1994, S. 28, PATTLOCH, M., 1999, S. 36 sowie REITNER, S., 2007, S. 25.

⁴⁸ Vgl. DREXL, A.; KIMMS, A., 1997, S. 224.

⁴⁹ Vgl. EPPEN, G. D.; MARTIN, R. K., 1987, S. 832.

⁵⁰ Vgl. SALOMON, M. et al., 1991, S. 802.

⁵¹ Vgl. DREXL, A.; KIMMS, A., 1997, S. 225, PATTLOCH, M., 1999, S. 30 sowie FLEISCHMANN, B., 1990, S. 337.

⁵² Vgl. VAN DEN BROECKE, F.; VAN LANDEGHEM, H.; AGHEZZAF, E. H., 2005, S. 799 und VAN DEN BROECKE, F.; VAN LANDEGHEM, H.; AGHEZZAF, E. H., 2008, S. 126.

⁵³ Vgl. LASDON, L. S.; TERJUNG, R. C., 1971 und FLEISCHMANN, B., 1990.

⁵⁴ Vgl. DREXL, A.; KIMMS, A., 1997, S. 225.

⁵⁵ Vgl. SALOMON, M. et al., 1991, S. 802, DREXL, A.; HAASE, K., 1995, S. 74 sowie FLEISCHMANN, B., 1990, S. 338.

planung, bei der Losgrößen- und Reihenfolgeplanung nun integriert⁵⁶ erfolgen können. Allerdings werden hierbei im Vergleich zum CLSP zwei wesentliche Einschränkungen vorgenommen: Zum einen kann je Zeitperiode höchstens ein Produkt gefertigt werden („small bucket problem“)⁵⁷ und zum anderen ist die Losgröße nicht kontinuierlich variabel, das heißt sie beträgt entweder null oder entspricht der maximal möglichen Fertigungskapazität („all or nothing“)⁵⁸. Ein direkter Vergleich bereits angeführter, zentraler Unterschiede in den Annahmen von ELSP und DLSP findet sich bspw. bei SALOMON ET AL.⁵⁹ Eine Kombination beider Ansätze präsentieren GONÇALVES/LEACHMAN und GONÇALVES/SOUSA.⁶⁰ Zudem stellen SALOMON ET AL. einen Vergleich des DLSP zum **Job Scheduling Problem (JSP)** an.⁶¹ Während sich beim DLSP die Nachfrage einer Periode aus dem für jedes Produkt aggregierten Bedarf zusammensetzt, ist sie beim JSP in Form von Aufträgen mit zu berücksichtigenden Freigabezeitpunkten, Fertigstellungsterminen und Bearbeitungszeiten gegeben. Das Problem der Losgrößenplanung wird demnach beim JSP in der Regel nicht explizit berücksichtigt. Ein weiterer Unterschied liegt darin, dass ein Produktionsvorgang beim DLSP lediglich zu Beginn einer Periode, beim JSP hingegen zu jedem beliebigen Zeitpunkt erfolgen kann.⁶²

Das **Continuous Setup Lotsizing Problem (CSLP)** wird von KARMARKAR/SCHRAGE⁶³ formuliert und basiert grundsätzlich auf den Annahmen des zuvor beschriebenen Modells. Damit ist das CLSP ebenfalls im Bereich der eher kurzfristigen Produktionsplanung angesiedelt.⁶⁴ Im Gegensatz zum DLSP fallen Rüstkosten hier lediglich bei einem Sortenwechsel, also nicht zwangsläufig mit Beginn einer Losproduktion zum Anfang jeder Periode, an. Wird demnach in zwei aufeinanderfolgenden (oder durch Leerzeiten getrennten) Perioden die gleiche Produktsorte gefertigt, so ist nur ein Rüstvorgang zu Beginn des ersten Zeitabschnitts zu berücksichtigen.⁶⁵ Des Weiteren ist im CSLP die Prämisse einer „all or nothing“-Fertigung aufgehoben. Allerdings besteht weiterhin die

⁵⁶ Vgl. TRANSCHEL, S. et al., 2011, S. 2464.

⁵⁷ Vgl. EPPEN, G. D.; MARTIN, R. K., 1987, S. 832.

⁵⁸ Vgl. GICQUEL, C. et al., 2009, S. 2690.

⁵⁹ Vgl. SALOMON, M. et al., 1991, S. 802.

⁶⁰ Vgl. GONÇALVES, J. F.; LEACHMAN, R. C., 1998 und GONÇALVES, J. F.; SOUSA, P. S. A., 2011.

⁶¹ Vgl. SALOMON, M. et al., 1991, S. 802.

⁶² Vgl. SALOMON, M. et al., 1991, S. 802.

⁶³ Vgl. KARMARKAR, U. S.; SCHRAGE, L., 1985.

⁶⁴ Vgl. DREXL, A.; HAASE, K., 1995, S. 74.

⁶⁵ Vgl. DREXL, A.; KIMMS, A., 1997, S. 226.

Einschränkung, dass nur maximal ein Produkt je Periode gefertigt werden kann.⁶⁶ Wird hierbei die Produktionskapazität nicht vollständig ausgeschöpft, besteht demzufolge keine Möglichkeit die freie Maschinenzeit dieses Abschnitts für die Bearbeitung eines weiteren Erzeugnisses zu nutzen. Dieses Defizit bildet den Ansatzpunkt für das folgende Modell.⁶⁷

Als Erweiterung des CSLP erlaubt das *Proportional Lot Sizing and Scheduling Problem (PLSP)* nach DREXL/HAASE die Fertigung von maximal zwei Sorten je Periode.⁶⁸ Dadurch wird prinzipiell eine bessere Auslastung der Produktionskapazitäten möglich.

Das *General Lotsizing and Scheduling Problem (GLSP)* wurde von FLEISCHMANN/MEYR eingeführt und basiert auf den Grundannahmen des DLSP.⁶⁹ Allerdings wird die Bedingung einer „all or nothing“-Fertigung dadurch entschärft, dass neben der Zeiteinteilung in (fixe) Makroperioden die Länge der Mikroperioden eine Entscheidungsvariable des Modells ist.⁷⁰ Die maximale Anzahl der Mikroperioden (und damit die Anzahl der Produkartsorten) je Makroperiode ist grundsätzlich unbeschränkt und wird als Parameter vorgegeben.⁷¹ Somit zählt das GLSP zu den „big bucket“-Problemen⁷² und ist als Verallgemeinerung von DLSP, CSLP und PLSP anzusehen. Dadurch weist das GLSP zwar eine hohe Lösungsgüte auf, erfordert aber auch einen relativ großen Rechenaufwand.⁷³

Zu diesen Grundmodellen mit dynamischer Nachfrage existieren ferner diverse Erweiterungen, die bspw. das Auftreten von Rüstzeiten, reihenfolgeabhängigen Rüstkosten, Überstunden, parallelen Maschinen oder Fehlmengen berücksichtigen.⁷⁴

⁶⁶ Vgl. DREXL, A.; KIMMS, A., 1997, S. 226.

⁶⁷ Vgl. DREXL, A.; KIMMS, A., 1997, S. 226 f.

⁶⁸ Vgl. DREXL, A.; HAASE, K., 1995, S. 74.

⁶⁹ Vgl. DREXL, A.; KIMMS, A., 1997, S. 227.

⁷⁰ Vgl. FLEISCHMANN, B.; MEYR, H., 1997, S. 12.

⁷¹ Vgl. DREXL, A.; KIMMS, A., 1997, S. 227.

⁷² Vgl. TRANSCHEL, S. et al., 2011, S. 2464.

⁷³ Vgl. FLEISCHMANN, B.; MEYR, H., 1997, S. 14.

⁷⁴ Vgl. hierzu bspw. ALMADA-LOBO, B. et al., 2007, DREXL, A.; HAASE, K., 1995, S. 80 ff., PATTLACH, M., 1999, TRANSCHEL, S. et al., 2011 sowie SALOMON, M. et al., 1997.

2.2.2.2 Modelle mit statisch-deterministischer Nachfrage

Unter den Planungsproblemen mit im Regelfall statisch-deterministischer Nachfrage können insbesondere vier Modelle identifiziert werden, die einen sehr hohen Verwandtschaftsgrad zum ELSP aufweisen. Diese sollen im Folgenden erläutert und hinsichtlich Ihrer Analogie zum ELSP differenziert betrachtet werden.

Das *Joint Replenishment Problem (JRP)* beschreibt ursprünglich die Aufgabe der Planung optimaler Bestellmengen bei Zusammenfassung mehrerer Produkte unter Berücksichtigung gruppenspezifischer Bestellkosten.⁷⁵ Interpretiert man diese Situation im Kontext einer Fertigungsumgebung, so ist von einem gemeinsamen Rüstkostensatz für die gesamte Teilefamilie („major setup cost“ nach Stillstand oder Leerzeiten der Maschine) und geringeren Rüstkosten bei einem Produktwechsel innerhalb einer solchen Gruppe („minor setup cost“) auszugehen.⁷⁶ Auch wenn ein Zusammenhang zur Planungssituation beim ELSP nicht unbedingt auf den ersten Blick offensichtlich erscheint, so zeigt GRAVES⁷⁷, dass das JRP als Spezialfall des ELSP und vice versa angesehen werden kann: „... the JRP can be considered as a special case of the ELSP in which an additional surrogate product with a setup frequency of one ... is defined to reflect the major setup cost; alternatively the ELSP could be considered as a special case of the JRP for which the major setup cost .. is zero”.⁷⁸ ZIPKIN weist in diesem Zusammenhang auf die unterschiedliche Intention in den Aufgabenstellungen beider Probleme hin: „As in the joint-replenishment problem, we must coordinate the items, but for a different reason and in the opposite way: There [in the JRP], economies of scope favor ordering items at the same time. Here [in the ELSP], the limited-capacity machine forces us to produce items at different times. In effect, there are extreme diseconomies of scope.”⁷⁹ Ein weiterer Unterschied zum ELSP besteht häufig darin, dass beim JRP nicht selten eine unendliche Produktionsrate unterstellt wird.⁸⁰ Hierin zeigt sich erneut der Bezug zur Bestellmengenplanung. In solchen Fällen ist die Kapazitätsbetrachtung lediglich auf Rüstzeiten beschränkt und demnach erheblich vereinfacht.

⁷⁵ Vgl. LISKE, T.; KUHN, H., 2009, S. 217.

⁷⁶ Vgl. GRAVES, S. C., 1979, S. 277.

⁷⁷ Vgl. GRAVES, S. C., 1979, S. 278.

⁷⁸ GRAVES, S. C., 1979, S. 278.

⁷⁹ ZIPKIN, P. H., 2000, S. 155.

⁸⁰ Vgl. GRAVES, S. C., 1979, S. 277.

Beim *Two Echelon Inventory Problem (TEIP)* besteht die grundsätzliche Planungsaufgabe darin, die Bedarfsdeckung mehrerer, unabhängiger Händler durch ein Zentrallager kostenoptimal zu koordinieren. Zu berücksichtigen sind hierbei die individuellen Bestell- und Lagerhaltungskosten (sowohl der Händler, als auch des Zentrallagers).⁸¹ Wird davon ausgegangen, dass das Zentrallager genau einen Bestellvorgang je Periode durchführt und die Bestellfrequenz der Händler im gleichen Zeitraum ein Vielfaches davon beträgt, so kann das TEIP ebenfalls als Spezialfall des ELSP angesehen werden.⁸² Unter dieser Voraussetzung gelangt GRAVES zu folgender Aussage bezüglich der Lösungsfindung beim ELSP, JRP und TEIP: „If we modify the ELSP so that it is well posed, then any solution procedure for one problem can be modified to apply to the other two problems.“⁸³

Der Begriff des *Economic Lot and Supply Scheduling Problem (ELSSP)* wird 2008 von LISKE/KUHN⁸⁴ geprägt. Gegenüber dem klassischen ELSP wird das Planungsumfeld auf die Bereitstellung der zur Produktion benötigten Materialien erweitert. Dabei wird davon ausgegangen, dass die jeweils benötigten Mengen eines Produktionsfaktors vor Beginn der Fertigung einer Erzeugnisart im Lager vorhanden sein und zuvor von unterschiedlich stationierten Zulieferern beschafft werden müssen. Das hieraus resultierende „Vehicle Routing Problem“⁸⁵ unterliegt zudem den Beschränkungen einer limitierten Anzahl an Fahrzeugen mit begrenzter Ladekapazität.⁸⁶ LISKE/KUHN beschreiben die Planungsaufgabe dementsprechend wie folgt: „The aim of the ELSSP is to determine simultaneously the delivery quantities ... of the input materials, the routes for the deliveries, the production sequence of the end items, and the production lot-sizes in order to minimize the average transportation, inventory holding, and production costs.“⁸⁷

Das *Economic Lot and Delivery Scheduling Problem (ELDSP)* weist nicht nur in der Benennung enge Parallelen zum ELSP auf, es kann auch als Erweiterung des ELSP auf

⁸¹ Vgl. GRAVES, S. C., 1979, S. 278.

⁸² Vgl. GRAVES, S. C., 1979, S. 279.

⁸³ GRAVES, S. C., 1979, S. 279.

⁸⁴ Vgl. LISKE, T.; KUHN, H., 2009.

⁸⁵ Vgl. FEIGE, D.; KLAUS, P., 2008, S. 393 ff.

⁸⁶ Vgl. LISKE, T.; KUHN, H., 2009, S. 215.

⁸⁷ LISKE, T.; KUHN, H., 2009, S. 216.

eine Supply Chain Umgebung interpretiert werden⁸⁸. Grundsätzlich gelten in beiden Modellen die gleichen Annahmen⁸⁹, allerdings wird bei der Planung im ELDSP ein endlicher Zeithorizont unterstellt sowie oftmals von der Verfügbarkeit paralleler Maschinen ausgegangen⁹⁰. Des Weiteren werden beim ELDSP Transportvorgänge explizit in die Planung einbezogen. Dies geschieht dadurch, dass unterschiedliche Produkte in verschiedenen Mengen zu einer Lieferung zusammengefasst und gemeinsam zur Verbrauchsstelle transportiert werden.⁹¹ Dadurch beeinflusst – im Gegensatz zum ELSP – die Fertigungsreihenfolge zusätzlich die anfallenden Lagerhaltungskosten und somit auch die Gesamtlösung des Problems.⁹² Folglich sollten Produkte mit hohen Lagerhaltungskosten und kurzen Produktionszeiten am Ende einer Periode (also möglichst kurz vor Transport) gefertigt werden und umgekehrt.⁹³ Eine derartige Gestaltung der Transportvorgänge (die Zusammenfassung von Fertigungslosen zu Beförderungszwecken) stellt demnach den wesentlichen Unterschied zur im Hauptteil dieser Arbeit vorgestellten Erweiterung des ELSP um Transportvorgänge im Sinne eines Lossplittings (der Aufteilung von Fertigungslosen zur Reduzierung von Kosten und Durchlaufzeit) dar. Zudem wird in den Modellen zum ELDSP die Transporthäufigkeit in der Regel als Parameter betrachtet bzw. anderweitig determiniert⁹⁴, während in der vorliegenden Arbeit eine simultane Optimierung der Transporthäufigkeit verfolgt wird.

2.2.3 Problemkomplexität und Klassifizierung von Lösungsverfahren

Allein die Ermittlung der optimalen Fertigungsreihenfolge und Auflagezeitpunkte – die den kombinatorischen Teil der Planungsaufgaben definieren (vgl. Abbildung 4) – führen dazu, dass das ELSP in die Klasse der NP-schweren Probleme einzuordnen ist.⁹⁵ HSU hat 1987 den Nachweis erbracht, dass bereits eine Version des ELSP mit auf Zweierpotenzen⁹⁶ eingeschränkten Produktauflagehäufigkeiten NP-schwer ist und damit implizit gezeigt, dass dies ebenso für jede diesbezüglich weniger einschränkende Variante des

⁸⁸ Vgl. JENABI, M. et al., 2007, S. 231.

⁸⁹ Vgl. KUHN, H.; LISKE, T., 2011, S. 3799.

⁹⁰ Vgl. JENABI, M. et al., 2007, S. 231.

⁹¹ Vgl. HAHM, J.; YANO, C. A., 1995c, S. 224.

⁹² Vgl. HAHM, J.; YANO, C. A., 1995c, S. 224 und KHOUJA, M., 1999, S. 4068.

⁹³ Vgl. HAHM, J.; YANO, C. A., 1995c, S. 231.

⁹⁴ Vgl. HAHM, J.; YANO, C. A., 1995c, S. 224: Hier entspricht die Transporthäufigkeit bspw. dem kleinsten gemeinsamen Vielfachen aller Produktauflagehäufigkeiten.

⁹⁵ Vgl. MAYR, M., 1996, S. 36.

⁹⁶ Siehe Kapitel 2.3.3.

Problems gilt.⁹⁷ Das heißt, es ist bis dato kein Algorithmus bekannt, der diese Planungsaufgabe unter polynomialem Rechenaufwand garantiert optimal zu lösen vermag.⁹⁸ GALLEGO/SHAW⁹⁹ haben diese Beweisführung 1997 auf weitere, in der Literatur populäre Einschränkungen¹⁰⁰ des ELSP bei zyklischen Auflagemustern erweitert.

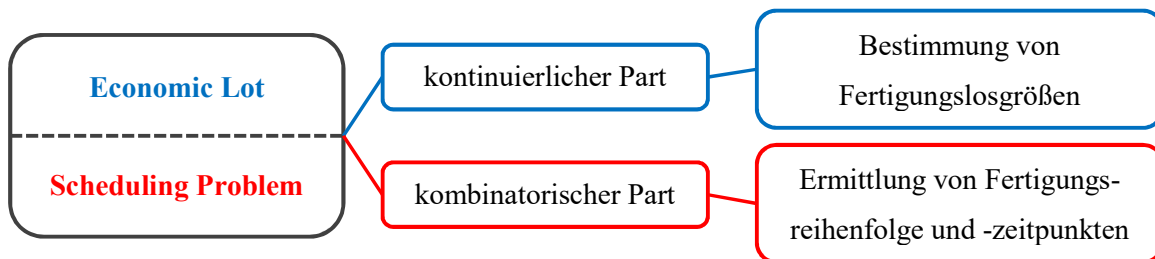


Abbildung 4: Teilprobleme des ELSP

Da Probleme dieser Komplexität nicht ohne weiteres lösbar sind, bestehen prinzipiell zwei Alternativen zur Entwicklung von Lösungsansätzen:¹⁰¹

1. Exakte, analytische Verfahren, die darauf abzielen zu einer eingeschränkten bzw. reduzierten Variante des Problems die optimale Lösung zu bestimmen.
2. Heuristische Ansätze, die versuchen eine möglichst gute Näherungslösung für das originäre Problem zu finden.

Den jeweils damit einhergehenden Kompromiss beschreibt ELMAGHRABY treffend wie folgt: „In some sense, each category presents a “penalty” to be paid as the price for deviating from the “true optimum”: in category I, one solves a slightly different problem, but one achieves its optimum; while in category II, one attacks the original problem, but then one never knows if there isn't a better solution than the result he obtains.”¹⁰² Bezogen auf das ursprüngliche ELSP existieren streng genommen keine Ansätze, die ohne irgendwelche Einschränkungen hinsichtlich des Lösungsraums auskommen. So ist bspw. das Inbetrachtziehen nicht-zyklischer Auflagemuster in diesem Zusammenhang weder sinnvoll realisierbar noch zielführend.¹⁰³ Zudem sind – wie von GALLEGO/SHAW gezeigt – selbst viele weitreichende Einschränkungen des ELSP weiterhin NP-schwer. Eine der

⁹⁷ Vgl. HSU, W. L., 1983, S. 96.

⁹⁸ Vgl. DOMSCHKE, W.; SCHOLL, A.; VOß, S., 1997, S. 53.

⁹⁹ Vgl. GALLEGO, G.; SHAW, D. X., 1997.

¹⁰⁰ Insbesondere zu erwähnen sind hier die in Kapitel 2.2.1 erläuterten Prämissen der „equal-lotsize-“, und der „zero-inventory-rule“ sowie des BPA im Allgemeinen (vgl. GALLEGO, G.; SHAW, D. X., 1997, S. 109).

¹⁰¹ Vgl. ELMAGHRABY, S. E., 1978b, S. 587.

¹⁰² ELMAGHRABY, S. E., 1978b, S. 587.

¹⁰³ Vgl. GALLEGO, G.; SHAW, D. X., 1997, S. 109.

Hauptaufgaben bei der Entwicklung von Lösungsansätzen für das ELSP besteht demnach darin, die Problemkomplexität weitestgehend zu reduzieren und gleichsam die Lösungsgüte möglichst wenig einzuschränken. Inwieweit das den in der Literatur bestehenden, gängigsten Verfahren gelingt und in welche der beiden Kategorien diese eingeordnet werden können, ist unter anderem Gegenstand des folgenden Abschnitts .

2.3 Lösungsansätze und Kostenschranken des ELSP

Die Ausführungen dieses Abschnitts setzen die in Kapitel 2.2.1 angeführten, allgemeinen Prämissen des ELSP voraus. Eventuelle Abweichungen oder Ergänzungen werden an entsprechender Stelle explizit erläutert. Zudem wird hinsichtlich der Weiterleitung der Erzeugnisse von der produzierenden zur verbrauchenden Stufe von einer „*offenen Fertigung*“¹⁰⁴ ausgegangen. Diese Art Lagerhaltungsmodell wird in nahezu allen publizierten Ansätzen zum ELSP implizit unterstellt¹⁰⁵ und kann – ebenso wie „zero-inventory-“ und „equal-lotsize-rule“ – als vereinfachende Annahme angesehen werden, da sie gegenüber möglichen Alternativen zu geringeren, einfach zu ermittelnden Lagerbeständen und kürzeren Durchlaufzeiten¹⁰⁶ führt.

2.3.1 Die isolierte Lösung als untere Kostenschranke

Die auf Basis der ANDLER'SCHEN¹⁰⁷ Formel für jede Produktsorte isoliert ermittelten, optimalen Losgrößenpolitiken werden in der Literatur als isolierte oder unabhängige Lösung („**Independent Solution**“ (IS)) bezeichnet.¹⁰⁸ Im Allgemeinen ist auf dieser Grundlage kein zyklischer, überschneidungsfreier Maschinenbelegungsplan realisierbar, so dass im Grunde nicht von einer „Lösung“ im eigentlichen Sinne gesprochen werden kann. Unter gewissen Voraussetzungen kann jedoch auch dieses freie Optimum eine zulässige Lösung darstellen. GOYAL¹⁰⁹ nennt hierfür als Kriterien eine insgesamt sehr geringe (Netto-) Auslastung der Produktionsanlage ($\leq 25\%$), optimale produktindividuelle Auflagehäufigkeiten, die eine konfliktfreie Terminierung der Startzeitpunkte erlau-

¹⁰⁴ Vgl. BLOECH, J. et al., 2008, S. 266 ff. bzw. die Ausführungen in Kapitel 3.1.

¹⁰⁵ Ausnahmen hierzu werden in Kapitel 4.1 diskutiert.

¹⁰⁶ Vgl. hierzu Kapitel 3.1.

¹⁰⁷ Vgl. ANDLER, K., 1929.

¹⁰⁸ Vgl. ELMAGHRABY, S. E., 1978b, S. 588.

¹⁰⁹ Vgl. GOYAL, S. K., 1975a, S. 487.

ben, sowie Produktionszeiten, die eine überschneidungsfreie Maschinenbelegung ermöglichen. Gleichzeitig weist er jedoch darauf hin, dass das Auftreten einer derartigen Konstellation in der Praxis als sehr unwahrscheinlich angesehen werden kann und in der Regel Anpassungen der IS zur Sicherstellung eines zulässigen Maschinenbelegungsplans notwendig sind.¹¹⁰ Dennoch kommt der IS eine wichtige Bedeutung bei der Entwicklung von Lösungsverfahren zum ELSP zu. Als unrestringiertes Optimum bildet sie eine nicht zu unterschreitenden Kostenuntergrenze („lower bound“)¹¹¹ und stellt damit einen Benchmark für die Lösungsqualität eines Algorithmus dar. Diesbezüglich ist es allerdings sinnvoll, eventuell auftretende Rüstzeiten bei der Ermittlung der IS zu berücksichtigen und so eine „schärfere“ Kostenuntergrenze zu erhalten. GALLEGO formuliert dies bspw. folgendermaßen: „The independent solution satisfies the capacity constraint whenever the proportion of time spent on setups and production is less than one. In other words, the capacity constraint is satisfied whenever there is more than enough time to setup and produce the items with the chosen order intervals.“¹¹² Im weiteren Verlauf dieser Arbeit soll unter dem Begriff der IS stets die optimale Losgrößenpolitik unter Einbeziehung dieser Nebenbedingung verstanden werden. Die mathematische Herleitung lässt sich wie folgt darstellen. Den Ausgangspunkt bildet die Funktion der je Zeiteinheit anfallenden Gesamtkosten (2-1)¹¹³ in Abhängigkeit von der produktindividuellen Zykluszeit $t_{v,i}$ (Verbrauchszeitraum für Produkt i).

$$K(t_{v,i}) = \sum_{i=1}^I \underbrace{\frac{1}{2} \cdot c_{L,i} \cdot x_{v,i} \cdot \left(1 - \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}\right)}_{h_i^0} \cdot t_{v,i} + \sum_{i=1}^I \frac{k_{R,i}}{t_{v,i}} \quad (2-1)$$

Das Nullsetzen der ersten Ableitung dieser Kostenfunktion führt zu folgender Bestimmungsgleichung für den optimalen, unrestringierten Verbrauchszyklus einer Produktart und ist vergleichbar mit dem Ergebnis der ANDLER‘SCHEN Losgrößenformel:

$$t_{v,i} = \sqrt{\frac{k_{R,i}}{h_i^0}} \quad (2-2)$$

¹¹⁰ Vgl. GOYAL, S. K., 1975a, S. 487 f.

¹¹¹ Vgl. BOMBERGER, E. E., 1966, S. 779 f.

¹¹² GALLEGO, G., 1993, S. 1036.

¹¹³ Vgl. bspw. BOMBERGER, E. E., 1966, S. 780 oder CARSTENSEN, P., 2002, S. 25.

Bei rein isolierter Betrachtung einer Sorte wäre lediglich sicherzustellen, dass die jeweilige Summe aus Rüst- ($t_{R,i}$) und Produktionszeit ($t_{p,i}$) kleiner oder gleich der entsprechenden Zykluszeit ist bzw. die korrespondierende Bruttoauslastung 100% nicht übersteigt.¹¹⁴

$$t_{R,i} + t_{p,i} \leq t_{v,i} \quad \text{bzw.} \quad \underbrace{\frac{t_{p,i} + t_{R,i}}{t_{v,i}}}_{\text{Bruttoauslastung}} = \underbrace{\frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}}_{\text{Nettoauslastung}} + \underbrace{\frac{t_{R,i}}{t_{v,i}}}_{\text{Rüstzeitanteil}} \leq 1$$

Demzufolge würde sich bei rein isolierter Betrachtung folgende, optimale Verbrauchszeit $t_{v,i}^*$ ergeben:

$$t_{v,i}^* = \max \left\{ \sqrt{\frac{k_{R,i}}{h_i^0}}; \frac{t_{R,i}}{1 - \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}} \right\} \quad (2-3)$$

Im Kontext des ELSP ist jedoch eine aggregierte Betrachtung dieser Nebenbedingung sinnvoll, so dass hinsichtlich der Verwendung der IS als untere Kostenschranke zumindest gewährleistet ist, dass die Summe der Rüst- und Produktionszeitanteile aller Produkte (kumulierte Bruttoauslastung (2-4)) nicht mehr als 100% beträgt.

$$\sum_{i=1}^I \frac{t_{p,i} + t_{R,i}}{t_{v,i}} = \sum_{i=1}^I \left(\frac{x_{v,i}}{x_{p,i}} + \frac{t_{R,i}}{t_{v,i}} \right) \leq 1 \quad (2-4)$$

Falls die nach (2-3) berechneten, optimalen Produktzykluszeiten die Bedingung (2-4) nicht erfüllen (also zu einer kumulierten Bruttoauslastung größer 100% führen), so sind bei deren Ermittlung die aggregierten Rüstzeitanteile explizit zu berücksichtigen.¹¹⁵ Die Kostenfunktion (2-1) wird hierzu bspw. mittels eines LAGRANGE-Multiplikators¹¹⁶ ($\lambda > 0$) um die entsprechende Nebenbedingung erweitert:¹¹⁷

$$K(t_{v,i}, \lambda) = \sum_{i=1}^I h_i^0 \cdot t_{v,i} + \sum_{i=1}^I \frac{k_{R,i}}{t_{v,i}} + \lambda \cdot \left[\sum_{i=1}^I \frac{t_{R,i}}{t_{v,i}} - \left(1 - \sum_{i=1}^I \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}} \right) \right] \quad (2-5)$$

¹¹⁴ Die Nettoauslastung ist für diesen Fall aufgrund der Voraussetzung eines „Staulagers“ ($x_{p,i} > x_{v,i}$) annahmegemäß kleiner 100%. Zum Begriff des „Staulagers“ vgl. bspw. WICHER, H., 2003, S. 451.

¹¹⁵ Vgl. BOMBERGER, E. E., 1966, S. 780 bzw. DOBSON, G., 1987, S. 767.

¹¹⁶ Zur Multiplikatoren-Methode von LAGRANGE vgl. bspw. SAUER, M., 2009, S. 60 ff. oder FORSTER, O., 2011, S. 114 ff.

¹¹⁷ Vgl. PINEDO, M., 2009, S. 156.

Die kostenminimale Zykluszeit ergibt sich wiederum durch Nullsetzen der partiellen Ableitung nach $t_{v,i}$:

$$t_{v,i}^*(\lambda) = \sqrt{\frac{k_{R,i} + \lambda \cdot t_{R,i}}{h_i^o}} \quad (2-6)$$

Setzt man diese Formel in die Nebenbedingung (die sich wiederum aus der gleich null gesetzten, partiellen Ableitung von (2-5) nach λ ergibt) ein, so erhält man folgende Gleichung die zur Bestimmung des Optimalwerts von λ erfüllt sein muss:

$$\sum_{i=1}^I t_{R,i} \cdot \sqrt{\frac{h_i^o}{k_{R,i} + \lambda \cdot t_{R,i}}} = 1 - \sum_{i=1}^I \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}} \quad (2-7)$$

Oder in anderen Worten: λ ist die kleinste, nicht-negative Zahl, für die sich nach Formel (2-6) Zykluszeiten ergeben, die die Bedingung (2-4) gerade so einhalten.¹¹⁸ Für eine Bruttoauslastung, die 100% nicht übersteigt, nimmt λ den Wert null an und die optimalen Verbrauchszeiten entsprechen denen, die sich auch bei rein isolierter Betrachtung nach Formel (2-2) ergeben würden.¹¹⁹ Für den Fall, dass Restriktion (2-4) greift, wird im Folgenden der Optimalwert für λ bei konkreten Zahlenbeispielen rechnergestützt ermittelt.¹²⁰

Somit ist die IS als untere Kostenschranke für den weiteren Verlauf der Arbeit definiert. Die für einen Maschinenbelegungsplan relevanten Größen der Produktions- und Belegungszeiten ($t_{B,i}$) lassen sich auf Basis der nach Formel (2-6) bestimmten, optimalen Verbrauchszeiten wie folgt ableiten:

$$t_{B,i}(t_{v,i}) = t_{v,i} \cdot \underbrace{\frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}}_{t_{p,i}} + t_{R,i}$$

¹¹⁸ Vgl. BOMBERGER, E. E., 1966, S. 780.

¹¹⁹ Vgl. BOMBERGER, E. E., 1966, S. 780.

¹²⁰ Da bei dieser Konstellation eines nicht-linearen Gleichungssystems mit Summenbildung die Ermittlung einer allgemeinen Bestimmungsgleichung für λ nicht ohne weiteres möglich ist, erfolgt die Berechnung mittels WOLFRAM MATHEMATICA und der Funktion „NSolve“.

Doch wie bereits eingangs des Kapitels erwähnt, stellt diese Losgrößenpolitik nur in den seltensten Fällen und unter sehr restriktiven Voraussetzungen eine zulässige Lösung im Sinne eines überschneidungsfreien, zyklischen Maschinenbelegungsplans dar: „Suppose that we have faithfully computed the optimal quantity for each of the products that have to be produced; do these figures constitute a final satisfactory and workable answer to our batch production problem? It appears that our problems now only begin.“¹²¹

2.3.2 Das Common Cycle Modell als obere Kostenschranke

Das *Common Cycle Modell (CCM)* stellt einen einfachen – wenn auch sehr restriktiven¹²² – Ansatz zur Lösung des ELSP dar. Das Modell wird in der Literatur meist zurückgeführt auf HANSSMANN (1962)¹²³, der die Prämissen und Eigenschaften des Modells konkret beschreibt. Zur gleichen Zeit sind jedoch auch Publikationen von EILON¹²⁴ und MÜLLER-MERBACH¹²⁵ erschienen, die sich ebenfalls mit der grundlegenden Idee eines gemeinsamen Produkt- bzw. Verbrauchszyklus („common cycle“) auseinandersetzen. MÜLLER-MERBACH weist dabei darauf hin, dass die grundlegende Idee des CCM bereits 1958 von MAGEE¹²⁶ formal und mathematisch beschrieben wurde.

Ebenso wie bei der IS kann auch hier bei differenzierter Betrachtung nicht wirklich von einer „Lösung“ des originären ELSP gesprochen werden. Vielmehr wird durch die Prämisse eines für alle Produkte gleichen Verbrauchszeitraums ($t_{v,i} = t_v$) das kombinatorische Teilproblem des ELSP (vgl. Abbildung 4) entschärft, so dass die Reihenfolgebildung für die Lösung des Problems irrelevant wird.¹²⁷ Die Komplexität ist dadurch erheblich reduziert und das Problem nicht mehr NP-schwer, sondern mit einfachen, mathematischen Methoden optimal zu lösen. Das CCM zählt daher zu den analytischen Ansätzen.¹²⁸

¹²¹ EILON, S., 1962, S. 367.

¹²² Erläuterungen hierzu folgen im Anschluss.

¹²³ Vgl. HANSSMANN, F., 1962, S. 158 ff.

¹²⁴ Vgl. EILON, S., 1962, S. 369 ff.

¹²⁵ Vgl. MÜLLER-MERBACH, H., 1962, S. 31 ff.

¹²⁶ Vgl. MAGEE, J. F., 1958, S. 310 ff.

¹²⁷ Vgl. HANSSMANN, F., 1962, S. 160.

¹²⁸ Vgl. Kapitel 2.2.3.

Die Lösungsqualität hingegen ist stark abhängig von der Homogenität spezifischer Produktparameter¹²⁹. Die Frage, unter welchen Voraussetzungen das CCM gute Lösungen liefert, analysieren und beantworten bspw. JONES/INMAN¹³⁰ oder HOCKSTRA¹³¹. CARSTENSEN zieht zur Beurteilung der Lösungsgüte des CCM die individuell-optimalen Produktzyklen der IS heran. Je größer deren maximale Abweichung („Spannweite“) ist, desto höher fällt die Kostensteigerung im CCM aus.¹³²

Wegen der restriktiven Einschränkung auf einen für alle Sorten gemeinsamen Produktzyklus geht die Common-Cycle-Lösung im Allgemeinen mit Kostenwerten einher, die weit über denen der IS liegen. Daher wird das CCM regelmäßig als einfach zu ermittelnde, obere Kostenschranke für das ELSP herangezogen. Den Ausgangspunkt hierfür bildet die Kostenfunktion (2–1) bei der nun jedoch die Gleichheit aller Produktzyklen wie folgt berücksichtigt wird:

$$t_{v,1} = t_{v,2} = \dots = t_{v,i} := t_v$$

Somit ergibt sich:¹³³

$$K(t_v) = t_v \cdot \sum_{i=1}^I \underbrace{\frac{1}{2} \cdot c_{L,i} \cdot x_{v,i} \cdot \left(1 - \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}\right)}_{h_i^0} + \frac{1}{t_v} \cdot \sum_{i=1}^I k_{R,i} \quad (2-8)$$

Durch Differenzieren und Nullsetzen folgt für den kostenminimierenden, gemeinsamen Produktzyklus:

$$t_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^I k_{R,i}}{\sum_{i=1}^I h_i^0}} \quad (2-9)$$

Dabei ist sicherzustellen, dass dieses Zeitintervall ausreichend groß ist, um die Rüst- und Produktionsvorgänge aller Sorten exakt einmal durchführen zu können:¹³⁴

¹²⁹ Im Wesentlichen ist die produktspezifische Relation von Rüst- und Lagerhaltungskosten ausschlaggebend (vgl. bspw. JONES, P. C.; INMAN, R. R., 1989, S. 15).

¹³⁰ Vgl. JONES, P. C.; INMAN, R. R., 1989.

¹³¹ Vgl. HOCKSTRA, D. J., 1997.

¹³² Vgl. CARSTENSEN, P., 2002, S. 32 f.

¹³³ Vgl. HANSSMANN, F., 1962, S. 159 f. bzw. MAYR, M., 1996, S. 43.

¹³⁴ Vgl. MAXWELL, W. L., 1964, S. 92 bzw. MAYR, M., 1996, S. 43.

$$t_v \geq \sum_{i=1}^I t_{p,i} + t_{R,i} \Rightarrow t_v \geq \sum_{i=1}^I \frac{x_{v,i} \cdot t_v}{x_{p,i}} + \sum_{i=1}^I t_{R,i} \Rightarrow t_v \geq \frac{\sum_{i=1}^I t_{R,i}}{1 - \sum_{i=1}^I \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}}$$

Äquivalent dazu ist die Bedingung einer Bruttoauslastung von 100% oder weniger:

$$\underbrace{\sum_{i=1}^I \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}}_{\text{Nettoauslastung}} + \frac{1}{t_v} \cdot \underbrace{\sum_{i=1}^I t_{R,i}}_{\text{Rüstzeitanteil}} \leq 1$$

Unter Berücksichtigung dieser Nebenbedingung ergibt sich somit die optimale, für alle Produkte identische Zykluszeit:¹³⁵

$$t_v = \max \left\{ \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^I k_{R,i}}{\sum_{i=1}^I h_i^0}} ; \frac{\sum_{i=1}^I t_{R,i}}{1 - \sum_{i=1}^I \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}} \right\} \quad (2-10)$$

Sofern also eine Konstellation von Produktparametern vorliegt, die grundsätzlich eine Lösung des Problems ermöglicht (Nettoauslastung < 100%), kann durch entsprechendes Ausdehnen des Common Cycle in jedem Falle ein überschneidungsfreier Maschinenbelegungsplan generiert werden.¹³⁶ Die hierfür relevanten Produktions- bzw. Belegungszeiten der einzelnen Produkte sowie die korrespondierenden Fertigungslosgrößen x_i lassen sich wiederum in Abhängigkeit von der Zykluszeit bestimmen:

$$t_{B,i}(t_v) = \underbrace{t_v \cdot \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}}_{t_{p,i}} + t_{R,i} \quad ; \quad x_i(t_v) = t_v \cdot x_{v,i}$$

Durch die IS als untere und das CCM als oberer Schranke ist somit ein Kostenintervall gegeben, dass zur Beurteilung der Qualität verschiedener Lösungsansätze zum ELSP und deren Eignung bei der Anwendung auf spezifische Datensätze herangezogen werden soll.

¹³⁵ Vgl. MAXWELL, W. L., 1964, S. 92 bzw. MAYR, M., 1996, S. 44.

¹³⁶ Vgl. HANSSMANN, F., 1962, S. 159 f.

2.3.3 Der Basisperiodenansatz

Während beim CCM jedes Produkt innerhalb der Zykluszeit genau einmal gefertigt wird, sind beim *Basisperiodenansatz* („*basic period approach*“, *BPA*) produktindividuelle Auflagehäufigkeiten möglich. Die grundlegende Idee besteht darin, die Gesamtzykluszeit in mehrere, gleich lange Abschnitte (*Basisperioden*, *BP*) einzuteilen und zu entscheiden, welche Produkte in welcher BP gefertigt werden.¹³⁷ Anders ausgedrückt ergeben sich die einzelnen Zykluszeiten $t_{v,i}$ als Produkt aus einem sortenspezifischen Multiplikator m_i und der gemeinsamen BP:¹³⁸

$$t_{v,i} := m_i \cdot BP \quad (2-11)$$

Ein Multiplikator von eins würde demnach bedeuten, dass das zugehörige Produkt in jeder BP gefertigt wird, ein Multiplikator von zwei wäre mit der Auflage des Produkts in jeder zweiten BP gleichzusetzen, etc. pp. Bereits in den ersten Modellen nach dem BPA wird vereinfachend unterstellt, dass die Multiplikatoren ausschließlich ganzzahlige Werte größer oder gleich eins annehmen dürfen.¹³⁹ BOCTOR erbringt 1982 den Beweis, dass dies eine notwendige Bedingung für eine kostenminimierende Lösung nach dem BPA ist.¹⁴⁰ Durch die sortenspezifischen Multiplikatoren und der daraus resultierenden Möglichkeit unterschiedlicher Produktzyklen, kann zwar zum einen eine Annäherung an die optimalen Verbrauchszeiten der IS erfolgen, zum anderen rückt aber gleichzeitig das Problem der Festlegung der Auflagezeitpunkte und der Produktreihenfolge wiederum in den Vordergrund. Unter diesen Umständen ist die Ermittlung eines zulässigen und kostenminimierenden Maschinenbelegungsplans wiederum generell NP-schwer.¹⁴¹ Mit der Lösung dieses Problems auf Grundlage des BPA beschäftigen sich zahlreiche Publikationen.¹⁴² Je nachdem, ob und welche weiteren, einschränkenden Annahmen getroffen werden, sind die Verfahren analytischer oder heuristischer Natur. Einen umfassenden Überblick über

¹³⁷ Ergänzend sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass bei der Lösung des ELSP nach dem BPA die Prämisse einer kontinuierlichen Zeitbetrachtung nicht strikt beibehalten wird. Die Einteilung des Planungszeitraums in diskrete Zeitabschnitte (Basisperioden) stellt eine gewisse Parallelität zu den Makro- bzw. Mikroperioden der dynamischen Modelle dar (vgl. Kapitel 2.2.2), da auch dort innerhalb eines Zeitabschnitts in der Regel eine konstante Nachfrage unterstellt wird (vgl. HAHM, J.; YANO, C. A., 1991, S. 5).

¹³⁸ Vgl. CARSTENSEN, P., 1999, S. 435.

¹³⁹ Vgl. DOLL, C. L.; WHYBARK, D. C., 1973, S. 51.

¹⁴⁰ Vgl. BOCTOR, F. F., 1982 sowie einen diesbezüglichen Kommentar mit ergänzenden Korrekturen von SHAOXIANG, C., 1993.

¹⁴¹ Vgl. CARSTENSEN, P., 1999, S. 435.

¹⁴² Vgl. auch Abbildung 6.

die grundlegenden BP-Modelle liefert ELMAGHRABY in einem Review.¹⁴³ Da der BPA zentraler Bestandteil der vorliegenden Arbeit ist, sollen dessen wesentliche Entwicklungsstufen im Folgenden noch einmal in aggregierter Form erläutert und einander vergleichend gegenüber gestellt werden.

2.3.3.1 BOMBERGER (1966)

BOMBERGER veröffentlicht 1966 einen Ansatz zur Lösung des ELSP, bei dem erstmals vorausgesetzt wird, dass die individuellen Verbrauchszyklen der Produkte ganzzahlige Vielfache einer gemeinsamen BP („fundamental cycle“) sein sollen.¹⁴⁴ Die Bestimmung der Multiplikatoren erfolgt zunächst mittels eines Verfahrens der Dynamischen Programmierung. Die BP wird hingegen durch Probieren („trial and error“) und Runden geeignet angepasst.¹⁴⁵ Als Kriterium wird hierbei die allen Verfahren nach dem BPA zugrunde liegende Funktion der Kosten je Zeiteinheit herangezogen. Diese ergibt sich aus (2–1) unter Berücksichtigung von (2–11):¹⁴⁶

$$K(\text{BP}, m_i) = \text{BP} \cdot \sum_{i=1}^I \underbrace{\frac{1}{2} \cdot c_{L,i} \cdot x_{v,i} \cdot \left(1 - \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}\right)}_{h_i^0} \cdot m_i + \frac{1}{\text{BP}} \cdot \sum_{i=1}^I \frac{k_{R,i}}{m_i} \quad (2-12)$$

Ein weiteres, zentrales Merkmal dieses Ansatzes ist die Prämisse, dass in der ersten BP eines Gesamtzyklus alle Produkte einmal gefertigt werden müssen. Das heißt die BP muss mindestens so lang sein, dass sie die Summe der Rüst- und Produktionszeiten einer Losauflage jeder Sorte umfasst:¹⁴⁷

$$\text{BP} \geq \sum_{i=1}^I (t_{p,i} + t_{R,i}) \Rightarrow \text{BP} \geq \frac{\sum_{i=1}^I t_{R,i}}{1 - \sum_{i=1}^I m_i \cdot \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}} \quad (2-13)$$

Da aber alle BP die gleiche Länge haben, ist somit in jeder BP ein Zeitfenster für die Auflage jedes Produkts reserviert – ob es nun in Anspruch genommen wird oder nicht.

¹⁴³ Vgl. ELMAGHRABY, S. E., 1978b.

¹⁴⁴ Vgl. BOMBERGER, E. E., 1966.

¹⁴⁵ Vgl. BOMBERGER, E. E., 1966, S. 782 f.

¹⁴⁶ Vgl. BOMBERGER, E. E., 1966, S. 781.

¹⁴⁷ Vgl. BOMBERGER, E. E., 1966, S. 781; Zur Umformung der Nebenbedingung vgl. Anlage A.

Diese Restriktion bezüglich der Mindestlänge der BP hat demnach zur Folge, dass das Auflagezeitpunkt- und Reihenfolgeproblem wiederum entschärft wird.¹⁴⁸ Der Ansatz von BOMBERGER zählt daher zu den analytischen Verfahren,¹⁴⁹ auch wenn die Lösungsfindung hier teilweise noch durch „trial and error“ erfolgt. BOMBERGER führt zudem einen Beispieldatensatz mit zehn Produkten ein, der seitdem von vielen Autoren zur Beurteilung der Lösungsqualität eines Verfahrens herangezogen wird.¹⁵⁰

2.3.3.2 DOLL/WHYBARK (1973)

DOLL/WHYBARK entwickeln 1973 eine Methode zur direkten Ermittlung der kostenoptimalen BP und Multiplikatoren.¹⁵¹ Allerdings besteht bei diesem Ansatz keine zusätzlich einschränkende Annahme hinsichtlich der Aufteilung der Produkte auf die BP. Es wird also nicht (wie bei BOMBERGER) davon ausgegangen, dass alle Produkte in der ersten BP einmal aufgelegt werden müssen, woraus grundsätzlich die Möglichkeit einer gleichmäßigeren Auslastung der BP resultiert. Als vorläufiger Startwert für die BP wird das Minimum der individuellen Verbrauchszeiten der IS ($t_{v,i}$ nach (2–2)) herangezogen:¹⁵²

$$\text{Schritt 1: } BP = \min\{t_{v,i}\}$$

Die Multiplikatoren werden nun ermittelt, indem die ganzzahligen Nachbarn der Quotienten aus den Verbrauchszeiten der IS und dem Startwert der BP produktindividuell einem Kostenvergleich unterzogen werden:¹⁵³

$$\text{Schritt 2: } \text{ Falls } K_i\left(BP, \left\lfloor \frac{t_{v,i}}{BP} \right\rfloor\right) \leq K_i\left(BP, \left\lceil \frac{t_{v,i}}{BP} \right\rceil\right),$$

$$\text{ dann gilt } m_i = \left\lfloor \frac{t_{v,i}}{BP} \right\rfloor, \text{ sonst } m_i = \left\lceil \frac{t_{v,i}}{BP} \right\rceil$$

$$\text{ mit } K_i(BP, m_i) = BP \cdot m_i \cdot h_i^0 + \frac{k_{R,i}}{BP \cdot m_i}.$$

¹⁴⁸ Vgl. hierzu auch Abbildung 5.

¹⁴⁹ Vgl. ELMAGHRABY, S. E., 1978b, S. 589.

¹⁵⁰ Vgl. bspw. DOLL, C. L.; WHYBARK, D. C., 1973, S. 53 oder ELMAGHRABY, S. E., 1978b, S. 588 sowie zu den Parametern selbst BOMBERGER, E. E., 1966, S. 783.

¹⁵¹ Vgl. DOLL, C. L.; WHYBARK, D. C., 1973.

¹⁵² Vgl. DOLL, C. L.; WHYBARK, D. C., 1973, S. 52; Rüstzeiten finden hier generell keine Berücksichtigung.

¹⁵³ Vgl. DOLL, C. L.; WHYBARK, D. C., 1973, S. 52 f.

Im nächsten Schritt wird nun der vorläufige Startwert der BP aktualisiert, indem seine Länge an die ganzzahligen Multiplikatoren angepasst wird. Diese Neuberechnung erfolgt mittels einer Bestimmungsgleichung, die sich durch Differenzieren der Kostenfunktion (2–12) nach der BP sowie anschließendes Nullsetzen und Umstellen ergibt:¹⁵⁴

$$\text{Schritt 3: } \quad \text{BP}(m_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^I \frac{k_{R,i}}{m_i}}{\sum_{i=1}^I h_i^0 \cdot m_i}} \quad (2-14)$$

Danach springt das Verfahren zurück zu Schritt 2, wodurch überprüft werden soll, ob auf Grundlage der neuen Basisperiode durch eine Anpassung der Multiplikatoren wiederum eine weitere Kostensenkung erzielt werden kann. Der iterative Ablauf der Schritte 2 und 3 endet, sobald die Werte der Multiplikatoren in zwei aufeinander folgenden Iterationen unverändert bleiben.¹⁵⁵ Anschließend muss noch sichergestellt werden, dass die Produkte entsprechend ihrer Multiplikatoren überschneidungsfrei auf die BP aufgeteilt werden können. Da aber – wie bereits zuvor erläutert – keine, zum Ansatz von BOMBERGER vergleichbare, restringierende Annahme bezüglich der Reihenfolgebildung getroffen wird, rückt das kombinatorische Teilproblem des ELSP erneut verstärkt in den Vordergrund. Vielmehr kann somit nicht davon ausgegangen werden, dass dieses Verfahren stets zu einer unter den gegebenen Umständen optimalen Lösung führt. Gleichwohl besteht aufgrund des höheren Freiheitsgrades dieses heuristischen Ansatzes prinzipiell ein erhebliches Potential für Kosteneinsparungen.¹⁵⁶ Die bei BOMBERGER zu berücksichtigende Nebenbedingung für die Länge der BP (Formel (2–13)) ist hier insofern relaxiert, als dass sie nicht mehr zwangsläufig für eine Losauflage aller Produkte ($i \in \{1, 2, 3, \dots, I\}$) einzuhalten ist, sondern nur für die noch zu ermittelnde Produktkombination mit der größten Summe der Belegungszeiten:

$$\text{BP} \geq \max_{\text{BP}} \left\{ \sum_k (t_{p,k} + t_{R,k}) \right\} \Rightarrow \text{BP} \geq \max_{\text{BP}} \left\{ \frac{\sum_k t_{R,k}}{1 - \sum_k m_k \cdot \frac{x_{v,k}}{x_{p,k}}} \right\} \quad (2-15)$$

Hierbei steht $k \in \{1, 2, 3, \dots, I\}$ für die Indizes der Produkte, die gemeinsam in einer BP gefertigt werden bzw. im Maschinenbelegungsplan in einer BP aufeinandertreffen.

¹⁵⁴ Vgl. DOLL, C. L.; WHYBARK, D. C., 1973, S. 53 f.

¹⁵⁵ Vgl. DOLL, C. L.; WHYBARK, D. C., 1973, S. 54.

¹⁵⁶ Vgl. ELMAGHRABY, S. E., 1978b, S. 591 ff.

Demnach wird angestrebt, die Produkte entsprechend ihrer Multiplikatoren so zu verteilen und zu kombinieren, dass eine möglichst gleichmäßige Auslastung aller BP resultiert, wobei gegebenenfalls notwendige Abweichungen von den im oben beschriebenen, iterativen Verfahren ermittelten Werten derart in Grenzen gehalten werden sollen, als dass sie mit einer möglichst geringen Kostensteigerung (gemäß Formel (2–12)) einhergehen. Eine konkrete, allgemeine Strategie zur Anpassung der Multiplikatoren und/oder der BP für den Fall, dass kein zulässiger Maschinenbelegungsplan generiert werden kann, zeigen DOLL/WHYBARK allerdings nicht auf.¹⁵⁷ Zwar weisen sie darauf hin, dass es von großem Belang für das Auffinden guter Lösungen ist, beide Entscheidungsvariablen (m_i und BP) entsprechend zu modifizieren, geben selbst diesbezüglich aber nur vage Anhaltspunkte.¹⁵⁸ Im Vergleich zu bisherigen Vorgehensweisen, wie bspw. der bei STANKARD/GUPTA¹⁵⁹ beschriebenen, stellt dieser Algorithmus dennoch – zumindest hinsichtlich der strukturierten Ermittlung einer guten Ausgangslösung – eine erhebliche Verbesserung dar.¹⁶⁰

2.3.3.3 HAESSLER/HOGUE (1976)

HAESSLER/HOGUE¹⁶¹ greifen 1976 den Ansatz von DOLL/WHYBARK auf und führen ihn konsequent fort, indem sie einen Test zur Überprüfung der Zulässigkeit einer (m_i , BP)-Kombination aufzeigen und diesen entsprechend weiter entwickeln, so dass letztendlich eine allgemeine Strategie zur Auflösung der Konflikte bei Vorliegen eines nicht realisierbaren Maschinenbelegungsplans resultiert. In Anbetracht der Erkenntnisse von DOLL/WHYBARK, dass ungerade Multiplikatoren größer eins bei hoher Maschinenauslastung die Lösungsfindung erheblich erschweren, schränken HAESSLER/HOGUE deren Werte auf Zweierpotenzen ein.¹⁶² Diese sogenannte *2^x-Politik* („*power of two*“, *POT*) ist Grundlage für den anschließenden Lösungsalgorithmus und bringt folgende Konsequenzen mit sich:¹⁶³

¹⁵⁷ Vgl. ELMAGHRABY, S. E., 1978b, S. 593.

¹⁵⁸ Vgl. DOLL, C. L.; WHYBARK, D. C., 1973, S. 55.

¹⁵⁹ Vgl. STANKARD, M. F.; GUPTA, S. K., 1969.

¹⁶⁰ Vgl. ELMAGHRABY, S. E., 1978b, S. 593.

¹⁶¹ Vgl. HAESSLER, R. W.; HOGUE, S. L., 1976.

¹⁶² Vgl. HAESSLER, R. W.; HOGUE, S. L., 1976, S. 910.

¹⁶³ Vgl. CARSTENSEN, P., 2002, S. 40 f.

- Die Gesamtzykluslänge ist relativ kurz, da sie im Allgemeinen dem kleinsten gemeinsamen Vielfachen der Produktzyklen entspricht und somit bei Zweierpotenzmultiplikatoren identisch mit dem größten Produktzyklus ist.¹⁶⁴
- Die Menge relevanter Multiplikator kombinationen ist erheblich geringer.
- Die Auslastung der BP ist gleichmäßiger, so dass die Komplexität der Reihenfolgeplanung reduziert wird.¹⁶⁵
- Die maximale Kostenerhöhung gegenüber einer allgemeinen Basisperiodenpolitik (mit ganzzahligen Multiplikatoren) beträgt 6,1%.¹⁶⁶

Eine diesbezügliche Einschätzung hinsichtlich der Belange und der Umsetzbarkeit in der Praxis fällt ebenso positiv aus.¹⁶⁷ Die Einschränkung auf POT-Multiplikatoren ist nicht unbedingt BPA-spezifisch und findet aufgrund der überwiegenden Vorteile auch in späteren Ansätzen zur Lösung des ELSP Anwendung (vgl. Kapitel 2.3.4).¹⁶⁸ Hinsichtlich des Ursprungs der 2^x -Politik im Kontext des ELSP soll noch darauf hingewiesen werden, dass nahezu zeitgleich zu HAESSLER/HOGUE in einer Publikation von GOYAL¹⁶⁹ (1975) dieselbe Grundidee beschrieben wird.¹⁷⁰ Der auf POT-Multiplikatoren aufbauende Lösungsalgorithmus von HAESSLER/HOGUE wird im Folgenden in seinen Grundzügen dargestellt. Eine detaillierte Betrachtung und Erläuterung erfolgt im Rahmen der Erweiterung des Modells in Kapitel 4.4.

Schritt 1:

Den Ausgangspunkt bilden die Werte, die sich nach dem iterativen Verfahren von DOLL/WHYBARK ergeben, lediglich mit dem Unterschied, dass die Multiplikatoren nicht nur auf ganzzahlige, sondern auf POT-Werte gerundet werden. Des Weiteren wird noch geprüft, ob sich für die jeweilige (m_i, BP) -Kombination eine Bruttoauslastung kleiner 100% ergibt. Diese notwendige (aber nicht hinreichende)

¹⁶⁴ In anderen Worten: Der Wert des größten Multiplikators $\max\{m_i\}$ entspricht der Anzahl der BP eines Gesamtzyklus.

¹⁶⁵ Bei Multiplikatoren von bspw. $m_1=2$ und $m_2=3$ kommt es in jeder sechsten BP zu einer erhöhten Kapazitätsbeanspruchung, die bei $m_2=4$ vermieden werden könnte (Vgl. CARSTENSEN, P., 2002, S. 40).

¹⁶⁶ Vgl. ROUNDY, R., 1989.

¹⁶⁷ Vgl. MAXWELL, W. L.; SINGH, H., 1983.

¹⁶⁸ Vgl. NARRO LOPEZ, M. A.; KINGSMAN, B. G., 1991, S. 151.

¹⁶⁹ Vgl. GOYAL, S. K., 1975a.

¹⁷⁰ Vgl. GOYAL, S. K., 1997 und GOYAL, S. K., 2007.

Bedingung für die Zulässigkeit einer Lösung kann dann gegebenenfalls durch eine Erweiterung der Basisperiode sichergestellt werden:¹⁷¹

$$\underbrace{\sum_{i=1}^I \frac{t_{p,i} + t_{R,i}}{t_{v,i}}}_{\text{Bruttoauslastung}} \leq 1 \Rightarrow \text{BP} \geq \frac{\sum_{i=1}^I \frac{t_{R,i}}{m_i}}{1 - \sum_{i=1}^I \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}} \quad (2-16)$$

Schritt 2:

Auf Basis der in Schritt 1 ermittelten Werte wird nun versucht einen zulässigen Maschinenbelegungsplan zu generieren, indem die Produkte entsprechend ihrer Multiplikatoren der Reihe nach auf die $\max\{m_i\}$ BP verteilt werden. Dabei ist wiederum zu gewährleisten, dass Bedingung (2-15) eingehalten wird, die sicherstellt, dass die Summe der Belegungszeiten der in einer BP aufeinander treffenden Produkte die Länge der BP nicht übersteigt. Falls hieraus eine zulässige Lösung resultiert, so endet das Verfahren. Andernfalls folgt Schritt 3.¹⁷²

Schritt 3:

Die Länge der BP wird bei gleichbleibenden Multiplikatoren systematisch erweitert, bis sie Bedingung (2-15) genügt und ein zulässiger Maschinenbelegungsplan konstruiert werden kann.¹⁷³ Falls dies die erste zulässige (m_i, BP) -Kombination darstellt oder sie nach (2-12) zu geringeren Kosten als eventuell zuvor ermittelte Auflagemuster führt, so wird diese Lösung gespeichert.

Schritt 4:

An dieser Stelle beginnt nun ein strukturierter Prozess zur Suche nach einer Verbesserungsmöglichkeit der aktuell gespeicherten, bisher besten Lösung. Hierfür wird grundsätzlich die Halbierung jedes Multiplikators größer eins in Betracht gezogen. Die Auflagehäufigkeit welches Produkts dadurch letztendlich tatsächlich verdoppelt wird, soll anhand eines Kostenvergleichs beurteilt werden. Bei unveränderten Werten aller anderen Multiplikatoren wird nur der Multiplikator des

¹⁷¹ Vgl. HAESSLER, R. W.; HOGUE, S. L., 1976, S. 909; Zur Umformung der Nebenbedingung vgl. Anlage A.

¹⁷² Vgl. HAESSLER, R. W.; HOGUE, S. L., 1976, S. 910.

¹⁷³ Tatsächlich kann jedoch nicht für jede Multiplikatorkombination eine zulässige Lösung durch Ausdehnen der BP erreicht werden (vgl. hierzu auch Bedingung (4-47) auf Seite 100).

betreffenden Produkts, für das die Kostenveränderung berechnet werden soll, halbiert und die BP gemäß (2–14) entsprechend angepasst, ehe dann mittels (2–12) der neue, vorläufige Kostenwert¹⁷⁴ berechnet wird. Dieser spezielle „lower bound“¹⁷⁵ wird für alle betreffenden Produkte ermittelt, so dass schließlich der Multiplikator desjenigen Produkts tatsächlich halbiert wird, dessen „lower bound“ die größte Kosteneinsparung erwarten lässt. Falls der ausgewählte vorläufige Kostenwert über dem der aktuell gespeicherten Lösung liegt, so ist keine Verbesserung mehr möglich und das Verfahren endet. Andernfalls wird mit der neuen (m_i, BP) -Kombination bei Schritt 2 fortgefahren.¹⁷⁶

Das Verfahren endet spätestens dann, wenn alle Multiplikatoren den Wert eins angenommen haben. Diese Kombination – sowie prinzipiell jeder weitere Fall, bei dem sämtliche Produkte identische Multiplikatoren aufweisen – entspricht dem Ergebnis des CCM und repräsentiert somit stets eine realisierbare Lösung.¹⁷⁷ Auch wenn nicht garantiert werden kann, dass der beschriebene Algorithmus unter den genannten Voraussetzungen stets die optimale Lösung hervorbringt (und das Verfahren demnach zu den heuristischen Ansätzen zählt), so stellt er dennoch eine außerordentlich wichtige Entwicklungsstufe des BPA dar, da hier zum ersten Mal eine strukturierte, allgemein anwendbare Methode beschrieben wird, die in jedem Falle eine zulässige Lösung des Problems hervorbringt.¹⁷⁸ Kritisch anzumerken ist jedoch, dass die Vorgehensweise von HAESSLER/HOGUE nicht immer detailliert genug bzw. eindeutig beschrieben ist und somit Spielraum für Interpretationen bleibt. HAESSLER¹⁷⁹ trägt diesem Defizit größtenteils Rechnung, indem er 1979 in einer weiteren Publikation den obigen Algorithmus umfassender und ausführlicher beschreibt.¹⁸⁰ Dieser verbesserte Ansatz baut auf einem von ELMAGHRABY entwickelten, erweiterten BPA auf, der im Folgenden dargestellt werden soll.

¹⁷⁴ Der Kostenwert wird hier deshalb als vorläufig (oder „lower bound“) bezeichnet, da durch die Halbierung eines Multiplikators und die Anpassung der BP die Zulässigkeit der Lösung nicht mehr gewährleistet ist und eventuell notwendige Abweichungen zur Sicherstellung eines realisierbaren Maschinenbelegungsplans mit Kostensteigerungen verbunden sind.

¹⁷⁵ Vgl. HAESSLER, R. W.; HOGUE, S. L., 1976, S. 911.

¹⁷⁶ Vgl. HAESSLER, R. W.; HOGUE, S. L., 1976, S. 911.

¹⁷⁷ Vgl. HAESSLER, R. W.; HOGUE, S. L., 1976, S. 911.

¹⁷⁸ Vgl. NARRO LOPEZ, M. A.; KINGSMAN, B. G., 1991, S. 151.

¹⁷⁹ Vgl. HAESSLER, R. W., 1979.

¹⁸⁰ Hierbei wird insbesondere explizit darauf eingegangen, wie versucht werden sollte die einzelnen Produkte entsprechend ihrer Multiplikatoren auf die BP zu verteilen um einen zulässigen Maschinenbelegungsplan zu konstruieren (vgl. Kapitel 4.4).

2.3.3.4 ELMAGHRABY (1978)

In seinem Review zum ELSP präsentiert ELMAGHRABY 1978 zugleich einen *erweiterten BPA* („*extended basic period approach*“, *eBPA*).¹⁸¹ Dieser basiert im Wesentlichen auf dem Ansatz von BOMBERGER, unterscheidet sich von diesem jedoch in der Annahme zur Aufteilung der Produkte auf die BP. Während bei BOMBERGER alle Produkte einmal in der ersten BP gefertigt werden müssen, so relaxiert ELMAGHRABY diese Bedingung dahingehend, dass jedes Produkt innerhalb der ersten beiden BP (mindestens) einmal aufgelegt werden muss. Dementsprechend werden Produkte mit geraden Multiplikatoren entweder in der ersten oder der zweiten BP gefertigt, während Produkte mit ungeraden Multiplikatoren in den ersten beiden BP aufgelegt werden.¹⁸² Folgt man dieser Regel, so würde ein Produkt mit einem ungeraden Multiplikator größer eins gegen die „zero-inventory“-Bedingung¹⁸³ verstoßen, da bspw. $m_i = 3$ einer Verbrauchszeit von drei BP entspricht und somit im Falle der Produktion in zwei aufeinander folgenden BP das erste Fertigungslos noch nicht vollständig verbraucht wäre. Alternativ hierzu könnte man für Produkte mit ungeradem Multiplikator in einer der beiden ersten BP lediglich eine Leerzeit einplanen. Bei ELMAGHRABY wird dieser Sachverhalt nicht diskutiert, vor allem wohl auch aus dem Grund, dass ungerade Multiplikatoren größer eins die Reihenfolgebildung im Allgemeinen erheblich erschweren und damit in der Regel ohnehin zu weniger guten Lösungen führen.¹⁸⁴ Bei Anwendung des eBPA auf BOMBERGERS 10-Produkt-Zahlenbeispiel ergeben sich bei ELMAGHRABY letztendlich sogar POT-Multiplikatoren und eine Kostenersparnis von ca. 7%.¹⁸⁵

Aufgrund der gelockerten Restriktion hinsichtlich der Mindestlänge der BP dominiert der eBPA den BPA nach BOMBERGER.¹⁸⁶ Zudem bleibt infolge dieser Prämisse das kombinatorische Teilproblem des ELSP auf die Verteilung aller Produkte innerhalb der ersten beiden BP beschränkt. Dadurch ist es möglich die unter diesen Voraussetzungen optimale Lösung des Problems auf analytischem Weg zu ermitteln.

¹⁸¹ Vgl. ELMAGHRABY, S. E., 1978b.

¹⁸² Vgl. ELMAGHRABY, S. E., 1978b, S. 590.

¹⁸³ Vgl. Kapitel 2.2.1.

¹⁸⁴ Vgl. HAESSLER, R. W.; HOGUE, S. L., 1976, S. 910.

¹⁸⁵ Vgl. ELMAGHRABY, S. E., 1978b, S. 590; Kosten: BPA: 9013; eBPA: 8383; $\frac{9013-8383}{9013} = 0,069899$.

¹⁸⁶ Vgl. ELMAGHRABY, S. E., 1978b, S. 590.

2.3.3.5 Zusammenfassung und Vergleich

Die wesentlichen Entwicklungsstufen des BPA mit ihren jeweiligen Eigenschaften sind noch einmal in folgender Tabelle zusammengefasst:

Eigenschaft Publikation	zentrale Prämisse(n)	Lösungs- verfahren	relative Lösungsgüte ¹⁸⁷
BOMBERGER (1966)	eine Losauflage aller Produkte in der ersten BP	exakt- analytisch	+
HAESSLER/HOGUE (1976) bzw. HAESSLER (1979)	Losauflagen können über alle BP verteilt werden; 2 ^x -Politik	heuristisch	+++
ELMAGHRABY (1978)	eine Losauflage aller Produkte in den ersten beiden BP	exakt- analytisch	++

Tabelle 2: Wesentliche Entwicklungsstufen des BPA

Die Auswirkungen der unterschiedlichen Prämissen dieser Ansätze zur Aufteilung der Produkte auf die BP sollen anhand eines ausgewählten Zahlenbeispiels verdeutlicht und durch einen Vergleich der resultierenden Maschinenbelegungspläne veranschaulicht werden. Die zugrunde liegenden Parameter sind in folgender Tabelle festgehalten:

Produkt i	x_{p,i}	x_{v,i}	c_{L,i}	k_{R,i}	t_{R,i}
1	400	200	1	1000	1
2	100	4	2,5	1500	1
3	100	1	1,5	1000	1
4	200	2	2	2000	1

Tabelle 3: Zahlenbeispiel zum Vergleich der Entwicklungsstufen des BPA

Als Referenz werden die Kostenwerte der IS als untere und die des CCM als obere Schranke herangezogen. Um die Lösungen der weiteren Ansätze sinnvoll miteinander vergleichen zu können, werden für die Berechnung identische, konstante POT-Multiplikatoren ($m_1 = 1$; $m_2 = 2$; $m_3 = 4$; $m_4 = 4$;) verwendet.¹⁸⁸ Diese Vorgehensweise und spätere graphische Gegenüberstellung erfolgt in Anlehnung an PHILIPOOM/REES/TAYLOR¹⁸⁹. Dort wird jedoch vereinfachend davon ausgegangen, dass die Belegungs-

¹⁸⁷ Vgl. ELMAGHRABY, S. E., 1978b, S. 594.

¹⁸⁸ Diese Multiplikatorkombination stellt nicht für alle Ansätze die kostengünstigste Lösung dar.

¹⁸⁹ Vgl. PHILIPOOM, P. R.; REES, L. P.; TAYLOR, B. W., 1989, S. 797 f.

bzw. Produktionszeiten der Sorten unabhängig sind von der Länge der BP. Da dies aber offensichtlich nicht zutreffend ist, wird diesem Defizit durch die hier gewählten, exemplarischen Parameter Rechnung getragen. Zudem soll die graphische Darstellung der Maschinenbelegungspläne um das CCM ergänzt werden. Die wesentlichen numerischen Ergebnisse des Zahlenbeispiels sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Die im jeweiligen Ansatz kostengünstigste, realisierbare Basisperiodenlänge ist durch Unterstreichung hervorgehoben. Die einzelnen Produktzyklen ergeben sich entsprechend (2–11) bzw. für die IS nach (2–6), wobei λ in diesem Fall den Wert null annimmt, da die Bruttoauslastung (nach (2–4)) mit 0,8989 nicht über 100% liegt. Die angegebenen Kosten je Zeiteinheit lassen sich gemäß (2–12) bzw. für die IS nach (2–1) ermitteln.

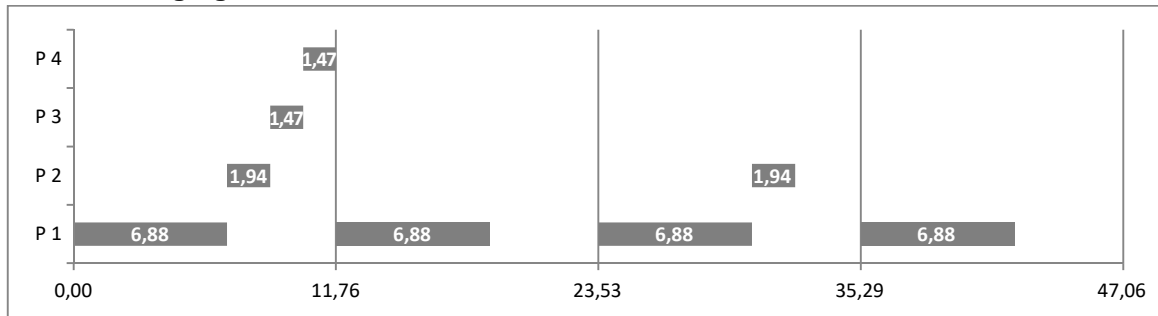
	CCM	BPA	eBPA	HAESSLER	IS
$(\mathbf{m}_1 \mathbf{m}_2 \mathbf{m}_3 \mathbf{m}_4)$	$(1 1 1 1)$	$(1 2 4 4)$	$(1 2 4 4)$	$(1 2 4 4)$	-
\mathbf{BP}_{opt} nach (2–14)	<u>9,7783</u>	5,9553	5,9553	<u>5,9553</u>	-
\mathbf{BP}_{min} nach (2–15)	9,0909	<u>11,7647</u>	<u>7,1429</u>	4,7619	-
$\mathbf{t}_{v,1}$	9,7783	11,7647	7,1429	5,9553	4,47
$\mathbf{t}_{v,2}$	9,7783	23,5294	14,2857	11,9107	17,68
$\mathbf{t}_{v,3}$	9,7783	47,0588	28,5714	23,8213	36,70
$\mathbf{t}_{v,4}$	9,7783	47,0588	28,5714	23,8213	31,78
Kosten	1124,94	1041,79	853,50	839,58	797,27

Tabelle 4: Ergebnisse des Zahlenbeispiels zum Vergleich der Entwicklungsstufen des BPA

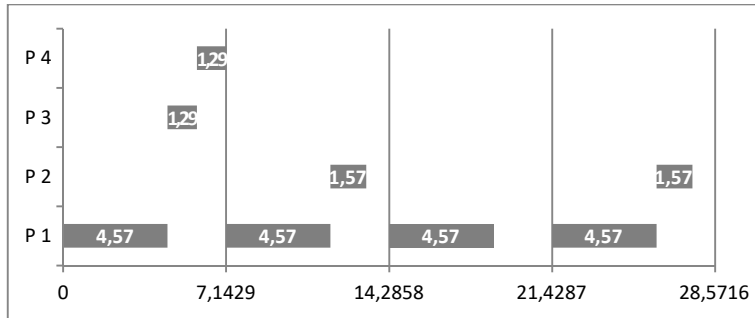
Die optimale Basisperiodenlänge (\mathbf{BP}_{opt}) ist für die drei BPA identisch, kann im vorliegenden Fall allerdings nur bei HAESSLER realisiert werden. Die verschiedenen Mindestlängen für die BP (\mathbf{BP}_{min}) resultieren aus den unterschiedlichen Kombinationen der Produkte, die innerhalb einer BP aufeinandertreffen, was wiederum durch die abweichenden Prämissen¹⁹⁰ der Modelle begründet ist. Trotz der konstant gehaltenen und dadurch nicht für alle Verfahren optimalen Multiplikatoren geben die Kostenwerte die im Allgemeinen zu erwartende Rangfolge der relativen Lösungsgüte wieder. Abbildung 5 bietet einen anschaulichen Vergleich der resultierenden Maschinenbelegungspläne.

¹⁹⁰ Vgl. Tabelle 2.

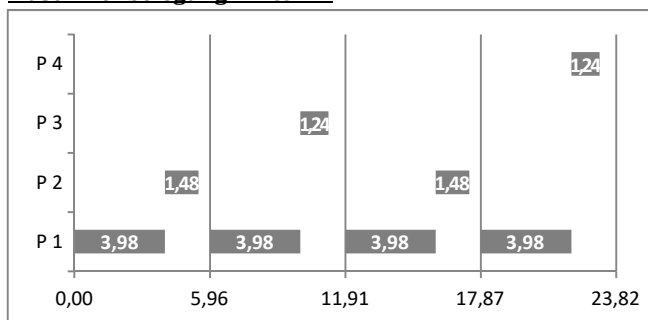
Maschinenbelegung BPA:



Maschinenbelegung eBPA:



Maschinenbelegung HAESSLER:



Maschinenbelegung CCM:

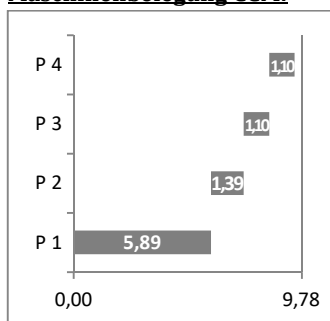


Abbildung 5: Maschinenbelegungspläne zum Vergleich der Entwicklungsstufen des BPA

Hierbei wird unter anderem deutlich, in welchem Umfang Leerzeiten bei den einzelnen Ansätzen auftreten. In Relation sind diese bei HAESSLER zwar vergleichsweise gering, aber dennoch Abbild gewisser Ineffizienzen, die wiederum einen Anhaltspunkt zur Weiterentwicklung optimierter Lösungsverfahren darstellen. Das im folgenden Kapitel vorgestellte Modell variierender Losgrößen setzt an diesem Punkt an.

2.3.4 Der Ansatz variierender Losgrößen

Basierend auf den Arbeiten von MAXWELL¹⁹¹ und DELPORTE/THOMAS¹⁹² entwickelt DOBSON¹⁹³ 1987 einen Ansatz zur Lösung des ELSP der – abweichend von der „equal-lotsize-rule“¹⁹⁴ – bei mehrfacher Auflage eines Produkts innerhalb des Gesamtzyklus unterschiedliche Losgrößen („*time-varying lot sizes*“, *TVL*) erlaubt. Der TVL-Ansatz bringt grundsätzlich zwei entscheidende Vorteile mit sich:¹⁹⁵

- Falls zu einer beliebigen Kombination von Auflagehäufigkeiten und Produktreihenfolge ein zulässiger Maschinenbelegungsplan existiert, so kann dieser durch Variieren der Fertigungslosgrößen und der Leerzeiten realisiert werden.
- Die Auslastung der Produktionsanlage erfolgt im Allgemeinen gleichmäßiger, woraus wiederum Kostenvorteile resultieren können.

Mit dem höheren Freiheitsgrad des Modells geht allerdings auch ein Anstieg des Lösungsaufwands einher. Auf diese erweiterte Problemkomplexität wird im Rahmen der Erläuterung der einzelnen Verfahrensschritte näher eingegangen. DOBSONs Heuristik zur Lösung des ELSP kann in drei Stufen¹⁹⁶ eingeteilt werden:

Stufe 1: Ermitteln der Auflagehäufigkeiten und der Gesamtzykluslänge

Die Vorgehensweise basiert auf den Optimalwerten der IS. Falls die Bruttoauslastung 100% übersteigt (vgl. (2–4)), berücksichtigt Dobson explizit den Einfluss der Rüstzeiten, so dass sich die isoliert-optimalen Produktzyklen nach (2–6) ergeben.¹⁹⁷ Deren reziproke Werte stellen die relativen Auflagehäufigkeiten (je Zeiteinheit) $n_{i,rel}$ der einzelnen Sorten dar:¹⁹⁸

$$n_{i,rel} = \frac{1}{t_{v,i}^*} \quad \text{mit} \quad t_{v,i}^* = \sqrt{\frac{k_{R,i} + \lambda \cdot t_{R,i}}{h_i^o}}$$

¹⁹¹ Vgl. MAXWELL, W. L., 1964.

¹⁹² Vgl. DELPORTE, C. M.; THOMAS, L. J., 1977.

¹⁹³ Vgl. DOBSON, G., 1987.

¹⁹⁴ Vgl. Kapitel 2.2.1.

¹⁹⁵ Vgl. DOBSON, G., 1987, S. 764.

¹⁹⁶ Vgl. CARSTENSEN, P., 2002, S. 45 und MAYR, M., 1996, S. 61 f.

¹⁹⁷ Vgl. DOBSON, G., 1987, S. 766 und MAYR, M., 1996, S. 62.

¹⁹⁸ Vgl. DOBSON, G., 1987, S. 767.

Werden diese mit einer vorzugebenden Gesamtzykluszeit T_{zyk} multipliziert, so ergeben sich daraus die produktindividuellen Auflagehäufigkeiten n_i je Gesamtzyklus:¹⁹⁹

$$n_i = n_{i,rel} \cdot T_{zyk} = \frac{T_{zyk}}{t_{v,i}^*} \quad (2-17)$$

DOBSON schränkt diese – in Anbetracht der bereits erläuterten Vorteile²⁰⁰ – auf 2^x -Werte ein.²⁰¹ Konkrete Aussagen zur Abschätzung der POT-Auflagehäufigkeiten sowie einer geeigneten Länge für T_{zyk} werden hierbei nicht getroffen. Ein guter Näherungswert für die optimale Gesamtzykluslänge müsste allerdings prinzipiell im Bereich der größten Produktzykluslänge der IS liegen.²⁰² Basierend auf der Prämisse einer 2^x -Politik (und der damit maximal verbundenen Kostenabweichung) stellt CARSTENSEN dementsprechend das folgende Intervall für T_{zyk} sowie die anschließende Rundungsregel für n_i auf:²⁰³

$$T_{zyk} \in \left[\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \max\{t_{v,i}^*\}; \sqrt{2} \cdot \max\{t_{v,i}^*\} \right] \quad (2-18)$$

Falls $T_{zyk} \leq \sqrt{2} \cdot [n_i]$, dann runde auf $n_i = [n_i]$,

sonst auf $n_i = [n_i]$ mit $[n_i]$, $[n_i] \in \{1, 2, 4, 8, \dots\}$.

Stufe 2: Reihenfolgebildung für T_{zyk} mit den 2^x -Auflagehäufigkeiten aus Stufe 1

Hierfür wird die Gesamtzykluszeit vorübergehend in $\max\{n_i\}$ gleichlange Perioden unterteilt. Anschließend wird versucht die Produkte entsprechend ihrer Auflagehäufigkeiten und Belegungszeiten weitestgehend gleichmäßig auf die einzelnen Abschnitte zu verteilen, um so die maximale Kapazitätsauslastung der Maschine über alle Perioden möglichst gering zu halten.²⁰⁴ Das Verfahren unterscheidet sich bis hierhin konzeptionell nicht

¹⁹⁹ Vgl. CARSTENSEN, P., 2002, S. 47.

²⁰⁰ Vergleiche Kapitel 2.3.3.

²⁰¹ Vgl. DOBSON, G., 1987, S. 768.

²⁰² Vgl. CARSTENSEN, P., 2002, S. 48. Da hier der mögliche Fall einer Bruttoauslastung größer 100% bereits durch (2–6) berücksichtigt wird, ist die diesbezüglich bei CARSTENSEN genannte Einschränkung obsolet.

²⁰³ Vgl. CARSTENSEN, P., 2002, S. 48 bzw. S. 41 ff. Alternativ kann das Runden der nach (2–17) ermittelten n_i -Werte auf benachbarte POT-Auflagehäufigkeiten auch durch einen direkten Kostenvergleich erfolgen: Produktindividuelle Kostenfunktion: $K_i(T_{zyk}, n_i) = \frac{T_{zyk}}{n_i} \cdot h_i^o + \frac{n_i}{T_{zyk}} \cdot k_{R,i}$; Vgl. Schritt 2 des

Verfahrens von DOLL/WHYBARK (Kapitel 2.3.3) mit $BP \cdot m_i = t_{v,i} = \frac{T_{zyk}}{n_i}$. Das Verfahren wird in Kapitel 4.5 konkret beschrieben. Alternativ sei an dieser Stelle auch auf die Ausführungen von DOBSON, G., 1987, S. 768 verwiesen.

²⁰⁴ Vgl. MAYR, M., 1996, S. 65.

wesentlich von der Vorgehensweise beim BPA nach HAESSLER/HOGUE bzw. HAESSLER (vgl. Kapitel 2.3.3). Allerdings „...“ bedeutet die Nichteinhaltung der Kapazitätsrestriktion .. eines Abschnitts nicht die Unzulässigkeit der Reihenfolge, sondern gibt lediglich einen Hinweis auf variierende Losgrößen von mindestens einem Produkt in der Lösung der Stufe 3.“²⁰⁵

Stufe 3: Ermittlung kostenoptimaler Fertigungslosgrößen und Leerzeiten

Die Betrachtung der Gesamtzykluszeit als in äquidistante Abschnitte eingeteilte (Basis-) Perioden wird nun wieder verworfen. Zwischen den Fertigungslosgrößen bzw. den Losreichweiten $t_{v,i}$ der einzelnen Produkte besteht daher kein Zusammenhang über eine Kombination aus gemeinsamer BP und produktindividueller Auflagehäufigkeit. Das gilt insbesondere auch für den Fall mehrerer Losauflagen ein und desselben Produkts innerhalb der Gesamtzykluszeit. Dieser Sachverhalt spiegelt den Kern des Ansatzes variierender Losgrößen wider und erfordert zusätzlich zur produktbezogenen eine positionsabhängige Differenzierung der Fertigungsaufträge. Im Folgenden bezeichnet daher j die Position eines Fertigungsauftrags im Gesamtzyklus, wobei $j \in \{1, 2, 3, \dots, \sum_{i=1}^I n_i\}$ gilt. Da die Reihenfolge in Stufe 2 fixiert wurde, ist somit bereits jeder Position j exakt ein Produkt i zugeordnet, so dass auf eine doppelte Indizierung verzichtet werden kann. Die zu minimierende Kostenfunktion lässt sich daher in Abhängigkeit von der Gesamtzykluszeit T_{zyk} und den positionsspezifischen Produktionszeiten $t_{p,i}$ wie folgt formulieren:²⁰⁶

$$K(T_{zyk}, t_{p,j}) = \frac{1}{T_{zyk}} \cdot \left[\sum_{j=1}^J \frac{1}{2} \cdot c_{L,j} \cdot (x_{p,j} - x_{v,j}) \cdot \frac{x_{p,j}}{x_{v,j}} \cdot t_{p,j}^2 + \sum_{j=1}^J k_{R,j} \right] \quad (2-19)$$

Hierbei wird ersichtlich, dass der Lagerhaltungskostenterm nunmehr vom Quadrat der positionsabhängigen Produktionszeiten bestimmt ist.²⁰⁷ In Anlehnung an die Formulierungen der Kostenfunktionen vorheriger Modelle kann (2-19) auch folgendermaßen dargestellt werden:

²⁰⁵ CARSTENSEN, P., 2002, S. 48.

²⁰⁶ Vgl. CARSTENSEN, P., 2002, S. 46 bzw. zur expliziten Herleitung siehe Anlage A.

²⁰⁷ Vgl. CARSTENSEN, P., 2002, S. 47.

$$K(T_{\text{zyk}}, t_{p,j}) = \frac{1}{T_{\text{zyk}}} \cdot \left[\sum_{j=1}^J \frac{1}{2} \cdot c_{L,j} \cdot x_{v,j} \cdot \underbrace{\left(1 - \frac{x_{v,j}}{x_{p,j}}\right)}_{h_j^0} \cdot \underbrace{\frac{x_{p,j}^2}{x_{v,j}^2} \cdot t_{p,j}^2}_{t_{v,j}^2} + \sum_{j=1}^J k_{R,j} \right]$$

Die Minimierung der Kostenfunktion (2–19) unterliegt folgenden Nebenbedingungen:²⁰⁸

1. Die in Position j gefertigte Menge eines Produkts ist exakt ausreichend bis zur Verfügbarkeit von dessen nächster Losauflage in Position $j'(j)$:²⁰⁹

$$x_{p,j} \cdot t_{p,j} = x_{v,j} \cdot \left[t_{p,j} + t_{f,j} + \sum_{s=j+1}^{j'(j)-1} (t_{R,s} + t_{p,s} + t_{f,s}) + t_{R,j'(j)} \right] \quad (2-20)$$

2. Die in allen Positionen J_i in Summe gefertigte Menge eines Produkts i entspricht dessen Verbrauch im Gesamtzyklus:

$$x_{p,i} \cdot \sum_{j \in J_i} t_{p,j} = x_{v,i} \cdot T_{\text{zyk}} \quad \text{für alle Produkte } i = 1, 2, \dots, I \quad (2-21)$$

3. Die Summe der Rüst-, Produktions- und freien Zeiten aller Positionen entspricht der Gesamtzykluslänge:

$$\sum_{j=1}^J (t_{R,j} + t_{p,j} + t_{f,j}) = T_{\text{zyk}} \quad (2-22)$$

4. Nichtnegativitätsbedingungen:

$$t_{p,j}, t_{f,j}, T_{\text{zyk}} \geq 0 \quad (2-23)$$

ZIPKIN²¹⁰ schlägt 1991 zudem eine Verbesserung des Verfahrens vor, bei dem die Gesamtzykluslänge in Stufe 3 wiederum als zu optimierende Größe betrachtet wird und erschließt somit prinzipiell weiteres Kostensenkungspotential. Auch wenn dieses nach seinen Analysen geringer ausfällt als erwartet,²¹¹ so soll die Erweiterung ZIPKINS bei der Umsetzung des TVL-Ansatzes im Verlauf dieser Arbeit dennoch berücksichtigt werden.

²⁰⁸ Vgl. CARSTENSEN, P., 2002, S. 46 f. oder MAYR, M., 1996, S. 63 f.

²⁰⁹ Dies impliziert die „zero-inventory“-Bedingung (vgl. MAYR, M., 1996, S. 63 sowie Kapitel 2.2.1).

²¹⁰ Vgl. ZIPKIN, P. H., 1991.

²¹¹ Vgl. ZIPKIN, P. H., 1991, S. 63.

Demnach ist – neben den Produktions- und Leerzeiten jeder Auftragsposition – auch die Gesamtzykluszeit eine Entscheidungsvariable bei der Minimierung der Kostenfunktion (2–19).²¹² Die Kombination aus quadratischer Zielfunktion, der vergleichsweise hohen Anzahl an Variablen²¹³ sowie der komplexen Nebenbedingungen (insbesondere (2–20)) trägt zu einer erheblichen Erhöhung des erforderlichen Lösungsaufwands (in Relation zum BPA) bei. Um dieser Problemkomplexität angemessen begegnen zu können, bedient sich die Lösungssuche im Allgemeinen computergestützter Verfahren.²¹⁴ Im Speziellen erfolgt die Implementierung des gesamten Algorithmus im Rahmen dieser Arbeit mittels WOLFRAM MATHEMATICA. Konkret kommt dabei zur Lösung des beschriebenen Optimierungsproblems (Stufe 3) die Funktion „NMinimize“ (vgl. Anlage F) zum Einsatz. Das Modell wird im Zuge der Erweiterung des TVL-Ansatzes in Kapitel 4.5 konkretisiert.

2.3.5 Zusammenhänge und erweiterter Literatureinblick

Die drei grundlegenden Ansätze zur Lösung des ELSP verhalten sich zueinander jeweils wie Erweiterungen bzw. Einschränkungen des betrachteten Lösungsraums. Insofern beinhaltet jedes Verfahren nach dem BPA (durch die Einbeziehung des Falls identischer Multiplikatoren) als „worst case“-Szenario prinzipiell stets die Lösung des CCM. Ebenso schließt der TVL-Ansatz wiederum generell alle BP-Lösungen als Spezialfälle produktbezogen gleich großer Losauflagen ein.²¹⁵ Die somit zwischen den Ansätzen bestehenden Zusammenhänge können als wichtige Anhaltspunkte innerhalb der Lösungsverfahren herangezogen werden. So wird die im Allgemeinen nicht realisierbare Losgrößenpolitik der IS zum einen als Kostenkriterium für die Beurteilung der Lösungsgüte eines Verfahrens herangezogen und erfüllt zum anderen insbesondere auch ihren Zweck als Orientierungshilfe bei der Festlegung initialer Werte der Planungsparameter. Des Weiteren dient bspw. beim BPA nach HAESSLER/HOGUE²¹⁶ bzw. HAESSLER²¹⁷ das Erreichen der Common-Cycle-Lösung auf der Suche nach kostenverbessernden Maschinenbelegungsplänen als Abbruchkriterium.²¹⁸ Ferner kann eine bei diesen BP-Verfahren initial ermit-

²¹² Vgl. MAYR, M., 1996, S. 65.

²¹³ Anzahl Variablen: $1 + 2 \cdot \sum_{i=1}^I n_i$.

²¹⁴ Vgl. ZIPKIN, P. H., 1991, S. 62.

²¹⁵ Vgl. CARSTENSEN, P., 1999, S. 431.

²¹⁶ Vgl. HAESSLER, R. W.; HOGUE, S. L., 1976.

²¹⁷ Vgl. HAESSLER, R. W., 1979.

²¹⁸ Vgl. Kapitel 2.3.3.3.

telte Multiplikatorkombination bei Unzulässigkeit oder ungenügender Lösungsgüte als Ausgangspunkt für den TVL-Ansatz herangezogen werden,²¹⁹ da dieser das kombinatorische Teilproblem des ELSP durch die Möglichkeit im Gesamtzyklus variierender Losgrößen (von einer Auflage zur nächsten des gleichen Produkts) geschickt entschärft.²²⁰

Neben dem generellen Anstieg der potentiellen Lösungsqualität vom CCM über den BPA hin zum TVL-Ansatz, nimmt allerdings auch der erforderliche Lösungsaufwand in einem nicht unerheblichen Maße zu. Folglich ist es naheliegend, vor allem für in Kombination auftretende Erweiterungen des klassischen ELSP – wie bspw. Investitionen zur Rüstzeitverkürzung²²¹, die Berücksichtigung von Qualitätsaspekten²²² oder eine kostenbeeinflussende, variable Produktionsrate²²³ – das einfacher handhabbare CCM heranzuziehen. Dieser Sachverhalt kann auch als ein Argument für die relativ weite Verbreitung des CCM in der Literatur (vgl. Abbildung 6) geltend gemacht werden. Das ähnlich häufige Auftreten des BPA ist ursächlich vielschichtiger zu erörtern: Im Gegensatz zum CCM tritt beim BPA (je nach Verfahren) verstärkt das kombinatorische Teilproblem in den Vordergrund, so dass Modellerweiterungen durch Interdependenzen mit der Reihenfolgeplanung generell zu einem höheren Anstieg der Problemkomplexität führen. So können bspw. reihenfolgeabhängige Rüstkosten im Rahmen des BPA nicht mehr (wie im CCM) ohne weiteres durch simples Lösen eines vorgelagerten, unabhängigen „Traveling Salesman Problems“ kostenminimierend berücksichtigt werden.²²⁴ Nichtsdestotrotz ist darüber hinaus bereits eine Vielzahl an theoretisch interessanten und praxisrelevanten Modellerweiterungen in der fachspezifischen Literatur vertreten.²²⁵ Wegen der höheren Grundkomplexität des BPA kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Kombinationsmöglichkeiten und Freiheitsgrade der Erweiterungen im Vergleich zum CCM in gewisser

²¹⁹ Vgl. CARSTENSEN, P., 1999, S. 440.

²²⁰ Vgl. MAYR, M., 1996, S. 65.

²²¹ Vgl. bspw. BANERJEE, A.; PYREDDY, V. R.; KIM, S. L., 1996 und HWANG, H.; KIM, D. B.; KIM, Y. D., 1993.

²²² Vgl. bspw. BEN-DAYA, M.; HARIGA, M. A., 2000, BOURLAND, K. E.; BROWN, M. J.; YANO, C. A., 1997 und CASAS-LIZA, J.; PINTO, J. M.; PAPAGEORGIOU, L. G., 2005.

²²³ Vgl. bspw. CHOWDHURY, M. R.; SARKER, B. R., 2001, KHOUJA, M., 1997 und MOON, D. H.; CHRISTY, D. P., 1998.

²²⁴ Vgl. bspw. BRANDER, P.; FORSBERG, R., 2005 und DOBSON, G., 1992.

²²⁵ Vgl. bspw. zu Qualitätsaspekten KAYVANFAR, V.; ZANDIEH, M., 2012 oder SOMAN, C. A.; VAN DONK, D. P.; GAALMAN, G. J. C., 2004, zu verschiedenen Erweiterungen sowie einer Diskussion zur Anwendbarkeit in Theorie und Praxis NARRO LOPEZ, M. A.; KINGSMAN, B. G., 1991, zur Berücksichtigung von Überstunden, Rückständen und Fehlmengen DAVIS, S. G., 1990, zu Teilefamilien und Sicherheitsbeständen KARALLI, S. M.; FLOWERS, A. D., 2006.

Weise eingeschränkt sind. Demgegenüber steht allerdings die Anzahl der verschiedenen, unter dem Begriff des BPA subsumierten Verfahren²²⁶, was wiederum eine dem CCM gleichkommende Verbreitung des grundlegenden Konzepts der gemeinsamen BP erklären kann. Der TVL-Ansatz ist unter den ausgesuchten Publikationen hingegen weit weniger stark vertreten, was wohl nicht zuletzt auf den deutlichen Anstieg der Problemkomplexität²²⁷ gegenüber dem BPA zurückzuführen ist. Dennoch bieten sich aufgrund der Möglichkeit variierender Losgrößen gewisse Erweiterungen dieses Modells im Speziellen an. Da insbesondere die Produktions- und Stillstandszeiten jeder Position zu determinieren sind, ist die Berücksichtigung variabler Produktionsraten²²⁸ oder Rüstzeiten²²⁹ naheliegend. Gleiches gilt für die Einbeziehung reihenfolgeabhängiger Rüstkosten²³⁰, da grundsätzlich für jeden Ablaufplan zulässige Losgrößen generiert werden können. Ebenso werden im Rahmen des TVL-Ansatzes unter anderem der Einfluss von Qualitätsaspekten²³¹ und das Auftreten von Rückständen²³² modelliert. Der Ansatz nimmt damit – im Rahmen der hier vorliegenden Analyse – etwa die Hälfte des Anteils des CCM bzw. des BPA ein.

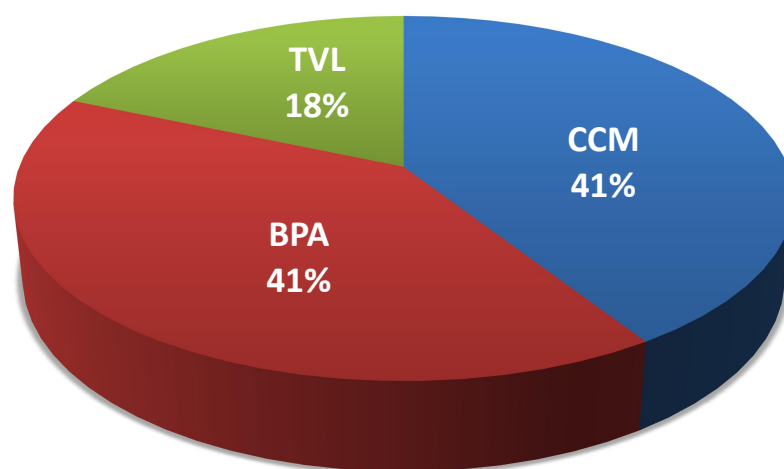


Abbildung 6: Relative Verbreitung der unterschiedlichen Lösungsverfahren in der Literatur²³³

²²⁶ Vgl. Kapitel 2.3.3.

²²⁷ Vgl. Kapitel 2.3.4.

²²⁸ Vgl. bspw. CHENG, F.; YAN, H.; YANG, J., 1998, GALLEGO, G., 1993 oder GIRI, B. C.; MOON, I., 2004a.

²²⁹ Vgl. GALLEGO, G.; MOON, I., 1992.

²³⁰ Vgl. bspw. CHANDRASEKARAN, C. et al., 2007, OH, H. C.; KARIMI, I. A., 2001 oder SHIRODKAR, V. A.; MADHUSUDANAN PILLAI, V.; SRIDHARAN, R., 2011.

²³¹ Vgl. bspw. GIRI, B. C.; MOON, I.; YUN, W. Y., 2003, MOON, I.; GIRI, B. C.; CHOI, K., 2002 oder MOON, I.; HAHM, J.; LEE, C., 1998.

²³² Vgl. bspw. CHANDRASEKARAN, C. et al., 2009 oder GALLEGO, G.; ROUNDY, R., 1992.

²³³ Zur Auswertung vgl. Anlage C.

Ähnliche Untersuchungen zur Verbreitung der grundlegend verschiedenen Ansätze der Reihenfolgeplanung beim ELSP finden sich beispielsweise bei CHAN/CHUNG/LIM²³⁴ oder SANTANDER-MERCADO/JUBIZ-DIAZ²³⁵. Da diese als Literature Reviews angelegten Publikationen jedoch auch anderweitige Analysen der ausgewählten Literaturliste durchführen sowie die Identifikation von Ansatzpunkten für künftige Forschungsziele verfolgen, resultieren aufgrund der zur vorliegenden Arbeit abweichenden Intention sowie differierender Such- und Analyseverfahren eine unterschiedliche Literaturliste und dementsprechend abweichende Ergebnisse. Während CHAN/CHUNG/LIM (CCM: 41%; BPA: 28%; TVL: 11%; Sonstiges: 20%)²³⁶ sich auf einen zeitlichen Horizont von 1997-2012 beschränken und ihre Auswahl final auf 100 Zeitschriftenartikel eingrenzen,²³⁷ betrachten SANTANDER-MERCADO/JUBIZ-DIAZ (CCM: 48%; BPA: 25%; TVL:14%; kein/anderer Ansatz: 13%)²³⁸ letztendlich 126 Artikel im Zeitraum von 1958 bis 2015.²³⁹ Die Datenbasis beider Analysen beinhaltet demzufolge einen relativ großen Anteil (20% bzw. 13%) nicht zuordenbarer Publikationen, der das Verhältnis der Verbreitung der unterschiedlichen Lösungsansätze zwischen den Studien verzerrt. Bei der Auswahl und Auswertung der Abbildung 6 zugrundeliegenden Literatur haben ausschließlich Publikationen Berücksichtigung gefunden, die mindestens einem der drei Lösungsansätze zugeordnet werden können. Zudem erstreckt sich die Literaturrecherche neben Publikationen zum klassischen ELSP insbesondere auch auf dessen eng verwandte Abwandlungen²⁴⁰, wobei die Auswahl hauptsächlich auf Beiträge aus referierten Fachzeitschriften beschränkt ist. Reine Reviews wurden nicht berücksichtigt und Monographien lediglich dann aufgenommen, wenn sie das Thema als Schwerpunkt behandeln. Insgesamt wurden somit 187 Publikationen im Zeitraum von 1962-2013 hinsichtlich ihrer Verwendung der Verfahren zur Reihenfolgeplanung kategorisiert.²⁴¹

²³⁴ Vgl. CHAN, H.; CHUNG, S.; LIM, M., 2013.

²³⁵ Vgl. SANTANDER-MERCADO, A.; JUBIZ-DIAZ, M., 2016.

²³⁶ Vgl. CHAN, H.; CHUNG, S.; LIM, M., 2013, S. 468.

²³⁷ Vgl. CHAN, H.; CHUNG, S.; LIM, M., 2013, S. 466 f.

²³⁸ Vgl. SANTANDER-MERCADO, A.; JUBIZ-DIAZ, M., 2016, S. 4984.

²³⁹ Vgl. SANTANDER-MERCADO, A.; JUBIZ-DIAZ, M., 2016, S. 4974.

²⁴⁰ Hierbei wurden folgende, vom Grundproblem des ELSP abweichende Annahmen bzw. Erweiterungen berücksichtigt: mehrstufige Fertigung, parallele Maschinen, stochastische und dynamische Nachfrage, ELDSP, endlicher Planungshorizont.

²⁴¹ Vgl. Anlage C.

Die in Kapitel 4 dieser Arbeit entwickelten Erweiterungen zum ELSP betreffen hingegen das zugrundeliegende Lagerhaltungsmodell²⁴² und werden im Rahmen aller drei Lösungsansätze betrachtet.

Ein weiteres Differenzierungsmerkmal im Zusammenhang mit der Problemkomplexität ist die Anwendung bzw. Anpassung oder Entwicklung geeigneter Lösungsmethoden. Gerade im Hinblick auf das kombinatorische Teilproblem beim BPA bzw. die relativ hohe Anzahl an zu bestimmenden Variablen beim TVL-Ansatz²⁴³ in Verbindung mit den zuvor exemplarisch angeführten Modellerweiterungen, erscheint es sinnvoll, effiziente Werkzeuge zur Lösung des mehrteiligen Gesamtproblems zum Einsatz zu bringen. In diesem Kontext ist insbesondere die Anwendung „genetischer“ bzw. „evolutionärer Algorithmen“²⁴⁴ verbreitet,²⁴⁵ da deren Einsatz im Vergleich zu anderen heuristischen Verfahren ebenfalls gute (teilweise sogar bessere) Lösungen verspricht und dabei gerade im Falle umfangreicher Problemkonstellationen regelmäßig ein geringerer Rechenaufwand zu erwarten ist.²⁴⁶ Auch andere Näherungsverfahren – wie „tabu search“, „simulated annealing“, „ant-colony optimization“ oder „Meta-Heuristiken“ in Form von Kombinationen dieser Methoden – finden Verwendung.²⁴⁷

Im Verlauf dieser Arbeit soll auf die Anwendung solcher alternativen Verfahren weitestgehend verzichtet werden, da nicht die Optimierung der Lösungsfindung an sich, sondern vielmehr deren struktureller Aufbau und Nachvollziehbarkeit im Fokus stehen. Eine Ausnahme bildet hierbei der TVL-Ansatz²⁴⁸, bei dem sich aufgrund einer komplexeren

²⁴² Vgl. Kapitel 3.

²⁴³ Vgl. Kapitel 2.3.4.

²⁴⁴ Vgl. bspw. SILVER, E. A., 2004, S. 950.

²⁴⁵ Vgl. bspw. zum BPA BULUT, O.; TASGETIREN, M. F.; FADILGULU, M. M., 2012, CHATFIELD, D. C., 2007, KHOUJA, M.; MICHALEWICZ, Z.; WILMOT, M., 1998, SCHMIDT, C., 1998 oder TORRES, J. F.; ROJAS, G. S., 2007 bzw. zum TVL-Ansatz CHUNG, S. H.; CHAN, H. K., 2012, MOON, I.; CHA, B. C.; BAE, H. C., 2006 oder MOON, I.; SILVER, E. A.; CHOI, S., 2002.

²⁴⁶ Vgl. bspw. CHANDRASEKARAN, C. et al., 2007, S. 175, CHANG, Y. J.; YAO, M. J., 2009, S. 422 oder CHATFIELD, D. C., 2007, S. 2878 f.

²⁴⁷ Vgl. zu den Heuristiken im Allgemeinen MÜLLER-MERBACH, H., 1981 oder SILVER, E. A., 2004 sowie zu deren Anwendung bezüglich der Lösungsfindung beim ELSP bspw. RAZA, A. S.; AKGUNDUZ, A.; CHEN, M. Y., 2006 und PIÑEYRO, P.; VIERA, O., 2010. Vgl. zu „tabu search“ RAZA, A. S.; AKGUNDUZ, A., 2008, zu „simulated annealing“ CHANDRASEKARAN, C. et al., 2007 sowie CHANDRASEKARAN, C. et al., 2009 zu „Meta-Heuristiken“ mit „ant-colony“-Algorithmen.

²⁴⁸ Vgl. im Speziellen Stufe 3 des Ansatzes von DOBSON (Kapitel 2.3.4).

Zielfunktion, der zahlreichen Nebenbedingungen und der Vielzahl an Variablen der Einsatz spezifischer Suchverfahren²⁴⁹ empfiehlt. Das grundlegende Prinzip der Lösungsermittlung folgt hierbei trotz allem der in Kapitel 2.3.4 beschriebenen Vorgehensweise. Daher sollen die Begriffe „TVL“ bzw. „variierende Losgrößen“ bis auf weiteres stets als bezugnehmend auf das von DOBSON bzw. ZIPKIN beschriebene Verfahren verstanden werden. Analog dazu stehen die Begriffe „BPA“ bzw. „gemeinsame BP“ im Folgenden für den Ansatz nach HAESSLER²⁵⁰, der bereits in Kapitel 2.3.3.3 in Zusammenhang mit dem Verfahren von HAESSLER/HOGUE kurz vorgestellt und in Kapitel 4.4 noch ausführlich erläutert wird. Damit sind die bisher eher allgemein verwendeten Begrifflichkeiten nun enger gefasst und für den weiteren Gebrauch definiert.

²⁴⁹ Diese werden allerdings nicht explizit entwickelt oder angepasst, sondern finden lediglich im Rahmen der Implementierung mittels WOLFRAM MATHEMATICA ihre Anwendung. (vgl. Kapitel 4.5).

²⁵⁰ Vgl. HAESSLER, R. W., 1979.

3 Lagerhaltungsmodelle mit Lossplitting

3.1 Ausgangspunkt „offene“ und „geschlossene“ Fertigung

Bei der Planung der Fertigungslosgröße kann generell zwischen zwei grundlegend verschiedenen Formen der Weitergabe der Erzeugnisse von der produzierenden zur verbrauchenden Stufe unterschieden werden.²⁵¹ Bei einer „*offenen Fertigung*“ wird jede kleinste Mengeneinheit des Produkts sofort nach ihrer Fertigstellung an die Folgestufe weitergeleitet.²⁵² Voraussetzung hierfür ist das Vorhandensein eines dementsprechenden Transportsystems. Da diesbezügliche Investitionsentscheidungen in der Regel mittel- oder langfristiger Natur sind, nehmen sie keinen direkten Einfluss auf die kurzfristig ausgegerichtete Losgrößenplanung. Die Kosten des Transportsystems können demnach auch nicht zweckmäßig auf einzelne Transportvorgänge umgelegt werden, sondern sind diesbezüglich als „sunken costs“ zu betrachten.²⁵³ Die Gesamtkostenfunktion für einen gegebenen Bedarf B im Planungszeitraum T (mit $B = x_v \cdot T$) lässt sich in Abhängigkeit von der Fertigungslosgröße bei isolierter Sicht eines Produkts wie folgt darstellen:²⁵⁴

$$K_0^{\text{ges}}(x) = \underbrace{\frac{x}{2} \cdot \left(\frac{1}{x_v} - \frac{1}{x_p} \right) \cdot c_L \cdot B}_{K_0^{\text{Lager}}} + \underbrace{k_R \cdot \frac{B}{x}}_{K^{\text{Rüst}}} \quad (3-1)$$

Durch Nullsetzen und Umstellen der ersten Ableitung nach x ergibt sich die optimale Fertigungslosgröße bei „offener Fertigung“:²⁵⁵

$$x_0^{\text{opt}} = \sqrt{\frac{k_R}{\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{x_v} - \frac{1}{x_p} \right) \cdot c_L}} \quad (3-2)$$

²⁵¹ Im Folgenden wird lediglich auf die für das ELSP relevante Problemstellung eines Staulagers ($x_p > x_v$) eingegangen. Es findet keine differenzierte Darstellung des Zerreißlagersfalls statt (vgl. hierzu bspw. BLOECH, J. et al., 2008, S. 269 ff.).

²⁵² In der Theorie des mathematischen Modells wird jede infinitesimal kleine Mengeneinheit direkt nach der Produktion ohne Zeitverzug zur verbrauchenden Stufe transportiert (vgl. hierzu und zum Begriff der „offenen Fertigung“ BOGASCHESKY, R., 1998, S. 289).

²⁵³ Vgl. SZENDROVITS, A. Z., 1976, S. 334.

²⁵⁴ Vgl. BLOECH, J. et al., 2008, S. 268.

²⁵⁵ Vgl. BLOECH, J. et al., 2008, S. 268.

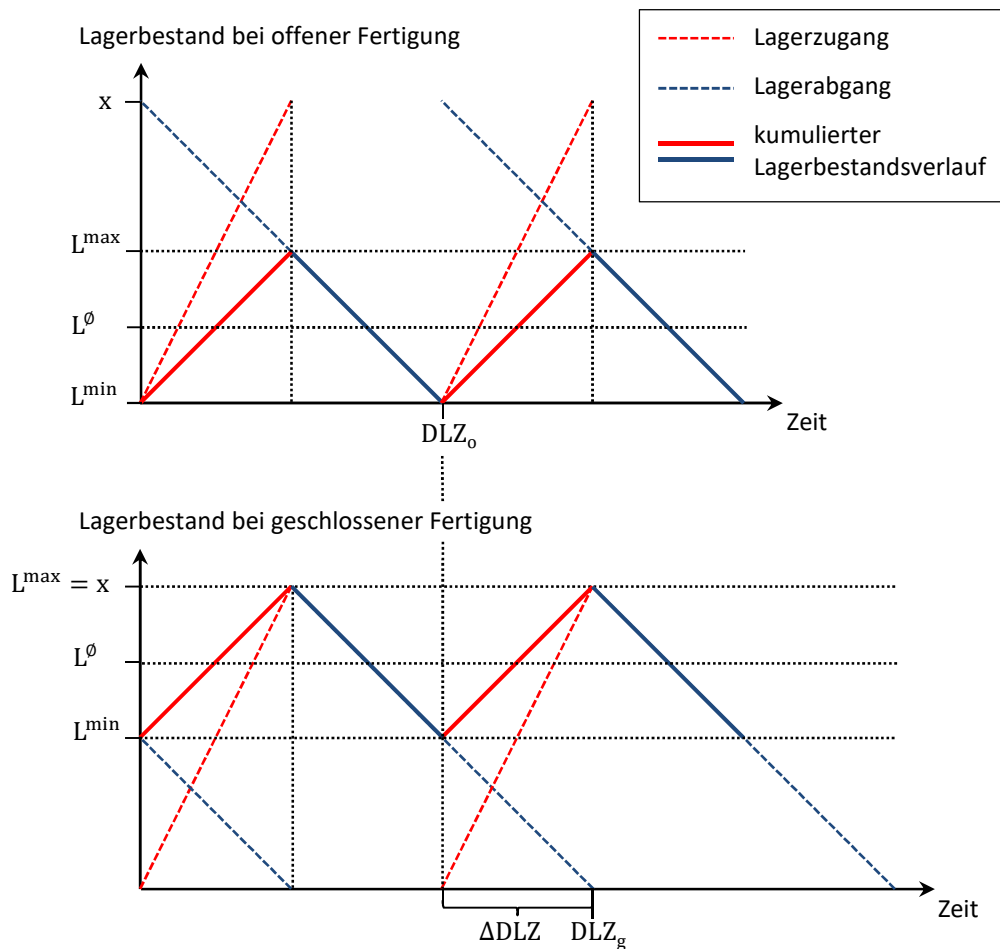


Abbildung 7: Lagerbestandsverlauf bei offener und geschlossener Fertigung²⁵⁶

Werden hingegen ausschließlich komplette Produktionslose an die Folgestufe weitergeleitet, so liegt eine „*geschlossene Fertigung*“ vor.²⁵⁷ In diesem Fall haben eventuell zu berücksichtigende Transportkosten einen losfixen²⁵⁸ Charakter und wirken daher wie eine entsprechende Erhöhung des Rüstkostensatzes. Die Funktion der Gesamtkosten unterscheidet sich von der der „offenen Fertigung“ lediglich darin, dass der Lagerhaltungskostenterm nun von der Summe (anstatt von der Differenz) der reziproken Stufenleistungswerte abhängig ist:²⁵⁹

$$K_g^{\text{ges}}(x) = \underbrace{\frac{x}{2} \cdot \left(\frac{1}{x_v} + \frac{1}{x_p} \right) \cdot c_L \cdot B}_{K_{\text{Lager}}^{\text{ges}}} + \underbrace{k_R \cdot \frac{B}{x}}_{K_{\text{Rüst}}} \quad (3-3)$$

²⁵⁶ Die vergleichende Darstellung beruht auf der Prämisse einer identischen Fertigungslosgröße x und ist eine erweiterte Kombination zweier Einzelabbildungen aus BLOECH, J. et al., 2008 S. 267 bzw. S. 271.

²⁵⁷ Vgl. BOGASCHESKY, R., 1998, S. 289.

²⁵⁸ Vgl. zum Begriff der losfixen Kostenbestandteile BOGASCHESKY, R.; BUSCHER, U.; LINDNER, G., 1999, S. 3.

²⁵⁹ Vgl. BLOECH, J. et al., 2008, S. 272.

Gleiches gilt folglich auch für die optimale Losgröße bei „geschlossener Fertigung“:²⁶⁰

$$x_g^{\text{opt}} = \sqrt{\frac{k_R}{\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{x_v} + \frac{1}{x_p}\right) \cdot c_L}} \quad (3-4)$$

Ein Vergleich der entscheidungsrelevanten Gesamtkosten beider Modelle (Formeln (3–1) und (3–3)) fällt bei identischen Parametern demnach naturgemäß zu Gunsten der „offenen Fertigung“ aus, da die „geschlossene Fertigung“ bei gleicher Losgröße mit einem höheren durchschnittlichen Lagerbestand sowie einer längeren Durchlaufzeit einhergeht (vgl. Abbildung 7). Da sich die günstigste Lösung jeweils im Gleichgewicht der losvariablen Lagerhaltungs- und losfixen Rüstkosten einstellt (vgl. Abbildung 8), folgt daraus, dass die optimale Losgröße (Formeln (3–2) und (3–4)) bei gleichen Parametern im Falle der „offenen Fertigung“ höher ausfällt.

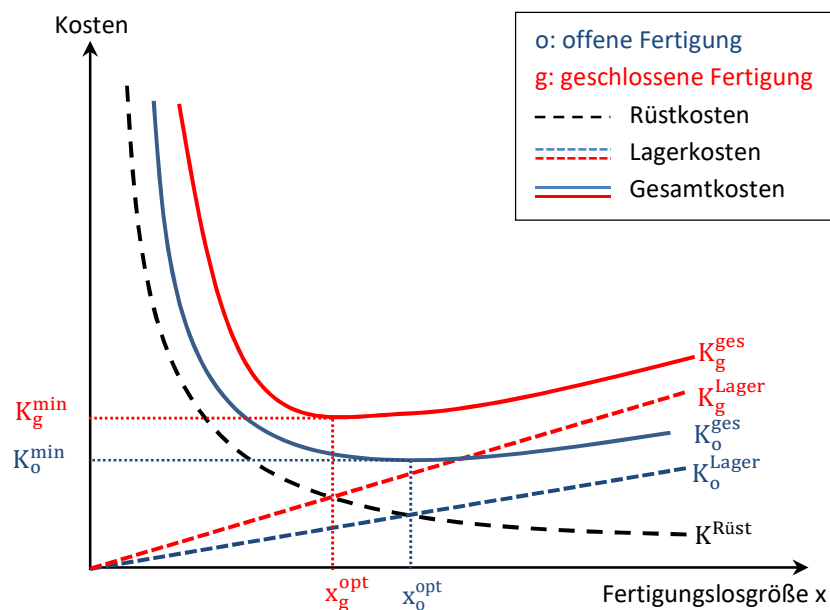


Abbildung 8: Optimale Losgröße bei offener und geschlossener Fertigung

Beide Modelle stellen jedoch hinsichtlich der Produktweitergabe an die Folgestufe Extrema eines kontinuierlichen Spektrums dar.²⁶¹ Während das Konstrukt der „offenen Fertigung“ rein theoretisch unendlich viele Transportvorgänge abbildet, so ist es bei „geschlossener Fertigung“ lediglich einer pro Losauflage. Im Sinne einer realitätsnäheren

²⁶⁰ Vgl. BLOECH, J. et al., 2008, S. 272.

²⁶¹ Vgl. BOGASCHEWSKY, R., 1998, S. 289.

Abbildung sind allerdings grundsätzlich auch alle alternativen, ganzzahligen²⁶² Transporthäufigkeiten im Intervall von $[1; \infty[$ von Interesse. Eine diesbezügliche Erweiterung der Betrachtung kann entweder aufgrund einer exogen vorgegebenen bzw. im Vorfeld festgelegten Anzahl an Transporten²⁶³ oder im Sinne einer Simultanplanung von Fertigungs- und Teilloosgrößen²⁶⁴ erfolgen. Letztere soll im Fokus der weiteren Ausführungen stehen und setzt die Berücksichtigung entscheidungsrelevanter Transportkosten voraus. Könnte die Transporthäufigkeit TH ohne zusätzlich dafür anfallende Kosten unbegrenzt erhöht werden, so würde sich die Lösung aufgrund der daraus resultierenden Einsparungen letztendlich von der „geschlossenen Fertigung“ ($TH = 1$) hin zur „offenen Fertigung“ ($TH \rightarrow \infty$) entwickeln.²⁶⁵ Im Folgenden werden zwei Modelle vorgestellt, die diesem Umstand durch die Einbeziehung eines fixen Transportkostensatzes (k_T) Rechnung tragen und somit eine explizite Berücksichtigung von Teilloosen im Sinne einer überlappenden Fertigung²⁶⁶ ermöglichen. Beide Ansätze sind ursprünglich auf einen „Dialog von Publikationen“ zwischen den Autoren SZENDROVITS und GOYAL zurückzuführen.²⁶⁷ Die Ausführungen hier erfolgen in Anlehnung an die Aufbereitung und Erweiterung dieser Modelle in einem Arbeitsbericht von BOGASCHEWSKY/BUSCHER/LINDNER²⁶⁸. Der dort betrachtete Fall eines einstufigen Fertigungssystems stellt eine kongruente Prämisse zur Modellumgebung des ELSP dar (vgl. Abbildung 3) und bietet sich demnach für die in Kapitel 4 angestrebte Integration von Transportlosen in die Lösungsansätze zum ELSP an. Den Ausführungen der Kapitel 3.2 und 3.3 liegen folgende, zentrale Prämissen zugrunde:²⁶⁹

- simultane Planung der Fertigungslosgröße und Transporthäufigkeit bei isolierter Betrachtung einer Produktart (ohne Kapazitätsbeschränkungen)
- statisch-deterministische Parameter bei theoretisch unendlichem Planungshorizont
- Fehlmengen sind nicht zulässig
- unbegrenzte Lagerdauer der infinitesimal teilbaren Produkteinheiten

²⁶² Vgl. BOGASCHEWSKY, R.; BUSCHER, U.; LINDNER, G., 1999, S. 15.

²⁶³ Vgl. SZENDROVITS, A. Z., 1975 bzw. SZENDROVITS, A. Z., 1976, S. 334.

²⁶⁴ Vgl. GOYAL, S. K., 1976, S. 332.

²⁶⁵ Vgl. GOYAL, S. K., 1976, S. 333 sowie BOGASCHEWSKY, R.; BUSCHER, U., 1999, S. 339.

²⁶⁶ Vgl. BUSCHER, U.; SHEN, L., 2009, S. 29 f.

²⁶⁷ Zu diesem Dialog zählen folgende Publikationen in chronologischer Reihenfolge: SZENDROVITS, A. Z., 1975; GOYAL, S. K., 1976; SZENDROVITS, A. Z., 1976; GOYAL, S. K., 1977; SZENDROVITS, A. Z., 1978; GOYAL, S. K., 1978. Eine knappe Zusammenfassung der Entwicklung ist auch bei FELDMANN, M., 2005, S. 192 beschrieben.

²⁶⁸ Vgl. BOGASCHEWSKY, R.; BUSCHER, U.; LINDNER, G., 1999.

²⁶⁹ Vgl. BOGASCHEWSKY, R.; BUSCHER, U.; LINDNER, G., 1999, S. 2 f.

- einstufige Produktion mit direkt anschließendem Verbrauch bzw. Absatz im Stau-
lagerfall ($x_p > x_v$)
- Durch die vorzeitige Weitergabe bereits bearbeiteter Teilmengen eines Ferti-
gungsloses wird dessen Produktion nicht unterbrochen, so dass kein zusätzlicher
Rüstvorgang anfällt.
- mengenunabhängiger Transportkostensatz und ganzzahlige Transporthäufigkeit
- keine relevanten Rüst- oder Transportzeiten

3.2 Gleich große Transportlose nach SZENDROVITS

SZENDROVITS²⁷⁰ grundlegender Ansatz basiert auf der Idee der Aufteilung eines Ferti-
gungsloses in gleich große Transportlose, ohne dabei den Bearbeitungsprozess zu unter-
brechen. Die daraus resultierende Möglichkeit einer Losüberlappung („lot streaming“)²⁷¹
zwischen der produzierenden und der verbrauchenden Stufe führt im Vergleich zur „ge-
schlossenen Fertigung“ regelmäßig zu kürzeren Durchlaufzeiten sowie geringeren Lager-
beständen (vgl. Abbildung 9) und erschließt somit ein generelles Kostensenkungspoten-
tial. Ob ein solches tatsächlich realisiert werden kann, ist letztendlich parameterabhängig,
wobei insbesondere die Kosten je zusätzlichem Transportvorgang ausschlaggebend sind.

Anhand der graphischen Darstellung des prinzipiellen Lagerbestandsverlaufs für $TH = 3$
Transportlose in Abbildung 9, kann nunmehr ein allgemeiner Ausdruck zur Ermittlung
des je Fertigungslos x auftretenden Lagerbestands in Abhängigkeit von den Entschei-
dungsvariablen (x und TH) abgeleitet werden. SZENDROVITS betrachtet dazu den kumu-
lierten Lagerbestandsverlauf und berechnet die zugehörige Fläche aus der Summe mehr-
erer Teildreiecke und eines Rechtecks.²⁷² GOYAL schlägt diesbezüglich eine Alternative
vor, die sich an den Lagerbeständen je Transportlos orientiert und dabei zwischen den
Zeiten des Lagerauf- bzw. -abbaus sowie den auftretenden Wartezeiten differenziert.²⁷³

²⁷⁰ Vgl. SZENDROVITS, A. Z., 1975.

²⁷¹ Vgl. GLOCK, C. H.; GROSSE, E. H.; RIES, J. M., 2014, S. 43, BUSCHER, U.; SHEN, L., 2009, S. 29,
CHANG, J. H.; CHIU, H. N., 2005 oder BAKER, K. R.; PYKE, D. F., 1990.

²⁷² Vgl. SZENDROVITS, A. Z., 1975, S. 302 f. und BOGASCHEWSKY, R.; BUSCHER, U.; LINDNER, G., 1999, S.
6 f.

²⁷³ Vgl. GOYAL, S. K., 1978, S. 269 f. sowie BOGASCHEWSKY, R.; BUSCHER, U., 1999, S. 238 f.

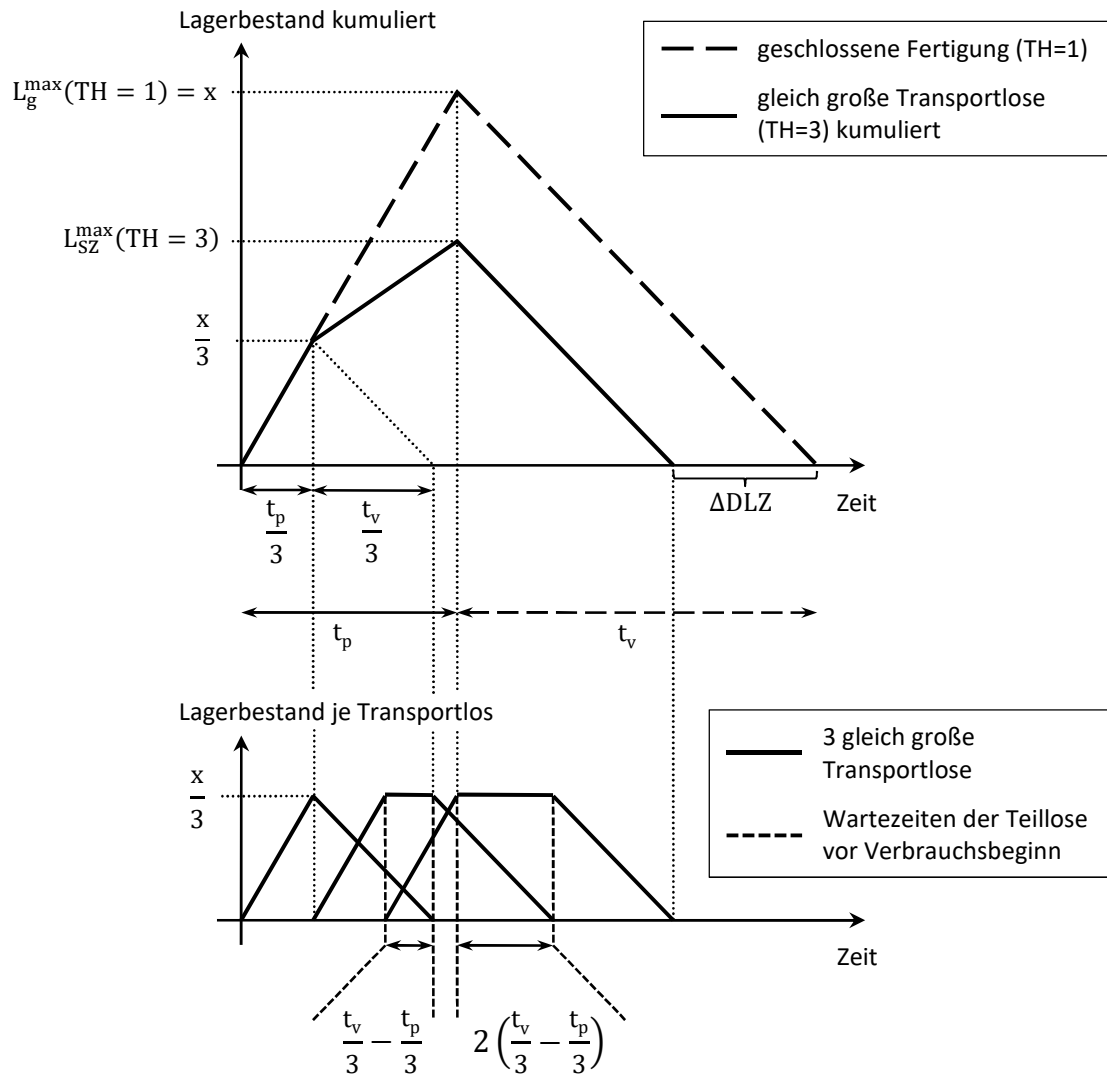


Abbildung 9: Lagerbestandsverlauf eines Produktionsloses bei „geschlossener Fertigung“ bzw. bei Aufteilung in drei gleich große Transportlose²⁷⁴

Dementsprechend ergibt sich folgende Funktion für die Lagerhaltungskosten eines Fertigungsloses:²⁷⁵

$$K_{\text{SZ,Los}}^{\text{Lager}}(x, \text{TH}) = \frac{x}{\text{TH}} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \underbrace{\left(\frac{t_p}{\text{TH}} + \frac{t_v}{\text{TH}} \right) \cdot \text{TH}}_{\text{Zeit für Lagerauf- und -abb von TH Transportlosen}} + \frac{\text{TH} - 1}{2} \cdot \underbrace{(t_v - t_p)}_{\text{gesamte Wartezeit aller TH Transportlose}} \right] \cdot c_L$$

²⁷⁴ In Anlehnung an BOGASCHESKY, R.; BUSCHER, U., 1999, S. 338.

²⁷⁵ Vgl. BOGASCHESKY, R.; BUSCHER, U., 1999, S. 339.

Addiert man hierzu die losfixen Kostenbestandteile, die sich aus dem Rüstkostensatz k_R sowie dem Produkt aus Transportkostensatz k_T und Transporthäufigkeit TH zusammensetzen, so ergibt sich durch Multiplikation mit der Auflagehäufigkeit B/x die Gesamtkostenfunktion für einen durch $B = x_v \cdot T$ (mit $x_v = \text{const. in } T$) gegebenen Bedarf:²⁷⁶

$$K_{SZ}(x, TH) = x \cdot \left[\frac{1}{TH \cdot x_p} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x_v} - \frac{1}{x_p} \right) \right] \cdot c_L \cdot B + (k_R + TH \cdot k_T) \cdot \frac{B}{x} \quad (3-5)$$

Zur simultanen Optimierung von Fertigungs- und Teillosgröße wird (3-5) nun partiell nach x und TH abgeleitet, woraus sich durch anschließendes Nullsetzen und Umstellen folgende Bestimmungsgleichungen ergeben:²⁷⁷

$$x_{SZ}^{\text{opt}}(TH) = \sqrt{\frac{k_R + TH \cdot k_T}{\left[\frac{1}{TH \cdot x_p} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x_v} - \frac{1}{x_p} \right) \right] \cdot c_L}} \quad (3-6)$$

$$TH_{SZ}^{\text{opt}}(x) = x \cdot \sqrt{\frac{c_L}{x_p \cdot k_T}} \quad (3-7)$$

Löst man (3-7) nach x auf und setzt das Ergebnis mit (3-6) gleich, so erhält man durch Freistellen von TH eine Formel zur direkten Berechnung der kostenminimierenden Transporthäufigkeit bei gleichzeitiger Realisierung der optimalen Fertigungslosgröße:²⁷⁸

$$TH_{SZ}^{\text{opt}}(x_{SZ}^{\text{opt}}) = \sqrt{\frac{2k_R}{\left(\frac{x_p}{x_v} - 1 \right) \cdot k_T}} \quad (3-8)$$

Diese Transporthäufigkeit repräsentiert das globale Minimum der Gesamtkostenfunktion und geht mit einer Fertigungslosgröße einher, die sich durch Gleichsetzen von (3-7) und (3-8) sowie anschließendes Auflösen nach x ergibt:²⁷⁹

$$x_{SZ}^{\text{opt}}(TH_{SZ}^{\text{opt}}) = \sqrt{\frac{2k_R \cdot x_p}{\left(\frac{x_p}{x_v} - 1 \right) \cdot c_L}} = \sqrt{\frac{k_R}{\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{x_v} - \frac{1}{x_p} \right) \cdot c_L}} = x_o^{\text{opt}}$$

²⁷⁶ Vgl. BOGASCHEWSKY, R.; BUSCHER, U., 1999, S. 339 bei Berücksichtigung von $x_p > x_v$.

²⁷⁷ Vgl. BOGASCHEWSKY, R.; BUSCHER, U., 1999, S. 339 f.

²⁷⁸ Vgl. BOGASCHEWSKY, R.; BUSCHER, U.; LINDNER, G., 1999, S. 15.

²⁷⁹ Vgl. BOGASCHEWSKY, R.; BUSCHER, U.; LINDNER, G., 1999, S. 15.

Interessanterweise entspricht diese Produktionslosgröße der bei „offener Fertigung“,²⁸⁰ ist aber lediglich dann optimal, wenn die nach (3–8) ermittelte Transporthäufigkeit auch realisiert werden kann. Da die Anzahl an Transporten allerdings sinnvollerweise auf ganzzahlige Werte restringiert ist und sich eine derartige Lösung nach (3–8) nur zufällig einstellt, müssen in der Regel entsprechende Anpassungen vorgenommen werden. Aufgrund der Konvexität der Kostenfunktion²⁸¹ ist es zur Ermittlung der optimalen ganzzahligen Transporthäufigkeit ausreichend, die dementsprechend unmittelbar benachbarten Werte der reellen Lösung von (3–8) einem Kostenvergleich zu unterziehen.²⁸² Die zugehörigen Fertigungslosgrößen beider zu prüfenden Alternativen ergeben sich nach (3–6). Durch die Wahl der günstigeren Losgrößenpolitik sind beide Entscheidungsvariablen unter den gegebenen Voraussetzungen kostenminimierend determiniert.

3.3 Dynamische Transportlosgrößen nach GOYAL

GOYAL²⁸³ präsentiert 1977 einen Ansatz zur Simultanplanung von Fertigungslosgröße und Transporthäufigkeit, bei dem die Prämisse gleich großer Teillose aufgehoben wird. Vielmehr entwickeln sich die einzelnen Weitergabemengen q_z gemäß einer geometrischen Reihe²⁸⁴ (vgl. Formel (3–9)) und zielen darauf ab, die im Modell von SZENDROVITS auftretenden Wartezeiten (siehe Abbildung 9) zu vermeiden und somit sowohl den Lagerbestand als auch die Durchlaufzeit weiter zu reduzieren (vgl. Abbildung 10). Für die ungleich großen Transportlose nach GOYAL gelten dementsprechend folgende, zentrale Zusammenhänge:²⁸⁵

$$\begin{aligned}
 t_{p,z+1} &= t_{v,z} \quad \text{mit } z \in \{1, 2, 3, \dots, TH\} \\
 \text{und } t_{p,z} &= \frac{q_z}{x_p} \quad \text{bzw. } t_{v,z} = \frac{q_z}{x_v} \\
 \Rightarrow q_{z+1} &= q_z \cdot \frac{x_p}{x_v} \quad \Rightarrow \quad q_z = q_1 \cdot \left(\frac{x_p}{x_v}\right)^{z-1} \quad (3-9)
 \end{aligned}$$

²⁸⁰ Vgl. BOGASCHESKY, R.; BUSCHER, U.; LINDNER, G., 1999, S. 15.

²⁸¹ Vgl. zum Konvexitätsbeweis BOGASCHESKY, R.; BUSCHER, U.; LINDNER, G., 1999, S. 40 ff.

²⁸² Vgl. BOGASCHESKY, R.; BUSCHER, U., 1999, S. 340.

²⁸³ Vgl. GOYAL, S. K., 1977.

²⁸⁴ Vgl. BOGASCHESKY, R.; BUSCHER, U.; LINDNER, G., 1999, S. 9.

²⁸⁵ Vgl. BOGASCHESKY, R.; BUSCHER, U.; LINDNER, G., 1999, S. 8 f.

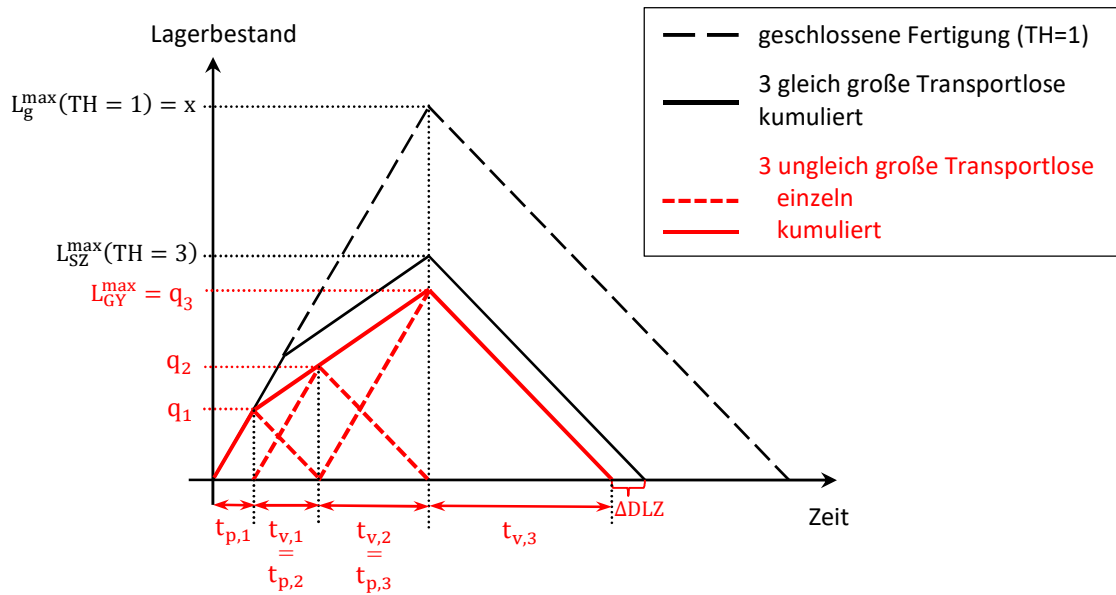


Abbildung 10: Vergleich des Lagerbestandsverlaufs eines Fertigungsloses bei drei gleich großen und drei ungleich großen Transportlosen sowie bei „geschlossener Fertigung“²⁸⁶

Die Fertigungslosgröße ergibt sich wiederum als Summe der einzelnen Weitergabemengen:²⁸⁷

$$x = \sum_{z=1}^{TH} q_z \Rightarrow x = q_1 \cdot \sum_{z=1}^{TH} \left(\frac{x_p}{x_v}\right)^{z-1} = q_1 \cdot \underbrace{\frac{\left(\frac{x_p}{x_v}\right)^{TH} - 1}{\frac{x_p}{x_v} - 1}}_{A(TH)} \quad (3-10)$$

Zur Ermittlung der losweisen Lagerhaltungskosten werden die Flächen der Teillosdrei-ecke berechnet und unter Berücksichtigung von (3-9) zusammengefasst:²⁸⁸

$$\begin{aligned} K_{GY,Los}^{Lager}(q_1, TH) &= \left[\frac{q_1}{2} (t_{p,1} + t_{v,1}) + \frac{q_2}{2} (t_{p,2} + t_{v,2}) + \dots + \frac{q_{TH}}{2} (t_{p,TH} + t_{v,TH}) \right] \cdot c_L \\ &= \left[\frac{q_1^2}{2} \left(\frac{1}{x_p} + \frac{1}{x_v} \right) + \frac{q_2^2}{2} \left(\frac{1}{x_p} + \frac{1}{x_v} \right) + \dots + \frac{q_{TH}^2}{2} \left(\frac{1}{x_p} + \frac{1}{x_v} \right) \right] \cdot c_L \\ \stackrel{(3-9)}{\implies} K_{GY,Los}^{Lager}(q_1, TH) &= \left(\frac{1}{x_p} + \frac{1}{x_v} \right) \cdot \left[\frac{q_1^2}{2} + \frac{q_1^2}{2} \cdot \left(\frac{x_p}{x_v} \right)^2 + \dots + \frac{q_1^2}{2} \cdot \left(\frac{x_p}{x_v} \right)^{2(TH-1)} \right] \cdot c_L \end{aligned}$$

²⁸⁶ Für den graphischen Vergleich wird an dieser Stelle eine identische Fertigungslosgröße sowie die gleiche Anzahl an Transporten in den Teillosmodellen unterstellt. Letztere weisen in der dargestellten Situation demnach gleichhohe Rüst- und Transportkosten auf und unterscheiden sich lediglich hinsichtlich der Lagerhaltungskosten.

²⁸⁷ Vgl. BOGASCHEWSKY, R.; BUSCHER, U.; LINDNER, G., 1999, S. 9 f., wobei der hier verwendete Platzhalter $A(TH)$ im Gegensatz zum Äquivalent in der angegebenen Quelle invers definiert ist.

²⁸⁸ Vgl. BOGASCHEWSKY, R.; BUSCHER, U.; LINDNER, G., 1999, S. 10 ff.

$$\begin{aligned}
&= \frac{q_1^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{x_p} + \frac{1}{x_v} \right) \cdot \underbrace{\left[1 + \left(\frac{x_p}{x_v} \right)^2 + \dots + \left(\frac{x_p}{x_v} \right)^{2(\text{TH}-1)} \right]}_{\sum_{k=1}^{\text{TH}} \left(\frac{x_p}{x_v} \right)^{2(k-1)}} \cdot c_L \\
\Rightarrow K_{\text{GY,Los}}^{\text{Lager}}(q_1, \text{TH}) &= \frac{q_1^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{x_p} + \frac{1}{x_v} \right) \cdot \underbrace{\left[\frac{\left(\frac{x_p}{x_v} \right)^{2 \cdot \text{TH}} - 1}{\left(\frac{x_p}{x_v} \right)^2 - 1} \right]}_{D(\text{TH})} \cdot c_L \\
\stackrel{(3-10)}{\implies} K_{\text{GY,Los}}^{\text{Lager}}(x, \text{TH}) &= \frac{x^2}{2 \cdot A^2(\text{TH})} \cdot \left(\frac{1}{x_p} + \frac{1}{x_v} \right) \cdot D(\text{TH}) \cdot c_L
\end{aligned}$$

Die Funktion der Rüst- und Transportkosten bleibt gegenüber dem Modell mit gleich großen Teillosen unverändert. Somit ergeben sich nach deren Addition und anschließendem Multiplizieren mit der Auflagehäufigkeit B/x folgende Gesamtkosten für eine gegebene Bedarfsmenge B .²⁸⁹

$$K_{\text{GY}}(x, \text{TH}) = \frac{x}{2 \cdot A^2(\text{TH})} \cdot \left(\frac{1}{x_p} + \frac{1}{x_v} \right) \cdot D(\text{TH}) \cdot c_L \cdot B + (k_R + \text{TH} \cdot k_T) \cdot \frac{B}{x} \quad (3-11)$$

bzw. in alternativer Form²⁹⁰

$$K_{\text{GY}}(x, \text{TH}) = \frac{x \cdot c_L \cdot B}{A(\text{TH}) \cdot x_p} + \frac{x}{2} \cdot \left(\frac{1}{x_v} - \frac{1}{x_p} \right) \cdot c_L \cdot B + (k_R + \text{TH} \cdot k_T) \cdot \frac{B}{x} \quad (3-12)$$

Bedingt durch die Komplexität der Kostenfunktion bezüglich der Transporthäufigkeit ist im Vergleich zum Modell gleich großer Teillose eine direkte Ermittlung der global-optimalen Losgrößenpolitik jedoch nicht ohne weiteres möglich.²⁹¹ Daher basiert die Lösungsfindung auf einem iterativen Algorithmus, der sich die Konvexitätseigenschaft der Kostenfunktion hinsichtlich der Transporthäufigkeit zunutze macht.²⁹² Als Grundlage

²⁸⁹ Vgl. BOGASCHEWSKY, R.; BUSCHER, U.; LINDNER, G., 1999, S. 12.

²⁹⁰ Zum Nachweis der Identität der Formeln (3-11) und (3-12) vgl. BOGASCHEWSKY, R.; BUSCHER, U.; LINDNER, G., 1999, S. 36 ff.

²⁹¹ TH steht im Exponenten des Ausdrucks $A(\text{TH})$ (vgl. (3-10)), was ein Auflösen der null gesetzten, partiellen Ableitung von (3-12) nach TH im Allgemeinen nicht zulässt.

²⁹² Vgl. zum Konvexitätsbeweis BOGASCHEWSKY, R.; BUSCHER, U.; LINDNER, G., 1999, S. 43 ff.

dieser Methode dient die kontinuierliche Kostenfunktion $K_{GY}(TH)$ zu deren Ermittlung zunächst die partielle Ableitung von (3–12) nach x gebildet wird. Nullsetzen und Umstellen führen ferner zur Bestimmungsgleichung für die optimale Fertigungslosgröße bei gegebener Transporthäufigkeit.²⁹³

$$x_{GY}^{opt}(TH) = \sqrt{\frac{k_R + TH \cdot k_T}{\frac{c_L}{A(TH) \cdot x_p} + \frac{x}{2} \cdot \left(\frac{1}{x_v} - \frac{1}{x_p}\right) \cdot c_L}} \quad (3-13)$$

Wird dieser Ausdruck wiederum in (3–12) eingesetzt, so erhält man nach Vereinfachung eine ausschließlich noch von der Transporthäufigkeit TH abhängige, kontinuierliche Gesamtkostenfunktion.²⁹⁴

$$K_{GY}(TH) = 2 \cdot B \cdot \sqrt{(k_R + TH \cdot k_T) \cdot \left[\frac{c_L}{A(TH) \cdot x_p} + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{x_v} - \frac{1}{x_p}\right) \cdot c_L \right]} \quad (3-14)$$

Aufgrund des im relevanten Bereich konvexen Verlaufs von (3–14)²⁹⁵ muss für die optimale, ganzzahlige Transporthäufigkeit TH_{GY}^{opt} folgendes Kriterium erfüllt sein:²⁹⁶

$$K_{GY}(TH_{GY}^{opt} - 1) \geq K_{GY}(TH_{GY}^{opt}) \leq K_{GY}(TH_{GY}^{opt} + 1)$$

Graphisch entspricht dies in der Regel einem lokalen Minimum der $K_{GY}(TH)$ -Funktion, da die global-optimale Transporthäufigkeit im Allgemeinen eine reellwertige Ausprägung annimmt (vgl. Abbildung 11).

²⁹³ Vgl. BOGASCHEWSKY, R.; BUSCHER, U.; LINDNER, G., 1999, S. 18.

²⁹⁴ Vgl. BOGASCHEWSKY, R.; BUSCHER, U.; LINDNER, G., 1999, S. 19.

²⁹⁵ Der Konvexitätsbeweis der Kostenfunktion (3–12) bezüglich TH wird unter der Prämisse einer gegebenen (konstanten) Fertigungslosgröße erbracht. Die kontinuierliche Kostenfunktion (3–14) beinhaltet hingegen (3–13) und berücksichtigt somit implizit eine kostenoptimale Anpassung der Fertigungslosgröße an die Transporthäufigkeit. Dadurch ist eine Voraussetzung für die Gültigkeit des ursprünglichen Konvexitätsbeweises nicht mehr gegeben. In der Tat beschreibt (3–14) im Allgemeinen keinen durchgängig konvexen Funktionsverlauf, sondern besitzt einen Wendepunkt rechts der kostenminimalen Transporthäufigkeit. Allerdings existiert im Bereich nach dem Wendepunkt kein weiteres Minimum und die Funktion verläuft streng degressiv steigend, so dass das Minimum des konvexen Bereichs von (3–14) als global bezeichnet werden kann.

²⁹⁶ Vgl. GOYAL, S. K., 1977, S. 868 sowie Abbildung 11.

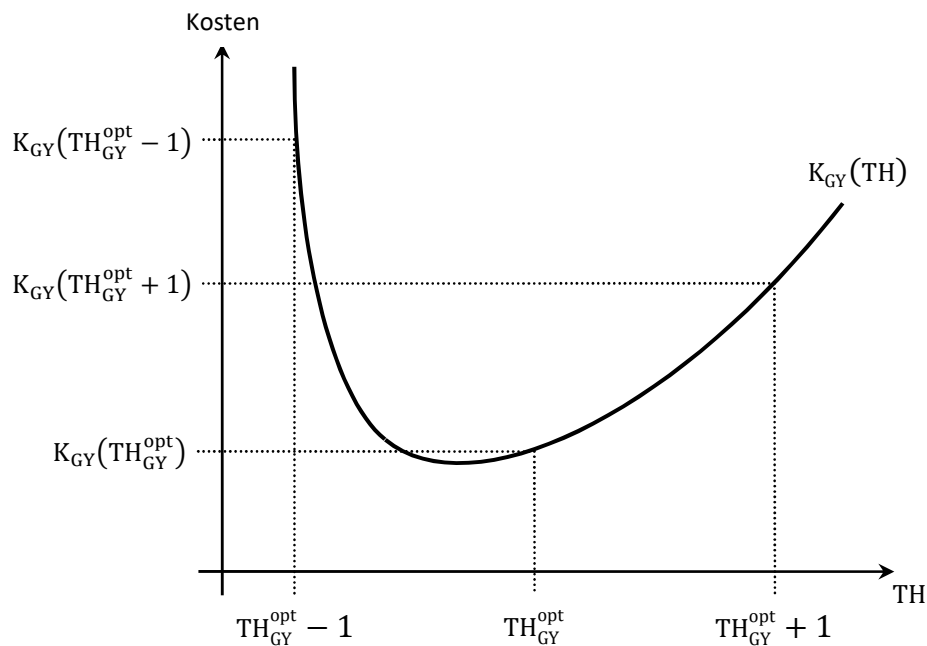


Abbildung 11: Optimalitätskriterium des GOYAL-Algorithmus²⁹⁷

Demnach kann TH_{GY}^{opt} im Wesentlichen dadurch ermittelt werden, dass die Transporthäufigkeit solange schrittweise erhöht wird, bis die zugehörigen Kosten erstmals im Vergleich zur vorherigen Iteration ansteigen. Formal lässt sich diese Vorgehensweise wie folgt beschreiben.²⁹⁸

Algorithmus 1: Ermittlung der optimalen, ganzzahligen Transporthäufigkeit nach GOYAL

- | | |
|------------|--|
| Schritt 1: | Setze $TH = 1$ und berechne $K_{GY}(TH)$ nach (3–14). |
| Schritt 2: | Setze $TH = TH + 1$ und bestimme $K_{GY}(TH)$ gemäß (3–14). |
| Schritt 3: | Falls $K_{GY}(TH) \leq K_{GY}(TH - 1)$, dann gehe zu Schritt 2.
Sonst gehe zu Schritt 4. |
| Schritt 4: | Setze $TH_{GY}^{opt} = TH - 1$ und $K_{GY}(TH_{GY}^{opt}) = K_{GY}(TH - 1)$.
Berechne $x_{GY}^{opt}(TH_{GY}^{opt})$ nach (3–13). |

²⁹⁷ In Anlehnung an BUSCHER, U.; LINDNER, G., 2000b, S. 613.

²⁹⁸ Vgl. BUSCHER, U.; LINDNER, G., 2000b, S. 613.

Dadurch sind mit der Fertigungslosgröße x_{GY}^{opt} und der Transporthäufigkeit TH_{GY}^{opt} die beiden Planungsparameter für eine kostenoptimale Losgrößenpolitik im Modell von GOYAL eindeutig determiniert. Allerdings ist die Anzahl der erforderlichen Iterationsschritte des Lösungsalgorithmus direkt proportional zur Höhe der optimalen Transporthäufigkeit. Daher schlagen BOGASCHEWSKY/BUSCHER/LINDNER zwei modifizierte Optimierungsansätze vor, die darauf abzielen einen geeigneteren Startwert als eins für die Transporthäufigkeit zu bestimmen und so – insbesondere für große TH_{GY}^{opt} – die Anzahl benötigter Iterationen in Grenzen zu halten.²⁹⁹

Ausgangspunkt der als „ALGORITHMUS II“ benannten Vorgehensweise ist die global-optimale Transporthäufigkeit $TH_{SZ}^{opt}(x_{SZ}^{opt})$ im Falle gleich großer Teillose (Formel (3–8)). Bei diesem Startwert muss zunächst geprüft werden, ob das Minimum der $K_{GY}(TH)$ -Funktion (Formel (3–14)) bereits überschritten ist oder nicht und ob demnach die Lösungssuche nach der optimalen, ganzzahligen Transporthäufigkeit in Richtung kleinerer respektive größerer Ausprägungen von TH gestartet wird.³⁰⁰

Das unter „ALGORITHMUS I“ beschriebene Verfahren findet auch in Kapitel 4 dieser Arbeit Anwendung. Ermittelt werden soll die zur optimalen Losgröße bei „offener Fertigung“ x_o^{opt} (Formel (3–2)) korrespondierende Transporthäufigkeit $TH_{GY}^{opt}(x_o^{opt})$. Dazu wird (3–2) in die Gesamtkostenfunktion $K_{GY}(x, TH)$ (Formel (3–12)) eingesetzt und der resultierende Ausdruck nach TH abgeleitet. Anschließendes Nullsetzen und Auflösen nach der Transporthäufigkeit führt letztendlich zu:³⁰¹

$$TH_{GY}^{opt}(x_o^{opt}) = \frac{\ln \left[\sqrt{\left(\frac{k_R \cdot \ln \left(\frac{x_p}{x_v} \right)}{k_T} + 1 \right)^2 - 1} + \frac{k_R \cdot \ln \left(\frac{x_p}{x_v} \right)}{k_T} + 1 \right]}{\ln \left(\frac{x_p}{x_v} \right)} \quad (3-15)$$

²⁹⁹ Vgl. BOGASCHEWSKY, R.; BUSCHER, U.; LINDNER, G., 1999, S. 20 ff.

³⁰⁰ Vgl. BOGASCHEWSKY, R.; BUSCHER, U.; LINDNER, G., 1999, S. 34 ff.

³⁰¹ Vgl. BOGASCHEWSKY, R.; BUSCHER, U.; LINDNER, G., 1999, S. 20 ff.

Für jeden nach dieser Bestimmungsgleichung ermittelten Wert kann gezeigt werden, dass er links vom globalen Minimum der kontinuierlichen Gesamtkostenfunktion $K_{GY}(TH)$ (Formel (3–14)) liegt.³⁰² Zieht man als Startwert nun die nächstkleinere, ganzzahlige Ausprägung von $TH_{GY}^{opt}(x_0^{opt})$ heran, so kann demnach die Lösungssuche auf größere, ganzzahlige Werte der Transporthäufigkeit beschränkt werden. Die weitere Vorgehensweise zur Ermittlung der optimalen Losgrößenpolitik folgt dann prinzipiell den Verfahrensschritten des ursprünglichen GOYAL-Algorithmus.³⁰³

³⁰² Vgl. zur Beweisführung BOGASCHEWSKY, R.; BUSCHER, U.; LINDNER, G., 1999, S. 46 f.

³⁰³ Vgl. BOGASCHEWSKY, R.; BUSCHER, U.; LINDNER, G., 1999, S. 23 bzw. Algorithmus 1.

4 Lossplitting in den Lösungsansätzen zum ELSP

4.1 Literaturüberblick und Konklusion der Forschungsziele

Den in der Literatur behandelten Lösungsansätzen zum ELSP liegt nahezu ausschließlich die meist implizite Annahme einer „offenen Fertigung“ zu Grunde. Alternative Formen der loseiligen Produktweitergabe, wie sie in Kapitel 3 erläutert sind, werden lediglich in einigen speziellen Abwandlungen bzw. Erweiterungen aufgegriffen. Zur Abgrenzung und Identifizierung möglichen Forschungsbedarfs sollen diese zunächst näher beleuchtet werden. Die Betrachtung des Konstrukts einer „geschlossenen Fertigung“ ist naturgemäß dann von besonderem Interesse, wenn die Bündelung von Produktmengen in gewisser Weise planungsrelevant ist. Dies ist bspw. für das ELDSP in dem Sinne zutreffend, als dass die Fertigungslose mehrerer Produkte zu Transportzwecken zusammengefasst werden.³⁰⁴ Somit muss zum einen berücksichtigt werden, dass die Fertigstellung der betreffenden Produkte möglichst ohne großen zeitlichen Abstand erfolgt und zum anderen gewährleistet sein, dass die gebündelten Fertigungsmengen die Kapazität des Transportmittels bestmöglich ausnutzen und nicht übersteigen.³⁰⁵ Auch bei Betrachtung des ELSP im Kontext einer mehrstufigen Produktion wird häufig unterstellt, dass die Bearbeitung auf der Folgestufe frühestens dann beginnen kann, wenn das gesamte Fertigungslos die jeweils vorgelagerte Stufe komplett durchlaufen hat.³⁰⁶ Allerdings wird bei diesbezüglichen Modellen oftmals davon ausgegangen, dass entweder die Auflagehäufigkeiten der Sorten³⁰⁷ bzw. deren Produktionsreihenfolge³⁰⁸ oder die Fertigungslosgrößen³⁰⁹ bereits determiniert sind bzw. vorab ermittelt wurden. Dessen ungeachtet bleibt festzuhalten, dass insbesondere bei diesen Planungssituationen, die prinzipiell auf einer „geschlossenen Fertigung“ basieren, die Berücksichtigung von Teillosen – aufgrund des Potentials zur Durchlaufzeit- und Kostenreduzierung – von besonderer Relevanz und dementsprechend auch in fachspezifischen Publikationen vertreten ist.³¹⁰ Einen diesbezüglichen Einblick in die Literatur bietet Tabelle 5.

³⁰⁴ Vgl. Kapitel 2.2.2.2.

³⁰⁵ Vgl. BANERJEE, A., 2009.

³⁰⁶ Vgl. bspw. ALIABADI, M. et al., 2011, S. 3.

³⁰⁷ Vgl. bspw. ALIABADI, M. et al., 2011, S. 7 f.

³⁰⁸ Vgl. bspw. EL-NAJDAWI, M. K., 1994, S. 367.

³⁰⁹ Vgl. LINDNER, G., 2001, S. 4.

³¹⁰ Vgl. dazu im Allgemeinen BUSCHER, U.; SHEN, L., 2009.

Autoren	Jahr	Titel der Publikation	grundlegende Prämisse(n)	Lösungsansatz	Produktweitergabe	ergänzende Modellannahmen
Aliabadi/ Jolai/ Mehdi-zadeh/ Jenabi	2011	A Flow shop Production Planning Problem with basic period policy and Sequence Dependent set up times	mehrst. Prod. (flow-shop)	BPA	geschlossen	endlicher Planungshorizont, reihenfolgeabhängige Rüstkosten, Genetischer Algorithmus, G-Group Heuristik
El-Najdawi/ Kleindorfer	1993	Common Cycle Lot-size Scheduling for Multi-product, Multi-stage Production	mehrst. Prod. (flow-shop)	CCM	gleich große Teillose	Transportfähigkeit als Parameter, keine Transportkosten
Hahm/ Yano	1991	The economic lot and delivery scheduling problem: powers of two policies	ELDSP	BPA, TVL	geschlossen	Transportfähigkeit als kleinstes gemeinsames Vielfaches der Produkt-Auflagehäufigkeiten
Heydari/ Karimi/ Torabi	2009	The Economic Lot Scheduling Problem in Flow Lines with Sequence-Dependent Setups	mehrst. Prod. (flow-shop)	CCM	geschlossen	reihenfolgeabhängige Rüstkosten und -zeiten
Ho/ Lai/ Huang	2013	An Optimal Mixed Batch Shipment Policy for Multiple Items in a Single-Supplier Multiple-Retailer Integrated System	JRP	CCM	gleich große & dynamische Teillose	
Ho/ Tseng/ Hsiao	2015	The economic lot-size scheduling problem with equally sized batch shipment policy and stochastic demands	stochastisches ELSP, ELDSP-Abwandlung	CCM	gleich große Teillose	stochastische Nachfrage, Rückstände, Transportzeit relevant
Hoque/ Kingsman	2006	Synchronization in common cycle lot size scheduling for a multi-product serial supply chain	mehrst. Prod. (flow-shop)	CCM	gleich große & dynamische Teillose	Transportzeit relevant
Ouemiche/ Boctor	2001	The multi-product, economic lot-sizing problem in flow shops: the powers-of-two heuristic	mehrst. Prod. (flow-shop)	BPA	geschlossen	
Ouemiche/ Boctor	2001	The two-group heuristic to solve the multi-product, economic lot sizing and scheduling problem in flow shops	mehrst. Prod. (flow-shop)	BPA	geschlossen, gleich große Teillose	Transportfähigkeit als Parameter, keine Transportkosten
Ruiz-Torres/ Santiago/ Chung	2010	The campaign and lot size scheduling problem: a modification of the Economic Lot Scheduling Problem for the pharmaceutical industry	ELSP-Abwandlung	CCM, BPA	geschlossen	Bündelung von Losauflagen eines Produkts, Unterscheidung kleiner und großer Umrüstvorgänge
Torabi/ Fatemi Ghomi/ Karimi	2006	A hybrid genetic algorithm for the finite horizon economic lot and delivery scheduling in supply chains	ELDSP, mehrt. Prod. (flow-shop)	CCM	geschlossen	endlicher Planungshorizont, parallele Maschinen, Genetischer Algorithmus
Torabi/ Jenabi	2009	Multiple cycle economic lot and delivery-scheduling problem in a two-echelon supply chain	ELDSP, mehrt. Prod. (flow-shop)	BPA	geschlossen, gleich große Teillose	endlicher Planungshorizont, parallele Maschinen, Genetischer Algorithmus, Transportfähigkeit als Parameter, keine Transportkosten
Torabi/ Jenabi/ Mansouri	2008	Hybrid Genetic Algorithms for the Lot Production and Delivery Scheduling Problem in a Two-Echelon Supply Chain	mehrst. Prod. (flow-shop)	BPA	geschlossen	endlicher Planungshorizont, parallele Maschinen, Genetischer Algorithmus
Torabi/ Karimi/ Fatemi Ghomi	2005	The common cycle economic lot scheduling in flexible job shops: The finite horizon case	mehrst. Prod. (Job-shop)	CCM	geschlossen, gleich große Teillose	endlicher Planungshorizont, parallele Maschinen, Transportfähigkeit als Parameter, keine Transportkosten, Transportzeit relevant
Wagner/ Smits	2004	A local search algorithm for the optimization of the stochastic economic lot scheduling problem	stochastisches ELSP	BPA	geschlossen	stochastische Nachfrage, Sicherheitsbestände, Rückstände

Abkürzungen: mehrstufige Produktion (mehrst. Prod.) | Vgl. Kapitel 2.2.2.2 zum Joint Replenishment Problem (JRP)

Tabelle 5: Literatureinblick zur Berücksichtigung von Teillosen bei Abwandlungen des ELSP³¹¹

³¹¹ Eine abschließende Abgrenzung der zahlreichen Erweiterungen ist nur bedingt möglich. Daher erfolgt die Darstellung einer Auswahl exemplarischer Ausprägungen unter Berücksichtigung der zur Anwendung kommenden Lösungsansätze für das ELSP.

Diese beinhaltet darüber hinaus noch (1) ein Beispiel zum JRP³¹², bei dem die Kombination gleich großer und dynamischer Teillosgrößen möglich ist, (2) eine ELSP-Abwandlung bei der mehrere Losauflagen eines Produkts zusammengefasst werden können, wobei innerhalb einer solchen Charge ein geringerer Rüstaufwand als beim Wechsel auf eine andere Sorte anfällt sowie (3) den Fall eines stochastischen ELSP. Bei Letzterem wird zunächst unter Approximation einer deterministischen Nachfrage eine Ausgangslösung in Anlehnung an das Verfahren von HAESSLER/HOGUE³¹³ ermittelt.³¹⁴ Die „geschlossene Fertigung“ ist dort dadurch bedingt, dass für die Zielfunktion die Verfügbarkeit der gesamten Losauflage am Ende der Produktion relevant ist.³¹⁵

Wird die Betrachtung auf das klassische ELSP³¹⁶ begrenzt, so ist die Prämisse einer „geschlossenen Fertigung“ bzw. die explizite Berücksichtigung von Transportlosen in der Literatur weitaus weniger verbreitet.³¹⁷ BUSCHER/LINDNER³¹⁸ entwickeln im Rahmen des CCM einen Algorithmus zur Simultanplanung der optimalen, gemeinsamen Auflage- und Transporthäufigkeit unter Einbeziehung gleich großer Teillose. Die aus dem Modell resultierenden, produktindividuellen Fertigungslosgrößen stehen demnach in Abhängigkeit zu einer sortenübergreifend einheitlichen Anzahl an Transportvorgängen sowie der für alle Produkte identischen Verbrauchszeit. LINDNER³¹⁹ beschreibt einen äquivalenten Lösungsansatz in Bezug auf dynamische Transportlosgrößen. Darüber hinaus sind dem Autor der vorliegenden Arbeit nach aktuellem Kenntnisstand keine fachspezifischen Publikationen bekannt, die sich in diesem Kontext mit einer Erweiterung des klassischen ELSP im Sinne der überlappenden Fertigung auseinandersetzen. Dementsprechend können folgende Forschungsziele bzw. -fragen abgeleitet und formuliert werden, die im weiteren Verlauf im Fokus der Betrachtungen stehen sollen:

1. Die beiden Common-Cycle-Ansätze von BUSCHER/LINDNER und LINDNER sollen in Kapitel 4.3 aufgegriffen und aus einer anderen Perspektive betrachtet werden,

³¹² Vgl. Kapitel 2.2.2.2.

³¹³ Vgl. Kapitel 2.3.3.3.

³¹⁴ Vgl. WAGNER, M.; SMITS, S. R., 2004, S. 396.

³¹⁵ Vgl. WAGNER, M.; SMITS, S. R., 2004, S. 396.

³¹⁶ Vgl. Kapitel 2.2.1 zu den Prämissen des klassischen ELSP.

³¹⁷ Vgl. LINDNER, G., 2001, S. 5.

³¹⁸ Vgl. BUSCHER, U.; LINDNER, G., 2000a. Gleiches wird in aggregierter Form dargestellt bei BUSCHER, U.; LINDNER, G., 2001 und BUSCHER, U., 2000.

³¹⁹ Vgl. LINDNER, G., 2001.

der es letztendlich erlaubt die Lösungsfindung generell zu verkürzen. Darüber hinaus findet eine Erweiterung im Sinne der Berücksichtigung sortenindividueller Transporthäufigkeiten statt.³²⁰

2. Da die CC-Lösung im Allgemeinen jedoch ein aus relativer Kostensicht nicht zufrieden stellendes Ergebnis repräsentiert, das vielmehr als obere Schranke herangezogen wird, soll das Konzept der simultanen Fertigungs- und Transportlosplanung in zwei weitere Ansätze zur Lösung des ELSP integriert werden:³²¹
 - Diesbezüglich steht zunächst der BPA nach HAESSLER³²² im Mittelpunkt der Betrachtungen. Dieser wird in Kapitel 4.4 konkretisiert und entsprechend erweitert.
 - Analog dazu erfolgt Gleiches in Kapitel 4.5 für den TVL-Ansatz nach DOBSON³²³ bzw. ZIPKIN³²⁴.

Für beide Fälle werden quantitative Modelle entwickelt und implementiert, die zum einen gleich große und zum anderen dynamische Teillose bei jeweils produktübergreifender bzw. sortenspezifischer Transporthäufigkeit berücksichtigen können.

3. Die dementsprechend um die Losüberlappung erweiterten Lösungsansätze zum ELSP sollen anschließend hinsichtlich ihres Kosteneinsparungspotentials (sowohl im Vergleich zur „geschlossenen Fertigung“ als auch in Relation zu den bestehenden Ansätzen mit Lossplitting im CCM) analysiert werden. In diesem Kontext wird auch der Frage nachgegangen, bei welchem der Ansätze (CCM, BPA oder TVL) die Teillosbildung in der Regel am vielversprechendsten ist.
4. Des Weiteren soll ein möglicher Einfluss der Teillosbildung auf die optimalen Auflagehäufigkeiten der Sorten untersucht werden. Dies ist insbesondere im Rahmen des BPA von Relevanz, da dort nicht immer alle, aus Kostensicht interessanten Multiplikatorkombinationen zulässige Lösungsalternativen repräsentieren. Insofern stellt sich die Frage, ob bspw. eine bei „geschlossener Fertigung“ gene-

³²⁰ Diese Erweiterungsmöglichkeit wird bereits bei LINDNER, G., 2001, S. 31 als ein Hauptkritikpunkt des dortigen Modells angeführt.

³²¹ LINDNER kritisiert selbst den diesbezüglichen Nachteil seines Ansatzes im CCM und verweist exemplarisch auf die Alternative eines BPA (vgl. LINDNER, G., 2001, S. 31).

³²² Vgl. HAESSLER, R. W., 1979.

³²³ Vgl. DOBSON, G., 1987.

³²⁴ Vgl. ZIPKIN, P. H., 1991.

rell unzulässige Multiplikatorkombination unter den Umständen der Losüberlappung zu einem realisierbaren Maschinenbelegungsplan führen kann. Dies würde den relevanten Lösungsraum erweitern und könnte somit ein prinzipielles Kostensenkungspotential erschließen.

5. Aus den gewonnenen Erkenntnissen zur Simultanplanung der Fertigungs- und Transportlosgrößen im Rahmen der betrachteten Lösungsansätze zum klassischen ELSP sollen letztendlich Handlungsempfehlungen für die einfache Umsetzung in Theorie und Praxis abgeleitet werden.

4.2 Isolierte Lösung

Als untere Kostenschranke und Referenz der Lösungsgüte wird auch im Fall der Teillosbildung die IS herangezogen. Da sich die in Kapitel 3 dargestellten Modelle auf den Einproduktfall mit einem im Planungszeitraum T durch die konstante Verbrauchsrate x_v determinierten Bedarf B beziehen, erfolgt zunächst die Ausweitung der Betrachtung auf mehrere Sorten (durch Verwendung des Produktindex i) sowie eine Angleichung an die im ELSP übliche Betrachtungsweise der Gesamtkosten je Zeiteinheit. Des Weiteren wird – neben der Transporthäufigkeit – anstelle der Fertigungslosgröße die korrespondierende Verbrauchszeit in den Mittelpunkt der Optimierung rücken. Dabei findet zudem eine Differenzierung bezüglich der Prämisse einer sortenindividuellen (TH_i) bzw. einer produktübergreifend einheitlichen (TH) Anzahl an Transporten statt.

4.2.1 Gleich große Teillose

Sortenindividuelle Transporthäufigkeiten

Die Funktion der Gesamtkosten je Zeiteinheit (in Abhängigkeit von der Losreichweite $t_{v,i}$ sowie der sortenindividuellen Anzahl gleich großer Teillose TH_i) kann ausgehend von der durch den Planungszeitraum T dividierten Gleichung (3–5) als Summe über alle Produkte und unter Berücksichtigung der Zusammenhänge $B_i = x_{v,i} \cdot T$ und $x_i = t_{v,i} \cdot x_{v,i}$ wie folgt dargestellt werden:

$$K^{SZ}(t_{v,i}, TH_i) = \frac{1}{T} \cdot \sum_{i=1}^I t_{v,i} \cdot x_{v,i} \cdot \left[\frac{1}{TH_i \cdot x_{p,i}} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x_{v,i}} - \frac{1}{x_{p,i}} \right) \right] \cdot c_{L,i} \cdot x_{v,i} \cdot T + \dots$$

$$\dots + \frac{1}{T} \cdot \sum_{i=1}^I (k_{R,i} + TH_i \cdot k_{T,i}) \cdot \frac{x_{v,i} \cdot T}{t_{v,i} \cdot x_{v,i}}$$

Durch Vereinfachung und Umformungen ergibt sich letztendlich folgender Ausdruck, dessen Lagerhaltungskostenterm den Bezug zur „offenen Fertigung“ erkennen lässt:

$$K^{SZ}(t_{v,i}, TH_i) =$$

$$\sum_{i=1}^I \left[\underbrace{\frac{1}{2} \cdot c_{L,i} \cdot x_{v,i} \cdot \left(1 - \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}} \right) + \frac{c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2}{TH_i \cdot x_{p,i}}}_{h_i^0} \right] \cdot t_{v,i} + \sum_{i=1}^I \frac{k_{R,i} + TH_i \cdot k_{T,i}}{t_{v,i}} \quad (4-1)$$

$$h_i^{SZ}(TH_i)$$

Die partiellen Ableitungen von (4-1) nach $t_{v,i}$ bzw. TH_i sowie anschließendes Nullsetzen und Umstellen der resultierenden Terme führen zu den jeweils gegenseitig voneinander abhängigen, unrestringierten Bestimmungsgleichungen dieser Variablen:³²⁵

$$t_{v,i,opt}(TH_i) = \sqrt{\frac{k_{R,i} + TH_i \cdot k_{T,i}}{h_i^{SZ}(TH_i)}} \quad (4-2)$$

$$TH_{i,opt}(t_{v,i}) = t_{v,i} \cdot \sqrt{\frac{c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2}{k_{T,i} \cdot x_{p,i}}} \quad (4-3)$$

Analog zu Kapitel 3.2 können auch hier die Optimalwerte für das globale Gesamtkostenminimum von (4-1) direkt ermittelt werden, wobei sich für die Verbrauchszeit $t_{v,i,opt}$ bei Realisierung der optimalen, im Allgemeinen reellwertigen Transporthäufigkeit $TH_{i,opt}$ wiederum die Lösung der „offenen Fertigung“ einstellt:

$$t_{v,i,opt}(TH_{i,opt}) = \sqrt{\frac{k_{R,i}}{h_i^0}} \quad (4-4)$$

³²⁵ Bei den ausgehend von (3-5) vorgenommenen Modifikationen der Kostenfunktion handelt es sich hinsichtlich der Konvexität ausschließlich um Positivkombinationen, so dass diese Eigenschaft bezüglich der Planungsparameter auf (4-1) übergeht (vgl. hierzu auch die Ausführungen in Anlage B).

$$TH_{i,opt}(t_{v,i,opt}) = \sqrt{\frac{2 \cdot k_{R,i}}{k_{T,i} \cdot \left(\frac{x_{p,i}}{x_{v,i}} - 1\right)}} \quad (4-5)$$

Diese Transporthäufigkeiten bilden den Ausgangspunkt der Lösungssuche. Resultiert für ein Produkt nach (4-5) zufällig ein ganzzahliges Ergebnis, so kann die entsprechende Verbrauchszeit gemäß (4-4) berechnet werden. Für reellwertige Ausprägungen der Transporthäufigkeit müssen jedoch die beiden benachbarten, ganzzahligen Werte $TH_{ab}^{gz} = \lceil TH_{i,opt}(t_{v,i,opt}) \rceil$ und $TH_{auf}^{gz} = \lfloor TH_{i,opt}(t_{v,i,opt}) \rfloor$ zusammen mit den nach (4-4) korrespondierenden Verbrauchszeiten ermittelt und hinsichtlich der sich gemäß (4-1)³²⁶ ergebenden Kosten einem Vergleich unterzogen werden. Wird die jeweils günstigste Kombination (aus ganzzahliger Transporthäufigkeit und angepasster Verbrauchszeit) für jedes Produkt gewählt, so ist die daraus resultierende, kostenoptimale Losgrößenpolitik noch hinsichtlich der Einhaltung einer kumulierten Bruttoauslastung (Formel (2-4)) von maximal 100% zu überprüfen:

$$(2-4) \quad \sum_{i=1}^I \frac{t_{p,i} + t_{R,i}}{t_{v,i}} = \sum_{i=1}^I \left(\frac{x_{v,i}}{x_{p,i}} + \frac{t_{R,i}}{t_{v,i}} \right) \leq 1$$

Ist dieses Kriterium erfüllt, endet die Lösungssuche. Andernfalls wird eine „schärfere“ Kostenuntergrenze ermittelt, indem zunächst Nebenbedingung (2-4) mittels des LAGRANGE-Multiplikators λ in die Gesamtkostenfunktion (4-1) integriert wird. Analog zur Vorgehensweise bei „offener Fertigung“ in Kapitel 2.3.1³²⁷ kann somit eine Bestimmungsgleichung für die optimalen Verbrauchszeiten bei expliziter Berücksichtigung der Rüstzeiten hergeleitet werden:

$$t_{v,i} = \sqrt{\frac{k_{R,i} + TH_i \cdot k_{T,i} + \lambda \cdot t_{R,i}}{h_i^{SZ}(TH_i)}} \quad (4-6)$$

In Kombination mit (2-4) lässt sich daraus wiederum die Bedingung ableiten, der λ unter Einhaltung einer Bruttoauslastung von 100% genügen muss:³²⁸

³²⁶ Da ein produktbezogener Kostenvergleich ausreichend ist, können die Summenzeichen entfallen.

³²⁷ Vgl. Formeln (2-5) und (2-6).

³²⁸ Vgl. hierzu die näheren Erläuterungen bezüglich λ in Kapitel 2.3.1 (Seite 24).

$$\sum_{i=1}^I t_{R,i} \cdot \sqrt{\frac{h_i^{SZ}(TH_i)}{k_{R,i} + TH_i \cdot k_{T,i} + \lambda \cdot t_{R,i}}} = 1 - \sum_{i=1}^I \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}} \quad (4-7)$$

Allerdings ist der Wert für λ nun von der Transporthäufigkeit jedes einzelnen Produkts abhängig. Demnach müsste theoretisch für jede mögliche Kombination der ganzzahligen Transporthäufigkeiten aller Produkte ein eigener λ -Wert bestimmt und ein Vergleich der korrespondierenden Gesamtkosten durchgeführt werden. Selbst bei Einschränkung auf sinnvolle und naheliegende Transporthäufigkeitskombinationen kann dies – in Abhängigkeit von der Produktanzahl und der Parameterkonstellation – einen nicht unerheblichen Aufwand mit sich bringen. Aufgrund dieser Komplexität erfolgt die konkrete Lösungsermittlung mittels eines Optimierungsverfahrens in WOLFRAM MATHEMATICA.³²⁹ Das Verfahren minimiert die Zielfunktion (4-1) unter der Nebenbedingung (2-4), wobei die Startwerte für die Verbrauchszeiten nach (2-6)³³⁰ und für die Transporthäufigkeiten wiederum nach (4-3) ermittelt werden.

Einheitliche Transporthäufigkeit

Ist eine für alle Sorten identische Anzahl an Transportvorgängen zu planen, so stellt sich die Gesamtkostenfunktion analog zu (4-1) mit $TH_i = TH$ wie folgt dar:

$$K^{SZ}(t_{v,i}, TH) = \sum_{i=1}^I \left[\underbrace{\frac{1}{2} \cdot c_{L,i} \cdot x_{v,i} \cdot \left(1 - \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}\right) + \frac{c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2}{TH \cdot x_{p,i}}}_{h_i^{SZ}(TH)} \right] \cdot t_{v,i} + \sum_{i=1}^I \frac{k_{R,i} + TH \cdot k_{T,i}}{t_{v,i}} \quad (4-8)$$

Für die optimale, unrestringierte Verbrauchszeit bzw. Transporthäufigkeit ergeben sich dementsprechend die Bestimmungsgleichungen:³³¹

$$t_{v,i,opt}(TH) = \sqrt{\frac{k_{R,i} + TH \cdot k_{T,i}}{h_i^{SZ}(TH)}} \quad (4-9)$$

³²⁹ Im Speziellen kommt hierbei die Funktion NMinimize zum Einsatz (vgl. Anlage F).

³³⁰ Dies entspricht den isoliert optimalen Losreichweiten bei „offener Fertigung“ unter Einhaltung der maximalen Bruttoauslastung.

³³¹ Zum Nachweis der Konvexität von (4-8) vgl. die Ausführungen in Anlage B.

$$TH_{\text{opt}}(t_{v,i}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^I \frac{c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2 \cdot t_{v,i}}{x_{p,i}}}{\sum_{i=1}^I \frac{k_{T,i}}{t_{v,i}}}} \quad (4-10)$$

Da nun die gemeinsame Transporthäufigkeit von der Verbrauchszeit aller Sorten abhängig ist, kann – im Gegensatz zum Fall sortenindividueller TH_i – eine Ermittlung des globalen Gesamtkostenminimums (vgl. Formeln (4-4) und (4-5)) hier nicht mehr auf direktem Wege erfolgen. Zur Berechnung einer vorläufigen Transporthäufigkeit wird daher zunächst (4-9) in (4-8) eingesetzt, woraus eine lediglich noch von TH abhängige Gesamtkostenfunktion resultiert:³³²

$$K^{SZ}(TH) = 2 \cdot \sum_{i=1}^I \sqrt{h_i^{SZ}(TH) \cdot (k_{R,i} + TH \cdot k_{T,i})} \quad (4-11)$$

Wird auf Basis von (4-11) das unter Algorithmus 1 beschriebene Verfahren nach GOYAL durchlaufen, so ergibt sich eine optimale, ganzzahlige Transporthäufigkeit, deren korrespondierende Verbrauchszeiten wiederum nach (4-9) ermittelt werden.³³³ Um die Anzahl der Iterationsschritte zur Bestimmung von TH_{opt}^{gZ} zu begrenzen, kann anstelle eines Startwerts von 1 auch der kleinste, sich nach (4-5) ergebende und auf die nächste ganze Zahl abgerundete Wert verwendet werden:

$$\lfloor \min\{TH_{i,\text{opt}}(t_{v,i,\text{opt}})\} \rfloor = \left\lfloor \min \left\{ \sqrt{\frac{2 \cdot k_{R,i}}{k_{T,i} \cdot \left(\frac{x_{p,i}}{x_{v,i}} - 1\right)}} \right\} \right\rfloor$$

Die daraus hervorgehende Losgrößenpolitik muss noch hinsichtlich der Einhaltung einer Bruttoauslastung von maximal 100% geprüft werden:

$$(2-4) \quad \sum_{i=1}^I \frac{t_{p,i} + t_{R,i}}{t_{v,i}} = \sum_{i=1}^I \left(\frac{x_{v,i}}{x_{p,i}} + \frac{t_{R,i}}{t_{v,i}} \right) \leq 1$$

Ist diese Nebenbedingung erfüllt, so kann die Lösungssuche mit den bisher ermittelten Optimalwerten TH_{opt}^{gZ} und $t_{v,i,\text{opt}}(TH_{\text{opt}}^{gZ})$ beendet werden. Andernfalls schließen sich

³³² Zu den expliziten Umformungsschritten vgl. Anlage A.

³³³ Vgl. zur Konvexität von (4-11) die Anmerkungen zu (3-14) in Kapitel 3.3 (Seite 61).

weitere Schritte an, die der zuvor beschriebenen Vorgehensweise bei sortenindividueller Transporthäufigkeit entsprechen. Analog zu (4–6) kann demzufolge vorerst eine Bestimmungsgleichung für die Verbrauchszeiten unter expliziter Berücksichtigung der Rüstzeiten hergeleitet werden:

$$t_{v,i} = \sqrt{\frac{k_{R,i} + TH \cdot k_{T,i} + \lambda \cdot t_{R,i}}{h_i^{SZ}(TH)}} \quad (4-12)$$

Aus (4–12) und (2–4) ergibt sich wiederum die zur Bestimmung von λ notwendige Bedingung:

$$\sum_{i=1}^I t_{R,i} \cdot \sqrt{\frac{h_i^{SZ}(TH)}{k_{R,i} + TH \cdot k_{T,i} + \lambda \cdot t_{R,i}}} = 1 - \sum_{i=1}^I \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}} \quad (4-13)$$

Auch hier erfolgt die Ermittlung der Lösungswerte in konkreten Fällen unter Einsatz der Funktion „NMinimize“ in WOLFRAM MATHEMATICA (vgl. Anlage F), wobei sich als Ausgangspunkt für das Verfahren bspw. die zuvor bestimmten Werte der unrestringierten Lösung oder die nach (2–6) ermittelten Verbrauchszeiten in Kombination mit der aus (4–10) resultierenden Transporthäufigkeit anbieten.

4.2.2 Dynamische Teillosgrößen

Sortenindividuelle Transporthäufigkeiten

Analog zum Modell mit gleich großen Teillosen wird auch hier zunächst die Funktion der Gesamtkosten je Zeiteinheit in Abhängigkeit von der Verbrauchszeit $t_{v,i}$ und der sortenindividuellen Transporthäufigkeit TH_i ermittelt. Dazu wird Formel (3–12) über alle Produkte aufsummiert und unter Berücksichtigung von $B_i = x_{v,i} \cdot T$ und $x_i = t_{v,i} \cdot x_{v,i}$ durch den Planungszeitraum T dividiert:

$$K^{GY}(t_{v,i}, TH_i) =$$

$$\frac{1}{T} \cdot \sum_{i=1}^I \left[\frac{t_{v,i} \cdot x_{v,i} \cdot c_{L,i} \cdot x_{v,i} \cdot T}{A(TH_i) \cdot x_{p,i}} + \frac{t_{v,i} \cdot x_{v,i}}{2} \cdot \left(\frac{1}{x_{v,i}} - \frac{1}{x_{p,i}} \right) \cdot c_{L,i} \cdot x_{v,i} \cdot T \right] + \dots$$

$$\dots + \frac{1}{T} \cdot \sum_{i=1}^I (k_{R,i} + TH_i \cdot k_{T,i}) \cdot \frac{x_{v,i} \cdot T}{t_{v,i} \cdot x_{v,i}}$$

Nach Vereinfachung resultiert folgender Ausdruck, bei dem h_i^0 wiederum den Bezug zur „offenen Fertigung“ verdeutlichen soll:

$$K^{GY}(t_{v,i}, TH_i) = \sum_{i=1}^I \left[\underbrace{\frac{1}{2} \cdot c_{L,i} \cdot x_{v,i} \cdot \left(1 - \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}\right) + \frac{c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2}{A(TH_i) \cdot x_{p,i}}}_{h_i^{GY}(TH_i)} \right] \cdot t_{v,i} + \sum_{i=1}^I \frac{k_{R,i} + TH_i \cdot k_{T,i}}{t_{v,i}} \quad (4-14)$$

Zudem wird bei direkter Gegenüberstellung mit (4-1) ersichtlich, dass sich die Kostenfunktionen beider Teillosmodelle lediglich durch den Ausdruck $A(TH_i)^{334}$ unterscheiden, der sich im Modell gleich großer Transportlose zu TH_i vereinfacht.³³⁵ Durch Nullsetzen der partiellen Ableitung von (4-14) nach $t_{v,i}$ sowie entsprechendes Umstellen ergibt sich die Bestimmungsgleichung für die optimale, unrestringierte Verbrauchszeit in Abhängigkeit von der Transporthäufigkeit:³³⁶

$$t_{v,i,opt}(TH_i) = \sqrt{\frac{k_{R,i} + TH_i \cdot k_{T,i}}{h_i^{GY}(TH_i)}} \quad (4-15)$$

Wird dieser Ausdruck in (4-14) eingesetzt, resultiert wiederum die ausschließlich noch von TH_i abhängige, kontinuierliche Gesamtkostenfunktion:

$$K^{GY}(TH_i) = 2 \cdot \sum_{i=1}^I \sqrt{h_i^{GY}(TH_i) \cdot (k_{R,i} + TH_i \cdot k_{T,i})} \quad (4-16)$$

Auf Basis von (4-16) lässt sich sodann für jedes Produkt die optimale, ganzzahlige Transporthäufigkeit $TH_{i,opt}^{GZ}$ durch Anwendung des Verfahrens von GOYAL³³⁷ ermitteln. Zur Reduzierung der Iterationsschritte wird dabei als Startwert für TH_i das auf die nächste, ganzzahlige Ausprägung abgerundete Ergebnis nach (3-15) verwendet.³³⁸ In

³³⁴ Vgl. zu $A(TH_i)$ Formel (3-10).

³³⁵ Vgl. BOGASCHEWSKY, R.; BUSCHER, U.; LINDNER, G., 1999, S. 40.

³³⁶ Bei den ausgehend von (3-12) vorgenommenen Modifikationen der Kostenfunktion handelt es sich hinsichtlich der Konvexität ausschließlich um Positivkombinationen, so dass diese Eigenschaft bezüglich der Planungsparameter auf (4-14) übergeht (vgl. hierzu auch die Ausführungen in Anlage B).

³³⁷ Vgl. Algorithmus 1 sowie zur Konvexität von (4-16) die Anmerkungen zu (3-14) in Kapitel 3.3 (Seite 61). Das Summenzeichen in (4-16) kann dabei entfallen.

³³⁸ Dies entspricht dem modifizierten Optimierungsansatz „ALGORITHMUS I“ von BOGASCHEWSKY, R.; BUSCHER, U.; LINDNER, G., 1999; vgl. auch Kapitel 3.3.

Verbindung mit den korrespondierenden Verbrauchszeiten $t_{v,i,opt}(TH_{opt}^{GZ})$ nach (4–15) ist somit eine zunächst vorläufige Losgrößenpolitik determiniert, deren kumulierte Bruttoauslastung jedoch noch bestimmt und bezüglich Bedingung (2–4) geprüft werden muss. Wird diese Restriktion eingehalten, so entspricht die vorläufige der endgültigen Lösung. Andernfalls sind die Losreichweiten durch eine explizite Berücksichtigung der Rüstzeiten entsprechend anzupassen, wobei λ wiederum Bedingung (4–18) genügen muss:³³⁹

$$t_{v,i} = \sqrt{\frac{k_{R,i} + TH_i \cdot k_{T,i} + \lambda \cdot t_{R,i}}{h_i^{GY}(TH_i)}} \quad (4-17)$$

$$\sum_{i=1}^I t_{R,i} \cdot \sqrt{\frac{h_i^{GY}(TH_i)}{k_{R,i} + TH_i \cdot k_{T,i} + \lambda \cdot t_{R,i}}} = 1 - \sum_{i=1}^I \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}} \quad (4-18)$$

Aufgrund der über diese Gleichungen bestehenden Interdependenzen zwischen den Losgrößenpolitiken der einzelnen Produkte³⁴⁰ wird zur Ermittlung einer konkreten Lösung wiederum ein Optimierungsverfahren basierend auf der Funktion „NMinimize“ in WOLFRAM MATHEMATICA (vgl. Anlage F) herangezogen. Dabei wird – ausgehend von den Transporthäufigkeiten der vorläufigen, unrestringierten Lösung – zunächst ein Wert für λ bestimmt, der (4–18) erfüllt. Die korrespondierenden Startwerte für die Verbrauchszeiten ergeben sich ferner gemäß (4–17).

Einheitliche Transporthäufigkeit

Die Lösungsfindung entspricht in diesem Fall im Wesentlichen der zuvor beschriebenen Vorgehensweise bei sortenindividueller Transporthäufigkeit, weshalb sich die folgenden Ausführungen auf die Darstellung der Funktionsgleichungen und Unterschiede zum vorherigen Abschnitt konzentrieren. Unter Berücksichtigung von $TH_i = TH$ folgt aus (4–14) die Gesamtkostenfunktion (4–19), aus der wiederum Formel (4–20) zur Bestimmung der optimalen, unrestringierten und produktindividuellen Verbrauchszeiten abgeleitet werden kann.³⁴¹

³³⁹ Die Vorgehensweise ist analog zu vorhergehenden Fällen (vgl. bspw. Formeln (4–6) und (4–7) oder (4–12) und (4–13).

³⁴⁰ Vgl. hierzu auch die Erläuterungen im Fall gleich großer Teillose auf Seite 72.

³⁴¹ Zum Nachweis der Konvexität von (4–19) vgl. die Ausführungen in Anlage B.

$$K^{GY}(t_{v,i}, TH) = \sum_{i=1}^I h_i^{GY}(TH) \cdot t_{v,i} + \sum_{i=1}^I \frac{k_{R,i} + TH \cdot k_{T,i}}{t_{v,i}} \quad (4-19)$$

$$t_{v,i,opt}(TH) = \sqrt{\frac{k_{R,i} + TH \cdot k_{T,i}}{h_i^{GY}(TH)}} \quad (4-20)$$

Wird ferner (4-20) in (4-19) eingesetzt, so ergibt sich – analog zu (4-16) – die ausschließlich von TH abhängige, kontinuierliche Gesamtkostenfunktion (4-21), die wiederum unter Anwendung des Verfahrens von Goyal³⁴² zur Bestimmung der kostenoptimalen, einheitlichen Transporthäufigkeit herangezogen werden kann:

$$K^{GY}(TH) = 2 \cdot \sum_{i=1}^I \sqrt{h_i^{GY}(TH) \cdot (k_{R,i} + TH \cdot k_{T,i})} \quad (4-21)$$

Dabei ist es zur Reduzierung der Iterationsschritte möglich, das Minimum der nächsten, abgerundet ganzzahligen Ausprägungen der Ergebnisse nach (3-15) als Startwert für TH zu verwenden.³⁴³ Ist die optimale Transporthäufigkeit ermittelt, so ergeben sich die korrespondierenden Verbrauchszeiten nach (4-20). Bei Einhaltung der maximalen Bruttoauslastung (Formel (2-4)) entspricht dies der endgültigen Lösung. Andernfalls muss wiederum durch explizite Berücksichtigung der Rüstzeiten ein Wert für λ bestimmt werden, der (4-22) genügt und eine entsprechende Anpassung der Losreichweiten gemäß (4-23) ermöglicht:

$$\sum_{i=1}^I t_{R,i} \cdot \sqrt{\frac{h_i^{GY}(TH)}{k_{R,i} + TH \cdot k_{T,i} + \lambda \cdot t_{R,i}}} = 1 - \sum_{i=1}^I \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}} \quad (4-22)$$

$$t_{v,i} = \sqrt{\frac{k_{R,i} + TH \cdot k_{T,i} + \lambda \cdot t_{R,i}}{h_i^{GY}(TH)}} \quad (4-23)$$

Die Ermittlung konkreter Lösungen ist auch für diesen Fall in WOLFRAM MATHEMATICA mittels der Funktion „NMinimize“ (vgl. Anlage F) implementiert.

³⁴² Vgl. Algorithmus 1 sowie zur Konvexität von (4-21) die Anmerkungen zu (3-14) in Kapitel 3.3 (Seite 61).

³⁴³ Dies entspricht dem Minimum der sortenindividuellen Startwerte für die Transporthäufigkeit nach dem modifizierten Optimierungsansatz „ALGORITHMUS I“ von BOGASCHEWSKY, R.; BUSCHER, U.; LINDNER, G., 1999; vgl. auch Kapitel 3.3.

4.3 Common Cycle Modell

4.3.1 Gleich große Teillöse

Die folgenden Ausführungen basieren inhaltlich zunächst im Wesentlichen auf der grundlegenden Idee des Modellansatzes von BUSCHER/LINDNER³⁴⁴ zur expliziten Berücksichtigung gleich großer Transportlöse im CCM. Die Darstellung wird allerdings an die bisherige Betrachtung angepasst, so dass die Gesamtkosten je Zeiteinheit in Abhängigkeit von der Losreichweite und der Transporthäufigkeit formuliert werden.³⁴⁵ Ferner erfolgt eine Neuinterpretation und Weiterentwicklung des von BUSCHER/LINDNER vorgeschlagenen Algorithmus zur Ermittlung der optimalen Losgrößenpolitik sowie die Erweiterung des Modells um die Möglichkeit sortenindividuell planbarer Transporthäufigkeiten. Die Common-Cycle-Lösung dient des Weiteren als Referenz im Sinne einer oberen Kostenschranke.³⁴⁶

Einheitliche Transporthäufigkeit

Die grundlegende Gesamtkostenfunktion ergibt sich aus (4–8) durch Berücksichtigung von $t_{v,i} = t_v$:

$$K^{SZ}(t_v, TH) = t_v \cdot \sum_{i=1}^I h_i^{SZ}(TH) + \frac{1}{t_v} \cdot \sum_{i=1}^I (k_{R,i} + TH \cdot k_{T,i}) \quad (4-24)$$

Durch partielles Ableiten, Nullsetzen und Umstellen ergeben sich wiederum folgende Bestimmungsgleichungen:³⁴⁷

$$t_{v,opt}(TH) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^I (k_{R,i} + TH \cdot k_{T,i})}{\sum_{i=1}^I h_i^{SZ}(TH)}} \quad (4-25)$$

³⁴⁴ Vgl. BUSCHER, U.; LINDNER, G., 2000a.

³⁴⁵ In der vorgenannten Quelle werden die Gesamtkosten für einen gegebenen Planungszeitraum in Abhängigkeit von der Auflage- und Transporthäufigkeit betrachtet.

³⁴⁶ Vgl. Kapitel 2.3.2.

³⁴⁷ Zum Nachweis der Konvexität von (4–24) vgl. im grundlegenden Fall BUSCHER, U.; LINDNER, G., 2000a, S. 48 ff. bzw. im speziellen die Ausführungen in Anlage B.

$$TH_{\text{opt}}(t_v) = t_v \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^I \frac{c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2}{x_{p,i}}}{\sum_{i=1}^I k_{T,i}}} \quad (4-26)$$

Die ausschließlich von TH abhängige, kontinuierliche Gesamtkostenfunktion kann anschließend durch Einsetzen von (4-25) in (4-24) ermittelt werden:

$$K^{\text{SZ}}(\text{TH}) = 2 \sqrt{\sum_{i=1}^I h_i^{\text{SZ}}(\text{TH}) \cdot \sum_{i=1}^I (k_{R,i} + \text{TH} \cdot k_{T,i})} \quad (4-27)$$

Wird TH in (4-25) durch (4-26) substituiert, so resultiert daraus Ausdruck (4-28) zur Bestimmung der optimalen, unrestringierten Verbrauchszeit.³⁴⁸ Dieses, bei gleichzeitiger Realisierung der optimalen Transporthäufigkeit, globale Minimum der Gesamtkostenfunktion (4-24) entspricht Formel (2-9)³⁴⁹ und nimmt damit denselben Wert an wie bei „offener Fertigung“:

$$t_{v,\text{opt}}(\text{TH}_{\text{opt}}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^I k_{R,i}}{\sum_{i=1}^I h_i^o}} \quad (4-28)$$

Dementsprechend ergibt sich aus der Kombination von (4-26) mit (4-28) die korrespondierende, global optimale und im Allgemeinen reellwertige Transporthäufigkeit:

$$TH_{\text{opt}}(t_{v,\text{opt}}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^I k_{R,i}}{\sum_{i=1}^I h_i^o}} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^I \frac{c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2}{x_{p,i}}}{\sum_{i=1}^I k_{T,i}}} \quad (4-29)$$

Um die Einhaltung der maximalen Bruttoauslastung im CCM zu gewährleisten, muss die für alle Produkte gemeinsame Losreichweite folgende Mindestlänge aufweisen:³⁵⁰

$$t_v \geq \frac{\sum_{i=1}^I t_{R,i}}{1 - \sum_{i=1}^I \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}} \quad (4-30)$$

Eine dieser Restriktion genügende, kostenminimierende Losgrößenpolitik kann wie folgt ermittelt werden:

³⁴⁸ Zur Umformung der Bestimmungsgleichung vgl. Anlage A.

³⁴⁹ Vgl. Kapitel 2.3.2.

³⁵⁰ Vgl. auch Formel (2-10) in Kapitel 2.3.2.

Algorithmus 2: Ermittlung der optimalen Losgrößenpolitik bei sorteneinheitlicher Anzahl gleich großer Teillöse im CCM³⁵¹

Schritt 1: Setze $t_v = \max \left\{ \underbrace{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^I k_{R,i}}{\sum_{i=1}^I h_i^o}}}_{(4-28)} ; \underbrace{\frac{\sum_{i=1}^I t_{R,i}}{1 - \sum_{i=1}^I \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}}}_{(4-30)} \right\}$ und berechne $TH_{\text{opt}}(t_v)$

nach (4–26). Ist das Ergebnis ganzzahlig, setze $TH^{\text{gz}} = TH_{\text{opt}}(t_v)$ und gehe zu Schritt 4. Sonst gehe zu Schritt 2.

Schritt 2: Bestimme die benachbarten, ganzzahligen Transporthäufigkeiten $TH_{\text{ab}}^{\text{gz}} = \lfloor TH_{\text{opt}}(t_v) \rfloor$ und $TH_{\text{auf}}^{\text{gz}} = \lceil TH_{\text{opt}}(t_v) \rceil$ sowie die zugehörigen

Losreichweiten $t_{v,\text{ab}} = \max \left\{ \underbrace{t_{v,\text{opt}}(TH_{\text{ab}}^{\text{gz}})}_{(4-25)} ; \frac{\sum_{i=1}^I t_{R,i}}{1 - \sum_{i=1}^I \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}} \right\}$ und

$$t_{v,\text{auf}} = \max \left\{ \underbrace{t_{v,\text{opt}}(TH_{\text{auf}}^{\text{gz}})}_{(4-25)} ; \frac{\sum_{i=1}^I t_{R,i}}{1 - \sum_{i=1}^I \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}} \right\}.$$

Schritt 3: Falls nach (4–24) $K^{\text{SZ}}(t_{v,\text{ab}}, TH_{\text{ab}}^{\text{gz}}) \leq K^{\text{SZ}}(t_{v,\text{auf}}, TH_{\text{auf}}^{\text{gz}})$ gilt, dann setze $t_v = t_{v,\text{ab}}$ und $TH^{\text{gz}} = TH_{\text{ab}}^{\text{gz}}$, sonst setze $t_v = t_{v,\text{auf}}$ und $TH^{\text{gz}} = TH_{\text{auf}}^{\text{gz}}$.

Schritt 4: Falls $t_v > \frac{\sum_{i=1}^I t_{R,i}}{1 - \sum_{i=1}^I \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}}$, ist mit t_v und TH^{gz} die optimale Losgrößen-

politik determiniert und das Verfahren endet. Für $t_v = \frac{\sum_{i=1}^I t_{R,i}}{1 - \sum_{i=1}^I \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}}$

werden $TH_{\text{ref}}^{\text{gz}} = TH^{\text{gz}}$ sowie die nach (4–24) korrespondierenden Gesamtkosten $K_{\text{ref}}^{\text{SZ}}$ als Referenzlösung festgehalten.

Schritt 5: Setze $TH^{\text{gz}} = TH^{\text{gz}} + 1$ und bestimme $K^{\text{SZ}}(TH^{\text{gz}})$ nach (4–27) sowie $t_{v,\text{opt}}(TH^{\text{gz}})$ gemäß (4–25).

³⁵¹ Der Grundgedanke des Lösungsalgorithmus basiert auf den Ausführungen von BUSCHER, U.; LINDNER, G., 2000a, S. 18 ff. Die einzelnen Verfahrensschritte und der Ablauf sind jedoch strukturell und inhaltlich angepasst bzw. überarbeitet.

Schritt 6: Falls $\underbrace{K^{SZ}(\overline{TH}^{gZ})}_{(4-27)} \geq K_{ref}^{SZ}$ beende das Verfahren mit den Optimalwerten $t_v = \frac{\sum_{i=1}^I t_{R,i}}{1 - \sum_{i=1}^I \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}}$ und $\overline{TH}^{gZ} = \overline{TH}_{ref}^{gZ}$. Falls $\underbrace{K^{SZ}(\overline{TH}^{gZ})}_{(4-27)} < K_{ref}^{SZ}$ und $\underbrace{t_{v,opt}(\overline{TH}^{gZ})}_{(4-25)} \geq \frac{\sum_{i=1}^I t_{R,i}}{1 - \sum_{i=1}^I \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}}$ beende das Verfahren mit den Optimalwerten $t_v = t_{v,opt}(\overline{TH}^{gZ})$ und \overline{TH}^{gZ} . Sonst gehe zu Schritt 5.

Neuinterpretation und Weiterentwicklung des bisherigen Lösungsverfahrens

Ergänzend zu den Ausführungen von BUSCHER/LINDNER soll die dem Algorithmus zugrunde liegende Planungssituation noch einmal graphisch aus einer anderen Perspektive betrachtet werden. Abbildung 12 zeigt zum einen die kontinuierliche Kostenfunktion $K^{SZ}(\overline{TH})$, bei der die zu jeder Transporthäufigkeit günstigste Verbrauchszeit bereits implizit berücksichtigt ist (vgl. (4-27)) und die demnach das absolute Kostenminimum zu jedem gegebenen \overline{TH} -Wert darstellt.

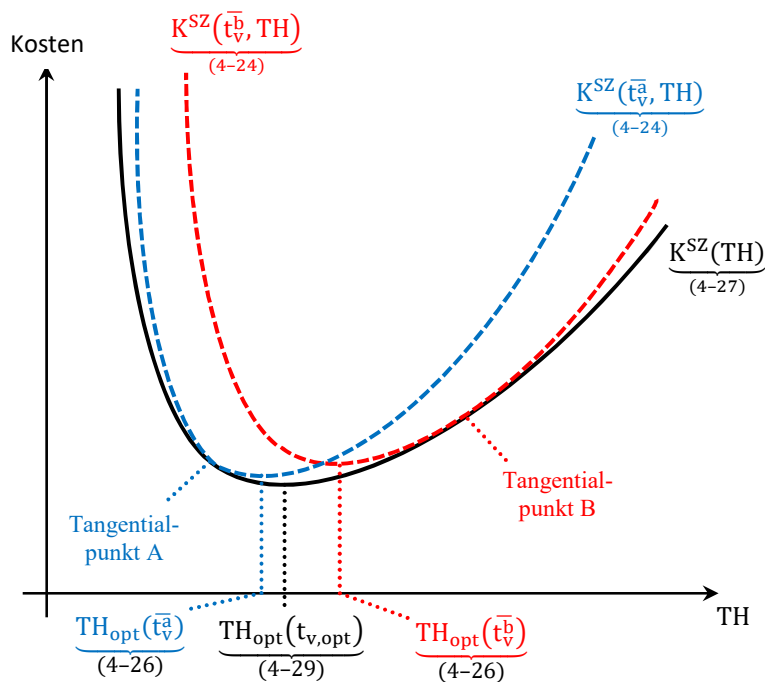


Abbildung 12: Verlauf der Kostenfunktion $K^{SZ}(t_v, \overline{TH})$ bei optimaler und restringierter Verbrauchszeit

Zum anderen sind exemplarisch zwei Funktionsverläufe bei konstanten, unterschiedlichen Losreichweiten \bar{t}_v abgebildet. Dabei repräsentieren \bar{t}_v^a und \bar{t}_v^b die jeweilige Mindestlänge der Verbrauchszeit zur Einhaltung der maximalen Bruttoauslastung für verschiedene Parameterwerte der Rüstzeiten $t_{R,i}$ (vgl. (4–30)).³⁵² In anderen Worten: die beiden farbig dargestellten Funktionsverläufe stellen die Kosten in Abhängigkeit der Transporthäufigkeit für zwei Fälle unterschiedlicher Bruttoauslastung dar, wobei $\bar{t}_v^a < \bar{t}_v^b$ gilt. Für die folgenden Erläuterungen soll die Ganzzahligkeitsanforderung an die Transporthäufigkeit vorerst unberücksichtigt bleiben.

Zunächst ist zu konstatieren, dass die einer Bruttoauslastung von eins entsprechende Verbrauchszeit \bar{t}_v im jeweiligen Tangentialpunkt mit der optimalen Losreichweite $t_{v,opt}(TH)$ nach (4–25) korrespondiert. Links des Tangentialpunkts – also für kleinere Transporthäufigkeiten – gilt hingegen $t_{v,opt}(TH) < \bar{t}_v$ und vice versa rechts des Tangentialpunkts $t_{v,opt}(TH) > \bar{t}_v$. Dieser Sachverhalt ist darin begründet, dass $t_{v,opt}(TH)$ mit größer (kleiner) werdender Transporthäufigkeit streng monoton steigt (fällt).³⁵³ Liegt der Berührungspunkt (wie im Fall A) links von $TH_{opt}(t_{v,opt})$, so stellt demnach das globale Minimum der $K^{SZ}(TH)$ eine zulässige und damit die optimale Lösung dar. Tritt hingegen Situation B ein, so ist diese unrestringierte Losgrößenpolitik aufgrund der Verletzung von Bedingung (4–30) nicht realisierbar. In diesem Fall repräsentiert $TH_{opt}(\bar{t}_v^b)$ – also das globale Minimum der $K^{SZ}(\bar{t}_v^b, TH)$ -Funktion – die kostengünstigste, zulässige Lösung. Fallunabhängig sei zur Lage des absoluten Minimums der restringierten Kostenfunktion $TH_{opt}(\bar{t}_v)$ noch angemerkt, dass dieses stets zwischen dem Tangentialpunkt und $TH_{opt}(t_{v,opt})$ liegen muss. Die Begründung hierfür ist für beide Szenarien in umgekehrter Weise äquivalent: Liegt Fall A bzw. B vor, so ist der Zusammenhang relevant, dass

³⁵² Grundsätzlich können auch zwei generell verschiedene Datensätze betrachtet werden, allerdings würde dies dann die Abbildung einer weiteren kontinuierlichen Kostenfunktion $K^{SZ}(TH)$ mit dementsprechend abweichendem Verlauf erfordern. Für die weitere Argumentationsführung ist dies allerdings unerheblich.

³⁵³ Wird (4–25) auf die von TH abhängigen Komponenten reduziert $\left(\sqrt{\frac{TH \sum_{i=1}^I k_{T,i}}{\frac{1}{TH} \sum_{i=1}^I \frac{c_{L,i} \cdot x_{V,i}^2}{x_{p,i}}}} \right)$, so ist ohne weiteres ersichtlich, dass der Zähler des Ausdrucks mit steigender Transporthäufigkeit größer und der Nenner kleiner wird. Dies belegt, dass die optimale Verbrauchszeit positiv mit TH korreliert ist. Für den Fall dynamischer Teillose vgl. LINDNER, G., 2001, S. 35 ff.

für jede Transporthäufigkeit rechts bzw. links des Tangentialpunkts $\bar{t}_v^a < t_{v,opt}(TH)$ bzw. $\bar{t}_v^b > t_{v,opt}(TH)$ und somit $TH_{opt}(\bar{t}_v^a) < TH_{opt}(t_{v,opt})$ bzw. $TH_{opt}(\bar{t}_v^b) > TH_{opt}(t_{v,opt})$ gilt.

Bei der Forderung nach einer ganzzahligen Transporthäufigkeit gilt es weiterhin Folgendes zu beachten. Für den Fall A wird ein Kostenvergleich der beiden benachbarten, ganzzahligen Ausprägungen von $TH_{opt}(t_{v,opt})$ notwendig, wobei für den kleineren Wert TH_{ab}^{gz} zu prüfen ist, ob die nach (4–25) korrespondierende Verbrauchszeit der maximalen Bruttoauslastung nach Bedingung (4–30) genügt. Ist dies der Fall, so befindet sich TH_{ab}^{gz} rechts des Tangentialpunkts A und $t_{v,opt}(TH_{ab}^{gz})$ stellt eine zulässige Lösung dar. Liegt TH_{ab}^{gz} hingegen links des Tangentialpunkts A, so muss zur Einhaltung von (4–30) die Losreichweite \bar{t}_v^a realisiert werden. Für diese restringierte Verbrauchszeit kann die optimale Transporthäufigkeit wiederum grundsätzlich durch einen Kostenvergleich der benachbarten, ganzzahligen Ausprägungen von $TH_{opt}(\bar{t}_v^a)$ ermittelt werden.³⁵⁴ Dies ist allerdings nicht zwingend notwendig, da kein anderer als der bisherige Wert für TH_{ab}^{gz} relevant sein kann, was wie folgt zu begründen ist. TH_{ab}^{gz} wird durch Abrunden von $TH_{opt}(t_{v,opt})$ auf die nächstkleinere, ganze Zahl ermittelt und entspricht unter den gegebenen Umständen demnach gleichzeitig der dem globalen Minimum von $K^{SZ}(\bar{t}_v^a, TH)$ benachbarten, kleineren, ganzzahligen Transporthäufigkeit. In anderen Worten: im Intervall von $TH_{opt}(t_{v,opt})$ bis TH_{ab}^{gz} liegen sowohl die reellwertige Transporthäufigkeit $TH_{opt}(\bar{t}_v^a)$ als auch der Tangentialpunkt A, allerdings keine weitere ganzzahlige Transporthäufigkeit außer TH_{ab}^{gz} selbst. Da für den betrachteten Fall A stets $TH_{opt}(\bar{t}_v^a) < TH_{opt}(t_{v,opt})$ gilt, ist somit ebenfalls sichergestellt, dass die nächstgrößere, ganzzahlige Ausprägung von $TH_{opt}(\bar{t}_v^a)$ dem Wert für TH_{auf}^{gz} entspricht, der sich bereits eingangs durch Aufrunden von $TH_{opt}(t_{v,opt})$ ergibt und eine zulässige, unrestringierte Lösung auf $K^{SZ}(TH)$ darstellt.³⁵⁵ Diese Erläuterungen führen letztendlich zu dem Schluss, dass sich die Lösungssuche für

³⁵⁴ BUSCHER/LINDNER setzen dies um, indem sie die zu \bar{t}_v^a korrespondierende, ganzzahlige, optimale Transporthäufigkeit nochmals separat bestimmen (vgl. BUSCHER, U.; LINDNER, G., 2000a, S. 15).

³⁵⁵ Das Ergebnis dieser Argumentation findet bereits in den Schritten 2 bzw. 3 von Algorithmus 2 Anwendung und stellt damit eine geringfügige, aber explizite Abweichung von der bei BUSCHER/LINDNER beschriebenen Vorgehensweise dar.

Fall A auf eine bedingte Gegenüberstellung der folgenden Kostenpaare begrenzen lässt: Falls TH_{ab}^{gz} rechts des Tangentialpunkts A liegt, werden $K^{SZ}(TH_{auf}^{gz})$ und $K^{SZ}(TH_{ab}^{gz})$ einem Vergleich unterzogen, sonst $K^{SZ}(TH_{auf}^{gz})$ und $K^{SZ}(\bar{t}_v, TH_{ab}^{gz})$.

Für das Szenario B bringt die Einschränkung auf ganzzahlige Transporthäufigkeiten vergleichbare Konsequenzen mit sich. Den Ausgangspunkt bildet hier die reellwertige, optimale Transporthäufigkeit bei restringierter Verbrauchszeit $TH_{opt}(\bar{t}_v)$, zu der zunächst die benachbarten, ganzzahligen Ausprägungen TH_{ab}^{gz} und TH_{auf}^{gz} ermittelt werden. Für TH_{ab}^{gz} können die Kosten $K^{SZ}(\bar{t}_v, TH_{ab}^{gz})$ in keinem Falle unterschritten werden, da eine kostengünstigere Verbrauchszeit – insbesondere $t_{v,opt}(TH_{ab}^{gz})$ – kleiner sein müsste als die zur Einhaltung der Bruttoauslastung notwendige Mindestlänge \bar{t}_v . Für TH_{auf}^{gz} ist wiederum zu unterscheiden, ob der ermittelte Wert links oder rechts des Tangentialpunkts B liegt. Tritt die erstgenannte Situation ein, so besteht auch hier keine Möglichkeit zur Kostensenkung durch eine Annäherung der Losreichweite an den Optimalwert $t_{v,opt}(TH_{auf}^{gz})$, da dies wiederum Bedingung (4–30) verletzen würde. Befindet sich TH_{auf}^{gz} rechts des Tangentialpunkts B, so übersteigt die korrespondierende Verbrauchszeit $t_{v,opt}(TH_{auf}^{gz})$ die Mindestlänge \bar{t}_v und repräsentiert somit eine zulässige und kostengünstigere Lösung als $K^{SZ}(\bar{t}_v, TH_{auf}^{gz})$. Zusammenfassend lässt sich somit auch die Lösungsermittlung für Situation B auf folgenden, fallabhängigen Kostenvergleich reduzieren: Liegt TH_{auf}^{gz} links des Tangentialpunkts B, so werden $K^{SZ}(\bar{t}_v, TH_{ab}^{gz})$ und $K^{SZ}(\bar{t}_v, TH_{auf}^{gz})$ einander gegenübergestellt, sonst $K^{SZ}(\bar{t}_v, TH_{ab}^{gz})$ und $K^{SZ}(TH_{auf}^{gz})$. Weitere, kostengünstigere Alternativen existieren nicht. Damit wird die Schleife zwischen den Schritten 5 und 6 von Algorithmus 2 verzichtbar. Allerdings ist hierfür die Kenntnis des Werts der Transporthäufigkeit im Tangentialpunkt TH_{tan} erforderlich, dessen Ermittlung Gegenstand der folgenden Ausführungen ist.

Ein anhand von Abbildung 12 offensichtliches Kriterium für den Tangentialpunkt ist die Übereinstimmung der Funktionswerte $K^{SZ}(TH)$ und $K^{SZ}(\bar{t}_v, TH)$. Diese ist wiederum dadurch bedingt, dass die restringierte Verbrauchszeit \bar{t}_v in diesem Punkt zugleich der optimalen Losreichweite $t_{v,opt}(TH)$ entspricht. Demnach gilt für $TH = TH_{tan}$:

$$\bar{t}_v = \underbrace{\frac{\sum_{i=1}^I t_{R,i}}{1 - \sum_{i=1}^I \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}}}_{(4-30)} = t_{v,\text{opt}}(\text{TH}_{\text{tan}}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^I (k_{R,i} + \text{TH}_{\text{tan}} \cdot k_{T,i})}{\sum_{i=1}^I h_i^{\text{SZ}}(\text{TH}_{\text{tan}})}} \quad (4-25)$$

$$\Rightarrow \underbrace{\left(\frac{\sum_{i=1}^I t_{R,i}}{1 - \sum_{i=1}^I \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}} \right)^2}_{\bar{t}_v^2} = \frac{\sum_{i=1}^I (k_{R,i} + \text{TH}_{\text{tan}} \cdot k_{T,i})}{\sum_{i=1}^I \left[\underbrace{\frac{1}{2} \cdot c_{L,i} \cdot x_{v,i} \cdot \left(1 - \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}\right)}_{h_i^0} + \frac{c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2}{\text{TH}_{\text{tan}} \cdot x_{p,i}} \right]}$$

$$\Rightarrow \bar{t}_v^2 = \frac{\sum_{i=1}^I k_{R,i} + \text{TH}_{\text{tan}} \cdot \sum_{i=1}^I k_{T,i}}{\sum_{i=1}^I h_i^0 + \frac{1}{\text{TH}_{\text{tan}}} \cdot \sum_{i=1}^I \underbrace{\frac{c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2}{x_{p,i}}}_{\alpha_i}}$$

$$\Rightarrow \bar{t}_v^2 \cdot \sum_{i=1}^I h_i^0 + \frac{\bar{t}_v^2}{\text{TH}_{\text{tan}}} \cdot \sum_{i=1}^I \alpha_i = \sum_{i=1}^I k_{R,i} + \text{TH}_{\text{tan}} \cdot \sum_{i=1}^I k_{T,i} \quad | \cdot \text{TH}_{\text{tan}}$$

$$\Rightarrow 0 = \text{TH}_{\text{tan}}^2 \cdot \sum_{i=1}^I k_{T,i} + \text{TH}_{\text{tan}} \cdot \left(\sum_{i=1}^I k_{R,i} - \bar{t}_v^2 \cdot \sum_{i=1}^I h_i^0 \right) - \bar{t}_v^2 \cdot \sum_{i=1}^I \alpha_i$$

Grundsätzlich existieren nach dieser quadratischen Gleichung zwei Lösungen für TH_{tan} , von denen im vorliegenden Fall allerdings lediglich die nicht negative Ausprägung relevant ist:

$$\text{TH}_{\text{tan}} = \frac{\bar{t}_v^2 \cdot \sum_{i=1}^I h_i^0 - \sum_{i=1}^I k_{R,i} + \sqrt{\left(\sum_{i=1}^I k_{R,i} - \bar{t}_v^2 \cdot \sum_{i=1}^I h_i^0 \right)^2 - 4 \sum_{i=1}^I k_{T,i} \cdot \sum_{i=1}^I \alpha_i}}{2 \cdot \sum_{i=1}^I k_{T,i}}$$

Durch Rücksubstitution von α_i ergibt sich letztendlich eine allgemeine Bestimmungsgleichung für die Transporthäufigkeit im Tangentialpunkt:

$$\begin{aligned} \text{TH}_{\text{tan}}(\bar{t}_v) &= \frac{\bar{t}_v^2 \cdot \sum_{i=1}^I h_i^0 - \sum_{i=1}^I k_{R,i}}{2 \sum_{i=1}^I k_{T,i}} + \dots \\ &\dots + \frac{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^I k_{R,i} - \bar{t}_v^2 \cdot \sum_{i=1}^I h_i^0 \right)^2 - 4 \cdot \sum_{i=1}^I k_{T,i} \cdot \sum_{i=1}^I \frac{c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2}{x_{p,i}}}}{2 \cdot \sum_{i=1}^I k_{T,i}} \end{aligned} \quad (4-31)$$

$$\text{mit } \bar{t}_v = \frac{\sum_{i=1}^I t_{R,i}}{1 - \sum_{i=1}^I \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}}$$

Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse kann eine neue – im Gegensatz zu Algorithmus 2, der im Wesentlichen auf den Ausführungen von BUSCHER/LINDNER basiert – verkürzte Vorgehensweise zur Ermittlung der optimalen Losgrößenpolitik formuliert werden:

Algorithmus 3: Optimierte Lösungsfindung bei sorteneinheitlicher Anzahl gleich großer Teillöse im CCM

Schritt 1: Setze $\bar{t}_v = \frac{\sum_{i=1}^I t_{R,i}}{1 - \sum_{i=1}^I \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}}$ und berechne $TH_{\text{opt}}(t_{v,\text{opt}})$ nach (4–29) sowie

$TH_{\text{tan}}(\bar{t}_v)$ nach (4–31). Falls $TH_{\text{tan}} < TH_{\text{opt}}(t_{v,\text{opt}})$, gehe zu Schritt 2, sonst gehe zu Schritt 3.

Schritt 2: Bestimme die benachbarten, ganzzahligen Transporthäufigkeiten $TH_{\text{ab}}^{\text{gz}} = \lfloor TH_{\text{opt}}(t_{v,\text{opt}}) \rfloor$ und $TH_{\text{auf}}^{\text{gz}} = \lceil TH_{\text{opt}}(t_{v,\text{opt}}) \rceil$.

- Falls $TH_{\text{ab}}^{\text{gz}} \geq TH_{\text{tan}}$ berechne $K^{\text{SZ}}(TH_{\text{auf}}^{\text{gz}})$ sowie $K^{\text{SZ}}(TH_{\text{ab}}^{\text{gz}})$ nach (4–27) und setze $TH^{\text{gz}} = TH_{\text{auf}}^{\text{gz}}$, falls $K^{\text{SZ}}(TH_{\text{auf}}^{\text{gz}}) < K^{\text{SZ}}(TH_{\text{ab}}^{\text{gz}})$, sonst setze $TH^{\text{gz}} = TH_{\text{ab}}^{\text{gz}}$.
- Falls $TH_{\text{ab}}^{\text{gz}} < TH_{\text{tan}}$ berechne $K^{\text{SZ}}(TH_{\text{auf}}^{\text{gz}})$ nach (4–27) sowie $K^{\text{SZ}}(\bar{t}_v, TH_{\text{ab}}^{\text{gz}})$ nach (4–24) und setze $TH^{\text{gz}} = TH_{\text{auf}}^{\text{gz}}$, falls $K^{\text{SZ}}(TH_{\text{auf}}^{\text{gz}}) < K^{\text{SZ}}(\bar{t}_v, TH_{\text{ab}}^{\text{gz}})$, sonst setze $TH^{\text{gz}} = TH_{\text{ab}}^{\text{gz}}$.

Gehe zu Schritt 4.

Schritt 3: Berechne $TH_{\text{opt}}(\bar{t}_v)$ nach (4–26) und ermittle die benachbarten, ganzzahligen Werte $TH_{\text{ab}}^{\text{gz}} = \lfloor TH_{\text{opt}}(\bar{t}_v) \rfloor$ und $TH_{\text{auf}}^{\text{gz}} = \lceil TH_{\text{opt}}(\bar{t}_v) \rceil$.

- Falls $TH_{\text{auf}}^{\text{gz}} < TH_{\text{tan}}$ berechne $K^{\text{SZ}}(\bar{t}_v, TH_{\text{ab}}^{\text{gz}})$ sowie $K^{\text{SZ}}(\bar{t}_v, TH_{\text{auf}}^{\text{gz}})$ nach (4–24) und setze $TH^{\text{gz}} = TH_{\text{auf}}^{\text{gz}}$, falls $K^{\text{SZ}}(\bar{t}_v, TH_{\text{auf}}^{\text{gz}}) < K^{\text{SZ}}(\bar{t}_v, TH_{\text{ab}}^{\text{gz}})$, sonst setze $TH^{\text{gz}} = TH_{\text{ab}}^{\text{gz}}$.
- Falls $TH_{\text{auf}}^{\text{gz}} \geq TH_{\text{tan}}$ berechne $K^{\text{SZ}}(TH_{\text{auf}}^{\text{gz}})$ nach (4–27) sowie $K^{\text{SZ}}(\bar{t}_v, TH_{\text{ab}}^{\text{gz}})$ nach (4–24) und setze $TH^{\text{gz}} = TH_{\text{auf}}^{\text{gz}}$, falls $K^{\text{SZ}}(TH_{\text{auf}}^{\text{gz}}) < K^{\text{SZ}}(\bar{t}_v, TH_{\text{ab}}^{\text{gz}})$, sonst setze $TH^{\text{gz}} = TH_{\text{ab}}^{\text{gz}}$.

Schritt 4: Die optimale Lösung ist determiniert durch die Transporthäufigkeit

$$TH^{gz} \text{ und die Verbrauchszeit } t_v = \max \left\{ \underbrace{t_{v,opt}(TH^{gz})}_{(4-25)} ; \bar{t}_v \right\}.$$

Damit ist Algorithmus 3 schleifenfrei und auf lediglich zwei Fallunterscheidungen sowie einen Kostenvergleich beschränkt, was sich in Relation zu Algorithmus 2 als effizienter darstellt.

Sortenindividuelle Transporthäufigkeiten

Ist für jedes Produkt eine individuelle Transporthäufigkeit realisierbar, so ergibt sich die Funktion der entscheidungsrelevanten Gesamtkosten unter Berücksichtigung von $TH = TH_i$ aus (4-24):

$$K^{SZ}(t_v, TH_i) = t_v \cdot \sum_{i=1}^I h_i^{SZ}(TH_i) + \frac{1}{t_v} \cdot \sum_{i=1}^I (k_{R,i} + TH_i \cdot k_{T,i}) \quad (4-32)$$

Daraus lassen sich wie üblich die von der jeweils anderen Entscheidungsvariablen abhängigen Bestimmungsgleichungen der Optimalwerte für die Verbrauchszeit und die Transporthäufigkeit ableiten.³⁵⁶

$$t_{v,opt}(TH_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^I (k_{R,i} + TH_i \cdot k_{T,i})}{\sum_{i=1}^I h_i^{SZ}(TH_i)}} \quad (4-33)$$

$$TH_{i,opt}(t_v) = t_v \cdot \sqrt{\frac{c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2}{k_{T,i} \cdot x_{p,i}}} \quad (4-34)$$

Die Berücksichtigung von (4-34) in (4-33) führt wiederum – analog zum Fall bei einheitlicher Transporthäufigkeit (Formel (4-28)) – zu einer unrestringiert optimalen Losreichweite, die der bei „offener Fertigung“ (Formel (2-9)) entspricht.³⁵⁷

³⁵⁶ Damit erhöht sich die Anzahl der Entscheidungsvariablen im Vergleich zum Fall einer einheitlichen Transporthäufigkeit um $i - 1$. Zum Nachweis der Konvexität von (4-32) vgl. die Ausführungen in Anlage B.

$$t_{v,opt}(TH_{i,opt}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^I k_{R,i}}{\sum_{i=1}^I h_i^o}} \quad (4-35)$$

Wird (4-35) in (4-34) eingesetzt, so resultiert dementsprechend eine Formel für die global optimalen, unrestringierten Transporthäufigkeiten:

$$TH_i(t_{v,opt}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^I k_{R,i}}{\sum_{i=1}^I h_i^o}} \cdot \sqrt{\frac{c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2}{k_{T,i} \cdot x_{p,i}}} \quad (4-36)$$

Bei Berücksichtigung der annahmegemäßen Ganzzahligkeitsbeschränkung für alle TH_i , wirken sich diesbezüglich notwendige Abweichungen von den Ergebnissen nach (4-36) auf den Optimalwert der gemeinsamen Verbrauchszeit nach (4-33) aus. Diese unterliegt zur Einhaltung der maximalen Bruttoauslastung ebenfalls wieder der Mindestlängen-anforderung gemäß (4-30).³⁵⁸ Je nach Parameterkonstellation und Produktanzahl können sich daraus zahlreiche, hinsichtlich der Gesamtkosten zu vergleichende Kombinationen aus ganzzahligen Transporthäufigkeiten und einer optimal angepassten sowie zeitgleich Bedingung (4-30) genügenden Verbrauchszeit ergeben. Daher wird in diesem Fall für die Lösungsfindung wiederum auf das Optimierungsverfahren „NMinimize“ in WOLFRAM MATHEMATICA (vgl. Anlage F) zurückgegriffen. Für die gemeinsame Losreichweite wird dabei folgender Startwert übergeben, aus dem mittels (4-34) die initialen TH_i berechnet werden:

$$t_v = \max \left\{ \underbrace{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^I k_{R,i}}{\sum_{i=1}^I h_i^o}}}_{(4-35)} ; \underbrace{\frac{\sum_{i=1}^I t_{R,i}}{1 - \sum_{i=1}^I \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}}}_{(4-30)} \right\}$$

³⁵⁷ Die mathematischen Umformungen sind äquivalent zu den in Anlage A für (4-28) explizit ausgeführten Rechenschritten.

³⁵⁸ Soll bspw. zuerst die ganzzahlige Transporthäufigkeit von Produkt 1 durch einen Kostenvergleich des auf- bzw. abgerundeten, reellwertigen Ergebnisses von TH_1 ermittelt werden, so ist hierfür die Anpassung der gemeinsamen Verbrauchszeit nach (4-33) notwendig. Dies wiederum erfordert die Kenntnis der ganzzahligen Werte für die Transporthäufigkeiten aller anderen Produkte, für die allerdings zu diesem Zeitpunkt lediglich die in der Regel reellwertigen Ergebnisse gemäß (4-34) vorliegen.

4.3.2 Dynamische Teillosgrößen

In Anlehnung an die Ausführungen von BUSCHER/LINDNER zur Integration gleich großer Transportlose in das CCM³⁵⁹ entwickelt LINDNER³⁶⁰ einen entsprechenden Ansatz unter Berücksichtigung ungleich großer Teillose. Der Beweggrund besteht insbesondere darin, dass „aus einer Aufteilung eines Fertigungslose [sic!] in Transportlose, welche einer geometrischen Reihe folgen, niemals höhere entscheidungsrelevante Kosten resultieren, als dies bei Verwendung gleich großer Transportlose der Fall wäre“³⁶¹. Analog zum vorhergehenden Kapitel wird daher zunächst das Optimierungsverfahren von LINDNER erläutert und bezüglich des Potentials einer verkürzten Lösungsfindung analysiert. Anschließend erfolgt die Erweiterung des Modells hinsichtlich der Möglichkeit der Berücksichtigung sortenindividueller Transporthäufigkeiten.

Einheitliche Transporthäufigkeit

Durch Berücksichtigung von $t_{v,i} = t_v$ ergibt sich aus (4–19) die Funktion der entscheidungsrelevanten Gesamtkosten je Zeiteinheit:³⁶²

$$K^{GY}(t_v, TH) = t_v \cdot \sum_{i=1}^I h_i^{GY}(TH) + \frac{1}{t_v} \cdot \sum_{i=1}^I (k_{R,i} + TH \cdot k_{T,i}) \quad (4-37)$$

Hieraus lässt sich – durch partielles Ableiten nach t_v , Nullsetzen des Ergebnisses sowie entsprechendes Auflösen – die Bestimmungsgleichung für die optimale Verbrauchszeit in Abhängigkeit von der Transporthäufigkeit ermitteln:

$$t_{v,opt}(TH) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^I (k_{R,i} + TH \cdot k_{T,i})}{\sum_{i=1}^I h_i^{GY}(TH)}} \quad (4-38)$$

Für eine realisierbare Losgrößenpolitik muss diese wiederum der Bedingung einer maximalen Bruttoauslastung von 100% genügen und damit folgende Mindestlänge einhalten:

³⁵⁹ Vgl. Kapitel 4.3.1.

³⁶⁰ Vgl. LINDNER, G., 2001.

³⁶¹ LINDNER, G., 2001, S. 6. Vgl. zum Beweis der Aussage LINDNER, G., 2001, S. 28 f.

³⁶² Vgl. hierzu auch die alternative, aber äquivalente Darstellung der Kostenfunktion bei LINDNER, G., 2001, S. 13. Bezüglich der Konvexität von (4–37) hinsichtlich ihrer Variablen verweist LINDNER auf den in struktureller Form analogen Beweis von BOGASCHEWSKY, R.; BUSCHER, U.; LINDNER, G., 2000 (vgl. hierzu auch die Ausführungen in Anlage B).

$$(4-30) \quad t_v \geq \frac{\sum_{i=1}^I t_{R,i}}{1 - \sum_{i=1}^I \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}}$$

Die Ermittlung einer dieser Restriktion genügenden Optimallösung soll zunächst auf Basis der Ausführungen von LINDNER in ihren wesentlichen Schritten skizziert werden.³⁶³ Da – konträr zum Fall gleich großer Teillose – das globale Kostenminimum von (4–37) nicht direkt ermittelt werden kann,³⁶⁴ erfolgt die Bestimmung der ganzzahlig optimalen Transporthäufigkeit TH_{opt}^{gz} nach dem von GOYAL vorgeschlagenen, iterativen Lösungsverfahren (Algorithmus 1). Die dieser Vorgehensweise zugrundeliegende Kostenfunktion resultiert aus entsprechenden Umformungen nach dem Einsetzen von (4–38) in (4–37):

$$K^{GY}(TH) = 2 \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^I h_i^{GY}(TH) \cdot \sum_{i=1}^I (k_{R,i} + TH \cdot k_{T,i})} \quad (4-39)$$

Weist die nach (4–38) zu TH_{opt}^{gz} korrespondierende Verbrauchszeit $t_{v,opt}(TH_{opt}^{gz})$ eine gemäß (4–30) notwendige Mindestlänge auf, so kann die optimale Losgrößenpolitik realisiert werden und das Verfahren endet. Andernfalls wird eine zulässige Lösung ermittelt, indem auf Basis der Kostenfunktion (4–37) unter Berücksichtigung von $t_v = \bar{t}_v = \frac{\sum_{i=1}^I t_{R,i}}{1 - \sum_{i=1}^I \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}}$ erneut Algorithmus 1 zur Anwendung kommt.³⁶⁵ Dabei müssen

Transporthäufigkeiten kleiner TH_{opt}^{gz} nicht mehr in Betracht gezogen werden, da $\bar{t}_v > t_{v,opt}(TH_{opt}^{gz})$ gilt und somit die optimale Transporthäufigkeit für \bar{t}_v nicht kleiner sein kann als TH_{opt}^{gz} .³⁶⁶ Die resultierende Losgrößenpolitik aus \bar{t}_v und TH_{ref}^{gz} dient als Referenz für die weitere Suche nach kostenverbessernden Alternativen. Ist $t_{v,opt}(TH_{ref}^{gz})$ gemäß (4–38) größer oder gleich \bar{t}_v , so stellen TH_{ref}^{gz} und $t_{v,opt}(TH_{ref}^{gz})$ die restringiert optimale Lösung dar. Andernfalls wird – ausgehend von TH_{ref}^{gz} – die Transporthäufigkeit solange um eins erhöht bis die zugehörigen Kosten nach (4–39) die der Referenzlösung übersteigen (und letztere somit das Endergebnis darstellt) oder die gemäß (4–38)

³⁶³ Vgl. zu ausführlichen Erläuterungen und zum konkreten Algorithmus LINDNER, G., 2001, S. 16 ff.

³⁶⁴ Vgl. die Ausführungen in Kapitel 3.3 auf Seite 60.

³⁶⁵ LINDNER verwendet an dieser Stelle eine aus dem Kriterium des Kostenanstiegs abgeleitete Größe, die sogenannte „Vergleichsreichweite“ (vgl. hierzu LINDNER, G., 2001, S. 17).

³⁶⁶ Vgl. LINDNER, G., 2001, S. 18 bzw. zum mathematischen Nachweis des Zusammenhangs LINDNER, G., 2001, S. 35 ff.

korrespondierende Verbrauchszeit das Kriterium der Mindestlänge nach (4–30) erfüllt und daher eine günstigere Losgrößenpolitik als die Referenzlösung repräsentiert.

Die beschriebene Optimierungsprozedur ist strukturell eng angelehnt an das Lösungsverfahren von BUSCHER/LINDNER bei Berücksichtigung gleich großer Teillose.³⁶⁷ Dies wird insbesondere anhand der iterativen Suche nach kostenverbessernden Lösungen am Ende des Verfahrens deutlich, welche prinzipiell den Schritten 5 und 6 von Algorithmus 2 entspricht. LINDNER weist zudem darauf hin, dass sich gerade dieser „abschließende Teil des Optimierungsalgorithmus als recht aufwendig erweisen kann“³⁶⁸ und formuliert ein Abbruchkriterium, das die Lösungssuche unter bestimmten Bedingungen verkürzt.³⁶⁹ Die nachstehenden Ausführungen verfolgen das Ziel, die Lösungsprozedur im Allgemeinen effizienter zu gestalten. Dabei erfolgt die Betrachtung und Argumentation prinzipiell ähnlich zum Fall gleich großer Teillose in Kapitel 4.3.1. Allerdings können – aufgrund der Entwicklung der Transportlose entsprechend einer geometrischen Reihe und der damit verbundenen Komplexität des Lagerhaltungskostenterms h_i^{GY} bezüglich TH – weder das global optimale Minimum der $K^{GY}(TH)$ -Funktion (vgl. (4–39)) noch die Transporthäufigkeit im Tangentialpunkt TH_{tan} ohne weiteres direkt berechnet werden. Dennoch kann die Kenntnis der relativen Lage dieser Punkte bei unterschiedlichen Konstellationen der Funktionsverläufe genutzt werden, um die Anzahl der zu betrachtenden Lösungsalternativen entsprechend einzuschränken. Die dafür notwendigen Fallunterscheidungen sollen anhand der in Abbildung 13 exemplarisch dargestellten Situation veranschaulicht werden.

Analog zur eingangs erläuterten Vorgehensweise von LINDNER bildet die unrestringierte Losgrößenpolitik – mit der ganzzahligen Transporthäufigkeit $TH_{tv,opt}^{opt}$ und der nach (4–38) korrespondierenden Verbrauchszeit $t_{v,opt}(TH_{tv,opt}^{opt})$ – den Ausgangspunkt der Lösungssuche.³⁷⁰ Falls dabei die Mindestlänge der Losreichweite nach (4–30) eingehalten wird, so stellt diese Kombination gleichzeitig das restringierte Kostenminimum dar.

³⁶⁷ Vgl. BUSCHER, U.; LINDNER, G., 2000a, S. 14 ff. bzw. Kapitel 4.3.1.

³⁶⁸ LINDNER, G., 2001, S. 20.

³⁶⁹ Vgl. LINDNER, G., 2001, S. 20 f.

³⁷⁰ Die Ermittlung von $TH_{tv,opt}^{opt}$ erfolgt hierbei – wie zuvor beschrieben – nach Algorithmus 1.

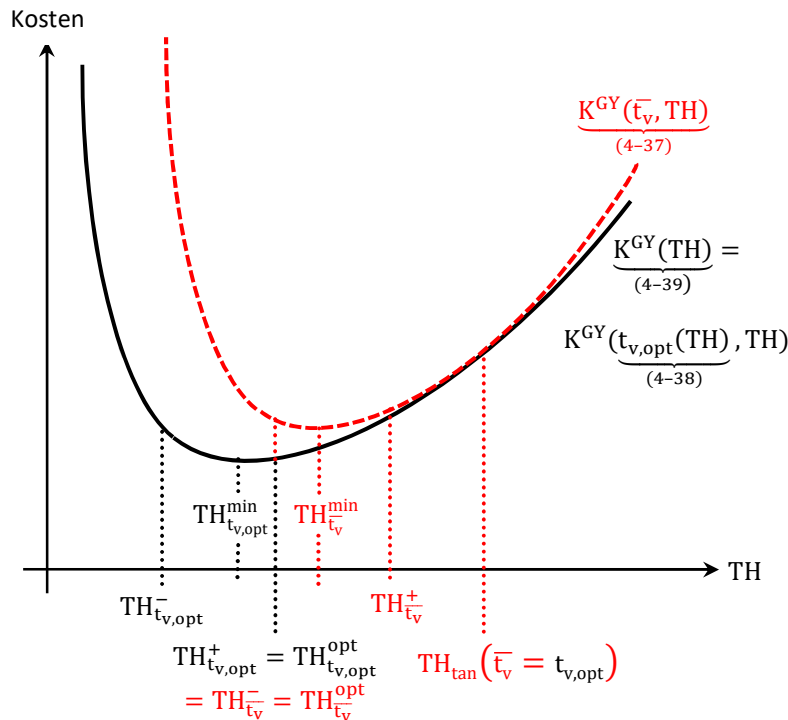


Abbildung 13: Kostenfunktionsverläufe zur Fallunterscheidung bei dynamischen Teillosen im CCM mit einheitlicher Transporthäufigkeit

Gilt hingegen $t_{v,opt}(TH_{t_{v,opt}}^{\min}) < \bar{t}_v$ so soll zunächst festgestellt werden, ob $TH_{t_{v,opt}}^{\min}$ links oder rechts des globalen Minimums $TH_{\bar{t}_v}^{\min}$ der $K^{GY}(TH)$ -Funktion liegt. Hierfür wird nach diversen Umformungen zunächst die partielle Ableitung von (4-37) nach TH gebildet:

$$(4-37) \quad K^{GY}(t_v, TH) = t_v \cdot \sum_{i=1}^I h_i^{GY}(TH) + \frac{1}{t_v} \cdot \sum_{i=1}^I (k_{R,i} + TH \cdot k_{T,i})$$

$$\text{mit } h_i^{GY}(TH) = h_i^0 + \frac{c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2}{A(TH) \cdot x_{p,i}} \quad \text{und} \quad A(TH) = \frac{\left(\frac{x_{p,i}}{x_{v,i}}\right)^{TH} - 1}{\frac{x_{p,i}}{x_{v,i}} - 1}$$

$$\Rightarrow K^{GY}(t_v, TH) = t_v \cdot \sum_{i=1}^I h_i^0 + t_v \cdot \sum_{i=1}^I \frac{c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2}{\underbrace{\frac{\left(\frac{x_{p,i}}{x_{v,i}}\right)^{TH} - 1}{\frac{x_{p,i}}{x_{v,i}} - 1}}_{\beta_i} \cdot x_{p,i}} + \frac{1}{t_v} \cdot \sum_{i=1}^I k_{R,i} + \frac{TH}{t_v} \cdot \sum_{i=1}^I k_{T,i}$$

Umformung des Ausdrucks β_i :

$$\begin{aligned}\beta_i &= \sum_{i=1}^I \frac{c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2}{\frac{\left(\frac{x_{p,i}}{x_{v,i}}\right)^{TH} - 1}{\frac{x_{p,i}}{x_{v,i}} - 1} \cdot x_{p,i}} = \sum_{i=1}^I \frac{1}{\left(\frac{x_{p,i}}{x_{v,i}}\right)^{TH} - 1} \cdot \frac{\left(\frac{x_{p,i}}{x_{v,i}} - 1\right) \cdot c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2}{x_{p,i}} \\ &= \sum_{i=1}^I \frac{1}{\left(\frac{x_{p,i}}{x_{v,i}}\right)^{TH} - 1} \cdot \underbrace{\left(1 - \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}\right)}_{2 \cdot h_i^0} \cdot c_{L,i} \cdot x_{v,i} = 2 \cdot \sum_{i=1}^I \frac{h_i^0}{\left(\frac{x_{p,i}}{x_{v,i}}\right)^{TH} - 1}\end{aligned}$$

Rücksubstitution von β_i und partielle Ableitung der Kostenfunktion nach TH bei konstantem t_v :

$$\begin{aligned}K^{GY}(t_v, TH) &= t_v \cdot \sum_{i=1}^I h_i^0 + 2 \cdot t_v \cdot \sum_{i=1}^I \frac{h_i^0}{\left(\frac{x_{p,i}}{x_{v,i}}\right)^{TH} - 1} + \frac{1}{t_v} \cdot \sum_{i=1}^I k_{R,i} + \frac{TH}{t_v} \cdot \sum_{i=1}^I k_{T,i} \\ \frac{\partial K^{GY}(t_v, TH)}{\partial TH} &= K_{ST}^{GY}(t_v, TH) = \frac{1}{t_v} \cdot \sum_{i=1}^I k_{T,i} - 2 \cdot t_v \cdot \sum_{i=1}^I \frac{h_i^0 \cdot \left(\frac{x_{p,i}}{x_{v,i}}\right)^{TH} \cdot \ln\left(\frac{x_{p,i}}{x_{v,i}}\right)}{\left[\left(\frac{x_{p,i}}{x_{v,i}}\right)^{TH} - 1\right]^2} \quad (4-40)\end{aligned}$$

Gleichung (4–40) repräsentiert somit für eine gegebene, konstante Verbrauchszeit t_v die Steigung der $K^{GY}(t_v, TH)$ -Funktion (vgl. (4–37)) im Punkt (t_v, TH) . Im Folgenden ist dies für zwei konkrete Ausprägungen der Verbrauchszeit relevant: Wird für eine gegebene Transporthäufigkeit die optimale Losreichweite $t_{v,opt}(TH)$ gemäß (4–38) ermittelt und die Kombination $(t_{v,opt}(TH), TH)$ in (4–40) eingesetzt, so stellt der resultierende Wert die Steigung der $K^{GY}(TH)$ -Funktion (vgl. (4–39) bzw. Abbildung 13) in genau diesem Punkt dar. Für $t_v = \bar{t}_v$ entspricht das Ergebnis von (4–40) der Steigung der $K^{GY}(\bar{t}_v, TH)$ -Funktion an der Stelle TH. Da der $K^{GY}(t_v, TH)$ -Funktion für eine gegebene Verbrauchszeit ein konvexer Verlauf bezüglich TH nachgewiesen werden kann,³⁷¹ folgt somit aus einem negativen (positiven) Wert von (4–40), dass die der Berechnung zugrundeliegende Transporthäufigkeit links (rechts) des globalen Minimums der betrachteten Funktion liegen muss.

³⁷¹ Vgl. zum Konvexitätsbeweis BOGASCHEWSKY, R.; BUSCHER, U.; LINDNER, G., 1999, S. 43 ff. bzw. BOGASCHEWSKY, R.; BUSCHER, U.; LINDNER, G., 2000.

Damit können die ganzzahligen Transporthäufigkeiten $TH_{t_{v,opt}}^-$ und $TH_{t_{v,opt}}^+$, die links bzw. rechts des globalen Minimums der $K^{GY}(TH)$ -Funktion liegen (vgl. Abbildung 13), aus der bereits ermittelten Transporthäufigkeit $TH_{t_{v,opt}}^{opt}$ nach folgender Regel abgeleitet werden: Resultiert aus (4–40) für das Tupel $(t_{v,opt}(TH_{t_{v,opt}}^{opt}), TH_{t_{v,opt}}^{opt})$ ein Wert kleiner oder gleich null, so entspricht $TH_{t_{v,opt}}^- = TH_{t_{v,opt}}^{opt}$ und $TH_{t_{v,opt}}^+ = TH_{t_{v,opt}}^{opt} + 1$. Andernfalls wird $TH_{t_{v,opt}}^- = TH_{t_{v,opt}}^{opt} - 1$ und $TH_{t_{v,opt}}^+ = TH_{t_{v,opt}}^{opt}$ gesetzt.³⁷² Hinsichtlich der Zulässigkeit dieser Transporthäufigkeiten (bzw. der korrespondierenden, optimalen Verbrauchszeiten) sind prinzipiell vier Kombinationen denkbar, von denen allerdings zwei nicht weiter betrachtet werden müssen:

1. $TH_{t_{v,opt}}^-$ und $TH_{t_{v,opt}}^+$ sind beide zulässig. Dieser Fall ist bereits abgedeckt, da dann $TH_{t_{v,opt}}^{opt}$ zulässig sein muss und die unrestringierte Lösung realisierbar ist.
2. Der Fall, dass $TH_{t_{v,opt}}^-$ zulässig und $TH_{t_{v,opt}}^+$ unzulässig ist, kann nicht auftreten, da die optimale Verbrauchszeit mit der Transporthäufigkeit ansteigt.³⁷³

Für die beiden übrigen Alternativen wird die Lösungsfindung im Folgenden erläutert.

Für den Fall, dass $TH_{t_{v,opt}}^-$ unzulässig und $TH_{t_{v,opt}}^+$ zulässig ist,³⁷⁴ muss sich TH_{tan} zwischen den beiden erstgenannten Transporthäufigkeiten befinden. Daraus folgt aus dem typischen Verlauf der Kostenfunktionen, dass das globale Minimum $TH_{\bar{t}_v}^{min}$ der $K^{GY}(\bar{t}_v, TH)$ -Funktion ebenfalls im Intervall $]TH_{t_{v,opt}}^-; TH_{t_{v,opt}}^+[$ liegen muss.³⁷⁵ Demnach sind die zur restringierten Verbrauchszeit \bar{t}_v korrespondierenden, ganzzahligen Transporthäufigkeiten $TH_{\bar{t}_v}^-$ bzw. $TH_{\bar{t}_v}^+$ identisch mit $TH_{t_{v,opt}}^-$ bzw. $TH_{t_{v,opt}}^+$, so dass zur Ermittlung der Optimallösung ein Kostenvergleich zwischen den beiden Punkten $(\bar{t}_v, TH_{t_{v,opt}}^-)$ und $(t_{v,opt}(TH_{t_{v,opt}}^+), TH_{t_{v,opt}}^+)$ ausreichend ist.

³⁷² TH^- und TH^+ stellen Hilfskonstrukte zur einfacheren Veranschaulichung der weiteren Vorgehensweise dar. Prinzipiell ist die explizite Ermittlung dieser Werte nicht unbedingt erforderlich.

³⁷³ Vgl. Fußnote 366.

³⁷⁴ Dies ist wiederum nur möglich, falls $TH_{t_{v,opt}}^+ = TH_{t_{v,opt}}^{opt} + 1$, da $TH_{t_{v,opt}}^{opt}$ selbst nicht zulässig ist.

³⁷⁵ Dabei spielt es für die Argumentation keine Rolle, ob TH_{tan} links oder rechts von $TH_{\bar{t}_v}^{min}$ liegt.

Sind beide Transporthäufigkeiten $TH_{t_{v,opt}}^-$ und $TH_{t_{v,opt}}^+$ unzulässig, so ist TH_{tan} zwangsläufig größer als $TH_{t_{v,opt}}^+$. In diesem Fall ist zunächst $TH_{\bar{t}_v}^{opt}$ auf Basis von (4–37) für $t_v = \bar{t}_v$ nach dem Verfahren von GOYAL (vgl. Algorithmus 1) zu ermitteln, wobei anstelle eines Startwerts von eins die Transporthäufigkeit $TH_{t_{v,opt}}^{opt}$ gewählt wird.³⁷⁶ Mittels (4–40) kann nun wiederum die Steigung im Punkt $(\bar{t}_v, TH_{\bar{t}_v}^{opt})$ bestimmt werden. Ist diese negativ oder null, so wird $TH_{\bar{t}_v}^- = TH_{\bar{t}_v}^{opt}$ und $TH_{\bar{t}_v}^+ = TH_{\bar{t}_v}^{opt} + 1$ gesetzt. Andernfalls entspricht $TH_{\bar{t}_v}^- = TH_{\bar{t}_v}^{opt} - 1$ und $TH_{\bar{t}_v}^+ = TH_{\bar{t}_v}^{opt}$. Anschließend wird geprüft, ob die zu $TH_{\bar{t}_v}^+$ korrespondierende, optimale Verbrauchszeit Bedingung (4–30) erfüllt und somit $t_{v,opt}(TH_{\bar{t}_v}^+) \geq \bar{t}_v$ gilt.³⁷⁷ Trifft dies zu, so kann die weitere Lösungssuche auf die Auswahl der kostengünstigeren Losgrößenpolitik aus den Alternativen $(\bar{t}_v, TH_{\bar{t}_v}^-)$ sowie $(t_{v,opt}(TH_{\bar{t}_v}^+), TH_{\bar{t}_v}^+)$ beschränkt werden. Der entsprechende Kostenvergleich ist nicht erforderlich sofern $TH_{\bar{t}_v}^+ = TH_{\bar{t}_v}^{opt}$, da dann $K^{GY}(TH_{\bar{t}_v}^+) < K^{GY}(\bar{t}_v, TH_{\bar{t}_v}^+) < K^{GY}(\bar{t}_v, TH_{\bar{t}_v}^-)$ gilt. Falls $t_{v,opt}(TH_{\bar{t}_v}^+) < \bar{t}_v$ zutreffend ist, so stellt die Kombination aus $TH_{\bar{t}_v}^{opt}$ und der restringierten Verbrauchszeit \bar{t}_v die optimale Lösung dar. Größere Transporthäufigkeiten als $TH_{\bar{t}_v}^+$ würden definitiv zu höheren Kosten führen, da $K^{GY}(TH_{tan}) > K^{GY}(\bar{t}_v, TH_{\bar{t}_v}^+)$. $TH_{\bar{t}_v}^-$ ist entweder identisch mit $TH_{\bar{t}_v}^{opt}$ oder nicht vergleichsrelevant, da dementsprechend $K^{GY}(\bar{t}_v, TH_{\bar{t}_v}^-) > K^{GY}(\bar{t}_v, TH_{\bar{t}_v}^+)$ gilt. In anderen Worten: $TH_{\bar{t}_v}^-$ könnte zwar prinzipiell höhere Kosten aufweisen als TH_{tan} , allerdings wäre dann $TH_{\bar{t}_v}^{opt} = TH_{\bar{t}_v}^+$ und die Kosten für $TH_{\bar{t}_v}^+$ sind stets geringer als die von TH_{tan} . Somit ist für sämtliche Variationen der in Abbildung 13 exemplarisch skizzierten Funktionsverläufe die kostengünstigste Losgrößenpolitik determiniert. Die schrittweise Abfolge des optimierten Lösungsverfahrens ist in Algorithmus 4 festgehalten.

³⁷⁶ $TH_{\bar{t}_v}^{opt}$ ist in jedem Falle größer oder gleich $TH_{t_{v,opt}}^{opt}$, da $\bar{t}_v > t_{v,opt}(TH_{t_{v,opt}}^{opt})$ gilt und die optimale Transporthäufigkeit mit der Verbrauchszeit steigt (vgl. Fußnote 366).

³⁷⁷ $t_{v,opt}(TH_{\bar{t}_v}^-)$ kann nicht zulässig sein, da $TH_{\bar{t}_v}^- \leq TH_{\bar{t}_v}^{min} < TH_{tan}$ gilt.

Algorithmus 4: Optimierte Lösungsfindung bei sorteneinheitlicher Anzahl dynamischer Teillose im CCM

Schritt 1: Bestimme $TH_{t_{v,opt}}^{opt}$ nach Algorithmus 1 auf Basis von (4–39).

Berechne $t_{v,opt}(TH_{t_{v,opt}}^{opt})$ gemäß (4–38) und $\bar{t}_v = \frac{\sum_{i=1}^I t_{R,i}}{1 - \sum_{i=1}^I \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}}$.

- Falls $t_{v,opt}(TH_{t_{v,opt}}^{opt}) \geq \bar{t}_v$, setze $TH = TH_{t_{v,opt}}^{opt}$ und gehe zu Schritt 5.
- Sonst berechne $K_{ST}^{GY}(t_{v,opt}(TH_{t_{v,opt}}^{opt}), TH_{t_{v,opt}}^{opt})$ nach (4–40) sowie $t_{v,opt}(TH_{t_{v,opt}}^{opt} + 1)$ nach (4–38) und gehe zu Schritt 2.

- Schritt 2:
- Falls $K_{ST}^{GY} \leq 0$ und $t_{v,opt}(TH_{t_{v,opt}}^{opt} + 1) \geq \bar{t}_v$, berechne $K^{GY}(TH_{t_{v,opt}}^{opt} + 1)$ nach (4–39) sowie $K^{GY}(\bar{t}_v, TH_{t_{v,opt}}^{opt})$ nach (4–37). Ist $K^{GY}(TH_{t_{v,opt}}^{opt} + 1) \leq K^{GY}(\bar{t}_v, TH_{t_{v,opt}}^{opt})$, setze $TH = TH_{t_{v,opt}}^{opt} + 1$, andernfalls $TH = TH_{t_{v,opt}}^{opt}$. Gehe zu Schritt 5.
 - Sonst gehe zu Schritt 3.

Schritt 3: Bestimme $TH_{\bar{t}_v}^{opt}$ nach Algorithmus 1 auf Basis von (4–37) mit $t_v = \bar{t}_v$ und dem Startwert $TH_{t_{v,opt}}^{opt}$. Berechne $K_{ST}^{GY}(\bar{t}_v, TH_{\bar{t}_v}^{opt})$ nach (4–40).

- Falls $K_{ST}^{GY} \leq 0$, setze $TH_{\bar{t}_v}^- = TH_{\bar{t}_v}^{opt}$ sowie $TH_{\bar{t}_v}^+ = TH_{\bar{t}_v}^{opt} + 1$.
- Sonst setze $TH_{\bar{t}_v}^- = TH_{\bar{t}_v}^{opt} - 1$ und $TH_{\bar{t}_v}^+ = TH_{\bar{t}_v}^{opt}$.

Schritt 4: Berechne $t_{v,opt}(TH_{\bar{t}_v}^+)$ nach (4–38).

- Falls $t_{v,opt}(TH_{\bar{t}_v}^+) \geq \bar{t}_v$ und $TH_{\bar{t}_v}^+ = TH_{\bar{t}_v}^{opt}$ oder $t_{v,opt}(TH_{\bar{t}_v}^+) < \bar{t}_v$, setze $TH = TH_{\bar{t}_v}^{opt}$.
- Sonst setze $TH = TH_{\bar{t}_v}^+$, sofern $K^{GY}(TH_{\bar{t}_v}^+) \leq K^{GY}(\bar{t}_v, TH_{\bar{t}_v}^-)$ bzw. andernfalls $TH = TH_{\bar{t}_v}^-$.

Schritt 5: Die optimale Lösung ist determiniert durch die Transporthäufigkeit

$$\text{TH und die Verbrauchszeit } t_v = \max \left\{ \underbrace{t_{v,\text{opt}}(\text{TH})}_{(4-38)} ; \bar{t}_v \right\}.$$

Die damit verbundenen Kosten ergeben sich nach (4-37).

Abgesehen von der Anwendung des GOYAL-Verfahrens (vgl. Algorithmus 1) ist die beschriebene Lösungsprozedur schleifenfrei und auf maximal vier Fallunterscheidungen und einen Kostenvergleich begrenzt.³⁷⁸

Sortenindividuelle Transporthäufigkeiten

Ist eine Planungssituation gegeben, die die individuelle Anpassung der Transporthäufigkeit an die einzelnen Produktsorten erlaubt, so stellt sich die Gesamtkostenfunktion nach (4-37) unter Berücksichtigung von $\text{TH} = \text{TH}_i$ wie folgt dar:³⁷⁹

$$K^{\text{GY}}(t_v, \text{TH}_i) = t_v \cdot \sum_{i=1}^I h_i^{\text{GY}}(\text{TH}_i) + \frac{1}{t_v} \cdot \sum_{i=1}^I (k_{R,i} + \text{TH}_i \cdot k_{T,i}) \quad (4-41)$$

Aus dem Nullsetzen der partiellen Ableitung von (4-41) nach t_v resultiert durch entsprechende Umformungen der Ausdruck für die optimale Verbrauchszeit:³⁸⁰

$$t_{v,\text{opt}}(\text{TH}_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^I (k_{R,i} + \text{TH}_i \cdot k_{T,i})}{\sum_{i=1}^I h_i^{\text{GY}}(\text{TH}_i)}} \quad (4-42)$$

Diese Lösereichweite steht in Abhängigkeit zu den individuellen Transporthäufigkeiten der einzelnen Produktsorten und muss zudem eine Mindestlänge gemäß (4-30) aufweisen. Daraus folgt wiederum, dass zwischen den sortenspezifischen Optimalwerten der Transporthäufigkeiten Interdependenzen aufgrund der gemeinsamen Verbrauchszeit bestehen, die zusätzlich zur Ganzzahligkeitsanforderung berücksichtigt werden müssen. Da-

³⁷⁸ Das in Schritt 2 formulierte Abbruchkriterium greift bspw. für das von LINDNER angeführte Exempel (vgl. LINDNER, G., 2001, S. 24 ff.) und verkürzt die Lösungsfindung dort somit auf zwei Fallunterscheidungen und einen Kostenvergleich.

³⁷⁹ Damit erhöht sich die Anzahl der Entscheidungsvariablen im Vergleich zum Fall einer einheitlichen Transporthäufigkeit um $i - 1$.

³⁸⁰ Zum Nachweis der Konvexität von (4-41) vgl. die Ausführungen in Anlage B.

her ist eine Ermittlung der optimalen TH_i auf Basis des GOYAL-Verfahrens³⁸¹ nicht mehr ohne weiteres möglich, so dass die Lösungsfindung – analog zum Fall gleich großer Teillose (vgl. Kapitel 4.3.1) – auf dem Optimierungsverfahren „NMinimize“ in WOLFRAM MATHEMATICA (vgl. Anlage F) beruht. Als Initialwerte für die Transporthäufigkeiten werden die isoliert optimalen TH_i nach Algorithmus 1 auf Basis von (4–16) bestimmt.³⁸² Für die Verbrauchszeit wird folgender Startwert übergeben:

$$t_v = \max \left\{ \underbrace{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^I (k_{R,i} + TH_i \cdot k_{T,i})}{\sum_{i=1}^I h_i^{GY}(TH_i)}}}_{(4-42)} ; \underbrace{\frac{\sum_{i=1}^I t_{R,i}}{1 - \sum_{i=1}^I \frac{X_{v,i}}{X_{p,i}}}}_{(4-30)} \right\}$$

4.4 Basisperiodenansatz

Im Gegensatz zum CCM (vgl. Kapitel 4.3) besteht für die Lösung des klassischen ELSP nach dem BPA bisher kein Modell zur expliziten Berücksichtigung von Teillosen im Sinne der Losüberlappung.³⁸³ Gegenstand der folgenden Ausführungen ist daher die Integration einer simultanen Fertigungs- und Transportlosgrößenplanung in den BPA von HAESSLER/HOGUE bzw. HAESSLER³⁸⁴. Dabei wird die dort zur Lösungsermittlung beschriebene Vorgehensweise zum einen um die aufgrund der Losüberlappung erforderlichen Schritte erweitert und zum anderen dahingehend konkretisiert, dass im Allgemeinen ein größerer Lösungsraum in Betracht gezogen werden kann. Diesbezügliche Abweichungen von den Ursprungsquellen sind explizit durch ausführliche Erläuterungen gekennzeichnet, so dass zur Vermeidung von Redundanzen auf eine separate Darstellung des originären Algorithmus verzichtet wird. Aus gleichem Grund werden die Lösungsverfahren für die Fälle einheitlicher und sortenindividueller Transporthäufigkeit(en) zusammengefasst.

³⁸¹ Vgl. Algorithmus 1.

³⁸² Dabei kann das Summenzeichen in (4–16) entfallen und das Verfahren entsprechend dadurch verkürzt werden, dass anstelle eines Startwerts von eins das auf die nächste, ganzzahlige Ausprägung abgerundete Ergebnis nach (3–15) verwendet wird (vgl. hierzu „ALGORITHMUS I“ von BOGASCHEWSKY, R.; BUSCHER, U.; LINDNER, G., 1999, S. 20 ff. bzw. Kapitel 3.3).

³⁸³ Vgl. Kapitel 4.1.

³⁸⁴ Vgl. HAESSLER, R. W.; HOGUE, S. L., 1976 bzw. HAESSLER, R. W., 1979 sowie Kapitel 2.3.3.3.

4.4.1 Gleich große Teillose

Einheitliche Transporthäufigkeit

Eine Losgrößenpolitik nach dem BPA setzt – konträr zum CCM – keine einheitliche Zykluszeit voraus, sondern fordert lediglich eine für alle Produkte gemeinsame BP. Dieser höhere Freiheitsgrad hat zur Folge, dass die zugrundeliegende Kostenfunktion nun zusätzlich abhängig von den sortenindividuellen Multiplikatoren m_i ist. Im Falle einer für alle Produkte identischen Transporthäufigkeit ergeben sich die Gesamtkosten somit aus (4–8) unter Berücksichtigung von $t_{v,i} = m_i \cdot BP$ (vgl. (2–11)):

$$K(BP, m_i, TH) = BP \cdot \sum_{i=1}^I h_i^{SZ}(TH) \cdot m_i + \frac{1}{BP} \cdot \sum_{i=1}^I \frac{k_{R,i} + TH \cdot k_{T,i}}{m_i} \quad (4-43)$$

Werden die partiellen Ableitungen von (4–43) nach TH bzw. BP gebildet, null gesetzt und die resultierenden Ausdrücke entsprechend aufgelöst, so ergeben sich folgende Bestimmungsgleichungen:³⁸⁵

$$TH_{opt}(BP, m_i) = BP \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^I \frac{c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2 \cdot m_i}{x_{p,i}}}{\sum_{i=1}^I \frac{k_{T,i}}{m_i}}} \quad (4-44)$$

$$BP_{opt}(m_i, TH) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^I \frac{k_{R,i} + TH \cdot k_{T,i}}{m_i}}{\sum_{i=1}^I h_i^{SZ}(TH) \cdot m_i}} \quad (4-45)$$

Dabei unterliegt die Länge der BP der notwendigen (allerdings nicht hinreichenden) Bedingung (2–16), die sicherstellt, dass – unabhängig von der tatsächlichen Maschinenbelegung – durchschnittlich noch genügend Zeit für die notwendigen Rüstvorgänge vorhanden ist.³⁸⁶

$$(2-16) \quad \underbrace{\sum_{i=1}^I \frac{t_{p,i} + t_{R,i}}{t_{v,i}}}_{\text{Bruttoauslastung}} \leq 1 \quad \Rightarrow \quad BP \geq \frac{\sum_{i=1}^I \frac{t_{R,i}}{m_i}}{1 - \sum_{i=1}^I \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}}$$

³⁸⁵ Zum Nachweis der Konvexität von (4–43) vgl. die Ausführungen in Anlage B.

³⁸⁶ Vgl. Kapitel 2.3.3.3 sowie HAESSLER, R. W., 1979, S. 337 Condition (8).

Dementsprechend ergibt sich die vorläufige BP-Länge aus (4–45) unter Berücksichtigung von (2–16) wie folgt:

$$BP = \max \left\{ \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^I \frac{k_{R,i} + TH \cdot k_{T,i}}{m_i}}{\sum_{i=1}^I h_i^{SZ}(TH) \cdot m_i}}; \frac{\sum_{i=1}^I \frac{t_{R,i}}{m_i}}{1 - \sum_{i=1}^I \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}} \right\} \quad (4-46)$$

Soll eine vorläufig determinierte Multiplikatorkombination und Produktreihenfolge – also ein Maschinenbelegungsplan, bei dem die Aufteilung der Sorten auf die einzelnen BP (temporär) fixiert ist – auf Zulässigkeit überprüft werden, so ist (2–15) als hinreichende Restriktion für die Mindestlänge der BP zu beachten:³⁸⁷

$$(2-15) \quad BP \geq \max_{BP} \left\{ \sum_k (t_{p,k} + t_{R,k}) \right\} \Rightarrow BP \geq \max_{BP} \left\{ \frac{\sum_k t_{R,k}}{1 - \sum_k m_k \cdot \frac{x_{v,k}}{x_{p,k}}} \right\}$$

Daraus folgt, dass eine Multiplikatorkombination nur genau dann zu einem zulässigen Maschinenbelegungsplan führen kann, wenn die Nettoauslastung jeder einzelnen BP einer vorläufig festgelegten Produktreihenfolge weniger als 100% beträgt und somit gilt:

$$\max_{BP} \left\{ \sum_k m_k \cdot \frac{x_{v,k}}{x_{p,k}} \right\} < 1 \quad (4-47)$$

Die BP-Länge nimmt demnach entweder ihren Optimalwert nach (4–45) an oder ergibt sich daraus, dass (2–15) als Gleichung erfüllt wird. Die Belegungszeiten der einzelnen Produkte $t_{B,i}$ sowie die Gesamtzykluszeit T_{zyk} (unter der Prämisse einer POT-Politik)³⁸⁸ ergeben sich wie folgt:

$$t_{B,i}(BP, m_i) = BP \cdot m_i \cdot \underbrace{\frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}}_{t_{p,i}} + t_{R,i} \quad (4-48)$$

$$T_{zyk} = \max\{t_{v,i}\} = \max\{m_i\} \cdot BP$$

³⁸⁷ Hierbei steht $k \in I$ für den Index der Produkte, die in einer BP gemeinsam gefertigt werden bzw. im Maschinenbelegungsplan in einer BP aufeinandertreffen (siehe Kapitel 2.3.3.2). Vgl. auch HAESSLER, R. W., 1979, S. 338 Condition (11).

³⁸⁸ Vgl. Kapitel 2.3.3.3.

Mit diesen Gleichungen kann folgender Algorithmus zur Lösungsfindung bei Berücksichtigung gleich großer Teillose formuliert werden, der partiell auf der Struktur der von HAESSLER³⁸⁹ formulierten Vorgehensweise bei „offener Fertigung“ basiert.³⁹⁰ Die Anzahl der übergeordneten Verfahrensschritte wird dabei explizit beibehalten, so dass eine Gegenüberstellung des originären und des adaptierten Algorithmus zur Verdeutlichung der entwickelten Erweiterungen in direkter Hinsicht möglich ist.

Algorithmus 5: Eine Heuristik zur Lösung des ELSP nach dem BPA mit POT-Politik bei der Einbeziehung von Lossplitting

Schritt 1: Berechne die optimalen Verbrauchszeiten $t_{v,i}^* = \max \left\{ \sqrt{\frac{k_{R,i}}{h_i^o}} ; \frac{t_{R,i}}{1 - \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}} \right\}$

der isolierten Lösung (vgl. (2–3) und (4–4)) sowie die korrespondierende Transporthäufigkeit TH nach (4–10).³⁹¹

Schritt 2: Setze als vorläufigen Startwert $BP = \min\{t_{v,i}^*\}$.

Schritt 3.1: Ermittlung der POT-Multiplikatoren

- Bestimme m_i^- und m_i^+ so, dass gilt: $m_i^- \leq \frac{t_{v,i}^*}{BP} < m_i^+$
mit $m_i^- \in \{1, 2, 4, 8, \dots\}$ und $m_i^+ = 2 \cdot m_i^-$.
- Berechne $K_i^-(BP, m_i^-, TH)$ und $K_i^+(BP, m_i^+, TH)$ nach (4–43) unter Wegfall des Summenzeichens.³⁹²
- Falls $K_i^+ < K_i^-$, setze $m_i = m_i^+$, sonst setze $m_i = m_i^-$.

³⁸⁹ Vgl. HAESSLER, R. W., 1979, S. 338.

³⁹⁰ Die gemäß der Intention prinzipiell vergleichbare Vorgehensweise von HAESSLER/HOGUE wurde bereits in Kapitel 2.3.3.3 erläutert. Jedoch sind die späteren Ausführungen von HAESSLER konkreter und werden daher an dieser Stelle bevorzugt herangezogen.

³⁹¹ Vgl. auch Kapitel 4.2.1. Zur Initialisierung des Verfahrens werden an dieser Stelle die isolierten Verbrauchszeiten bei „offener Fertigung“ herangezogen. Im Fall gleich großer Teillose würden sich eben diese Werte für $t_{v,i}^*$ einstellen, sofern von den optimalen, gegebenenfalls reellwertigen, sortenspezifischen Transporthäufigkeiten ausgegangen wird. Bei einer einheitlichen (ebenfalls nicht zwingend ganzzahligen Transporthäufigkeit) ist in der Regel von einer Abweichung zwischen den nach (2–3) berechneten $t_{v,i}^*$ und den optimalen Verbrauchszeiten $t_{v,i,opt}(TH)$ nach (4–9) auszugehen. Um diese Abweichung zu vermeiden, wäre eine Bestimmung der ganzzahligen, optimalen Transporthäufigkeit mittels Algorithmus 1 auf Basis von Kostenfunktion (4–11) erforderlich. Der damit verbundene Mehraufwand wird an dieser Stelle allerdings nicht betrieben, da es sich lediglich um die Generierung von Startwerten handelt und die Abweichung im Allgemeinen im Laufe der folgenden Schritte nicht relevant ist bzw. sich nicht auf die endgültige Lösung auswirkt.

³⁹² An dieser Stelle wird der jeweils zuletzt berechnete Wert für die einheitliche Transporthäufigkeit verwendet, da für eine Anpassung von $TH(BP, m_i)$ nach (4–44) die Summe über alle Multiplikatoren gebildet werden müsste. Dies ist nicht ohne weiteres möglich, da deren Werte eben erst noch auf m_i^- oder m_i^+ festzulegen sind und – wegen des relativ hohen Aufwands im Vergleich zur zu erwartenden Präzisionssteigerung – nicht alle Kombinationsmöglichkeiten von m_i^- und m_i^+ über alle Sorten geprüft wer-

- Schritt 3.2: Berechne die zu BP und m_i optimale Transporthäufigkeit $TH_{opt}(BP, m_i)$ gemäß (4–44).
- Schritt 4.1: Anpassung der BP an die aktuellen Werte für m_i und TH gemäß (4–46).
- Schritt 4.2: Aktualisierung von $TH_{opt}(BP, m_i)$ gemäß (4–44).
- Schritt 5: Gehe zurück zu Schritt 3.1 und wiederhole die bis hierher beschriebene Vorgehensweise solange, bis sich die in Schritt 3.1 ermittelten Werte für die Multiplikatoren m_i im Vergleich zur vorherigen Iteration nicht mehr ändern.³⁹³
- Schritt 6: Kostenreduzierungspotential durch Multiplikatoranpassungen³⁹⁴
- Beginnend mit $i = 1$ wird für jedes Produkt geprüft, ob durch eine Halbierung oder Verdopplung von m_i (bei gleichzeitiger Anpassung der Transporthäufigkeit nach (4–44) und der BP nach (4–46)) eine Senkung der Gesamtkosten nach (4–43) erreicht werden kann.
 - Ist dies zutreffend, so wird der entsprechende Multiplikator halbiert bzw. verdoppelt und die korrespondierenden Werte für BP und TH werden übernommen. Andernfalls bleiben die Ausgangswerte erhalten.

den sollen. Alternativ wäre es möglich temporär auf die isoliert optimalen Werte $TH_i^-(BP, m_i^-)$ und $TH_i^+(BP, m_i^+)$ nach (4–44) α zurückzugreifen oder die einheitlichen Transporthäufigkeiten $TH^-(BP, m_i^-)$ bzw. $TH^+(BP, m_i^+)$ nach (4–44) zu berechnen, wobei für TH^- dann alle Multiplikatoren ab- bzw. für TH^+ alle Multiplikatoren aufgerundet werden würden. Beide Optionen kommen nicht zur Anwendung, da sie dazu führen können, dass die Abweichung vom eigentlich optimalen TH-Wert relativ groß sein kann.

³⁹³ In der Regel greift das Abbruchkriterium bereits beim ersten Vergleich, da sich (unter anderem aufgrund der POT-Politik) die Multiplikatoren im Allgemeinen nur bei signifikanten Anpassungen der BP ändern. Dies ist insbesondere dann relevant, wenn Restriktion (2–16) bindend ist und somit die BP auf die notwendige Mindestlänge ausgedehnt wird, um eine Einhaltung der durchschnittlichen Bruttoauslastung zu gewährleisten.

³⁹⁴ Dieser Schritt ist bei HAESSLER nicht näher beschrieben (Vgl. HAESSLER, R. W., 1979, S. 338) und wird daher an dieser Stelle konkretisiert und erweitert.

- Die Prüfung wird mit dem nächsten Produkt fortgesetzt, bis alle Sorten den beschriebenen Vorgang durchlaufen haben. Sofern sich hierbei Veränderungen bei mindestens einem Multiplikator ergeben, wird das Prüfverfahren (erneut beginnend mit $i = 1$) solange iterativ weitergeführt, bis dies nicht mehr der Fall ist.

Schritt 7: Versuch der Generierung einer zulässigen Maschinenbelegung

- Berechne $t_{B,i}(BP, m_i)$ gemäß (4–48).
- Sortiere die Produkte primär aufsteigend nach m_i und (bei gleichen Multiplikatoren) sekundär absteigend nach $t_{B,i}$.
- Entsprechend dieser Reihenfolge wird nun versucht jedes Produkt in die erste der insgesamt $\max\{m_i\}$ BP einzuplanen in der noch ausreichend Kapazität (freie Zeit) zur Verfügung steht.³⁹⁵ Dabei werden Produkte mit $m_i \neq \max\{m_i\}$ (also mit einer Auflagehäufigkeit, die bezogen auf den Gesamtzyklus größer eins ist) im entsprechenden Abstand in mehrere BP eingeplant.
- Gelingt dies für alle Produkte, so aktualisiere die Transporthäufigkeit gemäß (4–44), berechne die Gesamtkosten gemäß (4–43), speichere diese Lösung als $K_{\text{ref}}(BP_{\text{ref}}, m_{i,\text{ref}}, TH_{\text{ref}})$ ³⁹⁶ und hebe gegebenenfalls sämtliche Halbierungssperren der Multiplikatoren auf.³⁹⁷ Gehe zu Schritt 9.1.
- Sonst gehe zu Schritt 8.

³⁹⁵ Ein derartiges Einsortieren der Produkte in den Maschinenbelegungsplan kann zu einer ungleichmäßigen Auslastung der BP führen, da ein Produkt immer in die erste BP übernommen wird, deren freie Zeit noch genügend groß ist. Dies hat allerdings keine Kostenwirkung und kann bei Bedarf auch noch ex post ausgeglichen werden (vgl. NARRO LOPEZ, M. A.; KINGSMAN, B. G., 1991, S. 151 f.).

³⁹⁶ Der Vergleich mit einem gegebenenfalls zuvor gespeicherten K_{ref} -Wert ist an dieser Stelle nicht notwendig, da zur Lösungsfindung keine Anpassung der BP-Länge erfolgt ist und somit der „lower bound“, dessen Kosten unter dem bisherigen K_{ref} -Wert liegen müssen (vgl. Schritt 9.1), realisiert werden kann.

³⁹⁷ Wird dieses Ziel bereits im ersten Durchlauf erreicht, also ohne eine vorhergehende Ausweitung der BP in Schritt 8 oder eine Multiplikatoranpassung in Schritt 9, so kann das Verfahren direkt mit Schritt 10 beendet werden (vgl. hierzu auch HAESSLER, R. W., 1979, S. 338 Step 7).

Schritt 8: Versuch durch Ausdehnung der BP einen zulässigen Maschinenbelegungsplan zu generieren³⁹⁸

Wenn für das nächste, einzuplanende Produkt in keiner BP mehr ausreichend freie Zeit zur Verfügung steht, wird dieses zunächst vorläufig in die BP mit der bisher geringsten Auslastung eingeplant³⁹⁹ und anschließend geprüft, ob eine Ausweitung der BP-Länge zielführend ist.

- Falls (4–47) erfüllt ist, wird $BP = \max_{BP} \left\{ \frac{\sum_k t_{R,k}}{1 - \sum_k m_k \frac{x_{v,k}}{x_{p,k}}} \right\}$ gesetzt

(vgl. (2–15)). Sind noch weitere Produkte einzuplanen, gehe zu Schritt 7. Sonst aktualisiere die Transporthäufigkeit gemäß (4–44) und berechne die Gesamtkosten gemäß (4–43).

- Sind diese Kosten geringer als K_{ref} (oder wurde K_{ref} bisher noch nicht definiert), so speichere die aktuelle Lösung als $K_{ref}(BP_{ref}, m_{i,ref}, TH_{ref})$, hebe gegebenenfalls sämtliche Halbierungssperren der Multiplikatoren auf und gehe zu Schritt 9.1.
- Sonst prüfe, ob die aktuelle m_i -Kombination aus der Halbierung eines Multiplikators hervorgegangen ist. Falls ja, stelle den Ausgangswert des betreffenden Multiplikators durch Verdopplung wieder her und sperre den entsprechenden m_i -Wert vorläufig für weitere Halbierungen. Gehe zu Schritt 9.1.
- Sonst prüfe, ob die aktuelle m_i -Kombination aus der Halbierung eines Multiplikators hervorgegangen ist. Falls ja, stelle den Ausgangswert des betreffenden Multiplikators durch Verdopplung wieder her und sperre den entsprechenden m_i -Wert vorläufig für weitere Halbierungen.⁴⁰⁰ Gehe zu Schritt 9.1.

³⁹⁸ HAESSLER lässt mit seiner knappen Formulierung an dieser Stelle einigen Spielraum für die konkrete Umsetzung. Außerdem geht er nicht darauf ein, dass auch Multiplikatorkombinationen bzw. Produktreihenfolgen vorliegen können, die selbst durch eine Ausdehnung der BP zu keinem überschneidungsfreien Maschinenbelegungsplan führen (vgl. Bedingung (4–47) bzw. HAESSLER, R. W., 1979, S. 338 Step 8).

³⁹⁹ Dadurch wird sichergestellt, dass die erforderliche Ausweitung der BP-Länge nicht größer ausfällt als unbedingt notwendig.

⁴⁰⁰ Die Halbierungssperre kommt demnach dann zum Einsatz, wenn die Halbierung des Multiplikators mit dem „lowest lower bound“ keinen zulässigen Maschinenbelegungsplan ermöglicht oder eine Auswei-

Schritt 9.1: Versuch der Lösungsfindung bzw. -verbesserung durch gezielte Multiplikatorhalbierung

- Falls alle $m_i = 1$, gehe zu Schritt 10.
- Für alle (nicht gesperrten) $m_i > 1$ werden die Kosten nach (4–43) berechnet, die sich bei der Halbierung des jeweiligen Multiplikators (alle anderen bleiben konstant) und der damit nach (4–46) einhergehenden Veränderung der BP ergeben würden.⁴⁰¹
- Ist der niedrigste der resultierenden Kostenwerte geringer als K_{ref} (oder wurde K_{ref} bisher noch nicht definiert), wird die Halbierung des korrespondierenden Multiplikators zunächst beibehalten. Aktualisiere die BP gemäß (4–46) und gehe zu Schritt 7. Sonst gehe zu Schritt 9.2.⁴⁰²

Schritt 9.2: Versuch der Lösungsverbesserung durch gleichzeitige Halbierung aller Multiplikatoren⁴⁰³

- Setze $m_i = \frac{m_i}{2}$ für alle $m_i > 1$ und hebe sämtliche Halbierungssperren der Multiplikatoren wieder auf. Aktualisiere die BP gemäß (4–46) sowie die Transporthäufigkeit nach (4–44) und gehe zu Schritt 7.

tung der BP erforderlich macht, die die damit verbundenen Kosten über den aktuellen K_{ref} -Wert hebt. Somit kann bei der nächsten Iteration jeweils eine weitere Multiplikatorhalbierung bezüglich ihres Kostenverbesserungspotentials geprüft werden. Dadurch wird der Lösungsraum (im Vergleich zur originären Vorgehensweise von HAESSLER) sinnvoll erweitert, was wiederum zu einer Steigerung der Lösungsqualität beitragen kann. Sobald eine zulässige Lösung generiert (und damit die Halbierung eines Multiplikators nicht rückgängig gemacht) wurde oder alle Multiplikatoren gleichzeitig halbiert worden sind (vgl. Schritt 9.2), werden sämtliche Halbierungssperren wieder aufgehoben.

⁴⁰¹ Dieser Kostenwert stellt eine untere Grenze („lower bound“) für die veränderte Multiplikatorkombination dar, deren Zulässigkeit jedoch nicht garantiert und gegebenenfalls mit weiteren Zusatzkosten verbunden ist.

⁴⁰² Bei HAESSLER endet in diesem Fall das Lösungsverfahren. Damit bleibt zum einen unklar, wie weiter vorgegangen werden soll, wenn bis dahin noch kein zulässiger Maschinenbelegungsplan generiert wurde. Zum anderen werden weitere Multiplikatorkombinationen mit gegebenenfalls niedrigeren Kosten nicht mehr berücksichtigt (vgl. Zahlenbeispiel in Kapitel 5.2.1).

⁴⁰³ Diese Erweiterung stellt sicher, dass weitere, potentiell kostengünstigere Lösungsalternativen analysiert werden können und der Algorithmus letztendlich in der Common Cycle Lösung terminiert.

Schritt 10: Kostenvergleich zur Ermittlung einer ganzzahligen Transporthäufigkeit

- Setze $TH_{ab}^{gz} = \lfloor TH_{ref} \rfloor$ und $TH_{auf}^{gz} = \lceil TH_{ref} \rceil$ und berechne $K(BP_{ref}, m_{i,ref}, TH_{ab}^{gz})$ sowie $K(BP_{ref}, m_{i,ref}, TH_{auf}^{gz})$.
- Falls $K(BP_{ref}, m_{i,ref}, TH_{ab}^{gz}) \leq K(BP_{ref}, m_{i,ref}, TH_{auf}^{gz})$, dann setze $TH_{ref} = TH_{ab}^{gz}$ und $K_{ref} = K(BP_{ref}, m_{i,ref}, TH_{ab}^{gz})$. Sonst setze $TH_{ref} = TH_{auf}^{gz}$ und $K_{ref} = K(BP_{ref}, m_{i,ref}, TH_{auf}^{gz})$.

Kostenverbesserungspotential durch Anpassung der BP

- Berechne $BP_{ab}(m_{i,ref}, TH_{ab}^{gz})$ und $BP_{auf}(m_{i,ref}, TH_{auf}^{gz})$ nach (4-46), wobei die jeweilige BP die durch den bereits determinierten Belegungsplan erforderliche Mindestlänge (vgl. (2-15)) nicht unterschreiten darf.
- Falls für die Gesamtkosten gemäß (4-43) $K(BP_{ab}, m_{i,ref}, TH_{ab}^{gz}) \leq K(BP_{auf}, m_{i,ref}, TH_{auf}^{gz})$ gilt, dann setze $TH = TH_{ab}^{gz}$ und $BP = BP_{ab}$. Sonst setze $TH = TH_{auf}^{gz}$ und $BP = BP_{auf}$.
- Falls mit BP, $m_{i,ref}$ und TH gemäß Schritt 7 kein zulässiger Maschinenbelegungsplan generiert werden kann, dessen tatsächliche Gesamtkosten kleiner sind als K_{ref} , so setze $BP = BP_{ref}$ und $TH = TH_{ref}$.

Damit ist das Ergebnis der erweiterten Heuristik determiniert durch die BP-Länge BP, die Multiplikatoren $m_i = m_{i,ref}$ und die ganzzahlige Transporthäufigkeit TH.

Sortenindividuelle Transporthäufigkeiten

Zur Berücksichtigung sortenindividueller Transporthäufigkeiten kann die prinzipielle Struktur und Vorgehensweise von Algorithmus 5 übernommen werden. Die Bestimmungsgleichungen, die sich von denen bei einheitlicher Transporthäufigkeit ($TH_i=TH$) unterscheiden, sind in Tabelle 6 festgehalten. Dabei weisen die jeweiligen Formeläquivalente eine identische Nummerierung ergänzt um die Bezeichnung „ α “ auf. Zudem wird

Schritt 3.1 dahingehend erweitert, dass nach der Ermittlung von m_i^- und m_i^+ eine Anpassung der produktspezifischen Transporthäufigkeiten $TH_i^-(BP, m_i^-)$ und $TH_i^+(BP, m_i^+)$ gemäß (4–44) α erfolgt.⁴⁰⁴ Des Weiteren müssen zur Bestimmung der ganzzahligen Transporthäufigkeiten in Schritt 10 das Auf- bzw. Abrunden der $TH_{i,ref}$ und der anschließende Kostenvergleich für jedes Produkt separat erfolgen. Hierfür ist (4–43) α unter Wegfall der Summenzeichen heranzuziehen.⁴⁰⁵

$K(BP, m_i, TH_i) = BP \cdot \sum_{i=1}^I h_i^{SZ}(TH_i) \cdot m_i + \frac{1}{BP} \cdot \sum_{i=1}^I \frac{k_{R,i} + TH_i \cdot k_{T,i}}{m_i}$	(4–43) α
$TH_{i,opt}(BP, m_i) = BP \cdot m_i \cdot \sqrt{\frac{c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2}{k_{T,i} \cdot x_{p,i}}}$	(4–44) α
$BP = \max \left\{ \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^I \frac{k_{R,i} + TH_i \cdot k_{T,i}}{m_i}}{\sum_{i=1}^I h_i^{SZ}(TH_i) \cdot m_i}}; \frac{\sum_{i=1}^I \frac{t_{R,i}}{m_i}}{1 - \sum_{i=1}^I \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}} \right\}$	(4–46) α

Tabelle 6: Äquivalente Bestimmungsgleichungen bei sortenindividuellen Transporthäufigkeiten

4.4.2 Dynamische Teillosgrößen

Einheitliche Transporthäufigkeit

Wird für den BPA eine überlappende Fertigung nach dem Lossplitting-Modell von GOYAL⁴⁰⁶ in Betracht gezogen, so ergibt sich die Funktion der entscheidungsrelevanten Gesamtkosten – bei Annahme einer für alle Produkte einheitlichen Transporthäufigkeit – aus (4–19) unter Berücksichtigung von $t_{v,i} = m_i \cdot BP$ (vgl. (2–11)):

$$K(BP, m_i, TH) = BP \cdot \sum_{i=1}^I h_i^{GY}(TH) \cdot m_i + \frac{1}{BP} \cdot \sum_{i=1}^I \frac{k_{R,i} + TH \cdot k_{T,i}}{m_i} \quad (4–49)$$

⁴⁰⁴ Im Falle einer einheitlichen Transporthäufigkeit wird aus den dort genannten Gründen (vgl. Fußnote 392) auf diese Anpassung verzichtet.

⁴⁰⁵ Zum Nachweis der Konvexität von (4–43) α vgl. die Ausführungen in Anlage B.

⁴⁰⁶ Vgl. Kapitel 3.3.

Die partielle Ableitung dieser Kostenfunktion nach der BP liefert, durch Nullsetzen und entsprechende Umformungen, eine Formel für die optimale BP-Länge in Abhängigkeit von den Multiplikatoren und der Transporthäufigkeit:⁴⁰⁷

$$BP_{\text{opt}}(m_i, TH) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^I \frac{k_{R,i} + TH \cdot k_{T,i}}{m_i}}{\sum_{i=1}^I h_i^{\text{GY}}(TH) \cdot m_i}} \quad (4-50)$$

Um zu gewährleisten, dass die maximale Bruttoauslastung im Gesamtzyklus durchschnittlich 100% nicht übersteigt, ist wiederum Bedingung (2-16) zu berücksichtigen. Demnach bestimmt sich die vorläufige Mindestlänge der BP wie folgt:

$$BP = \max \left\{ \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^I \frac{k_{R,i} + TH \cdot k_{T,i}}{m_i}}{\sum_{i=1}^I h_i^{\text{GY}}(TH) \cdot m_i}}; \frac{\sum_{i=1}^I \frac{t_{R,i}}{m_i}}{1 - \sum_{i=1}^I \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}} \right\} \quad (4-51)$$

Bei sukzessiver Einplanung der Produkte zur Ermittlung eines überschneidungsfreien Maschinenbelegungsplans für eine vorübergehend festgelegte Multiplikatorkombination,⁴⁰⁸ muss die BP-Länge wiederum Bedingung (2-15) genügen bzw. müssen die Multiplikatoren der in den einzelnen BP aufeinandertreffenden Produkte die Einhaltung von (4-47) ermöglichen. Ebenso unverändert zum Fall gleich großer Teillose bleiben die Bestimmungsgleichungen für die Gesamtzykluszeit T_{zyk} sowie für die Belegungszeiten $t_{B,i}$ (vgl. (4-48)).

Vergleichsweise aufwendiger gestaltet sich bei dynamischen Teillosen jedoch die Ermittlung der Transporthäufigkeit, da diese nicht auf direktem Wege berechnet werden kann. Wird dieser Umstand dahingehend berücksichtigt, dass TH anstelle von (4-44) mittels Algorithmus 1 auf Basis von Gesamtkostenfunktion (4-49) zu bestimmen ist, so kann die prinzipielle Vorgehensweise von Algorithmus 5 zur Lösungsfindung im Fall dynamischer Teillose übernommen werden. Allerdings ist zu Schritt 1 noch anzumerken, dass die Ermittlung der Transporthäufigkeit unter Anwendung von Algorithmus 1 auf Basis von

⁴⁰⁷ Zum Nachweis der Konvexität von (4-49) vgl. die Ausführungen in Anlage B.

⁴⁰⁸ Vgl. Schritt 7 von Algorithmus 5.

(4–21) erfolgt⁴⁰⁹ und der Berechnung der isoliert optimalen Verbrauchszeiten nach (4–20) vorgelagert ist. Des Weiteren tritt (4–49) an die Stelle von Formel (4–43) und (4–51) ersetzt Gleichung (4–46). In Schritt 10 entfällt der Kostenvergleich, da durch die Verwendung von Algorithmus 1 ohnehin nur ganzzahligen Transporthäufigkeiten resultieren.

Sortenindividuelle Transporthäufigkeiten

Analog zum Fall gleich großer Teillose kann somit die Berücksichtigung sortenindividueller Transporthäufigkeiten durch die in Tabelle 7 aufgeführten, äquivalenten Bestimmungsgleichungen abgebildet werden.⁴¹⁰

$K(\text{BP}, m_i, \text{TH}_i) = \text{BP} \cdot \sum_{i=1}^I h_i^{\text{GY}}(\text{TH}_i) \cdot m_i + \frac{1}{\text{BP}} \cdot \sum_{i=1}^I \frac{k_{\text{R},i} + \text{TH}_i \cdot k_{\text{T},i}}{m_i}$	(4–49) α
$\text{BP} = \max \left\{ \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^I \frac{k_{\text{R},i} + \text{TH}_i \cdot k_{\text{T},i}}{m_i}}{\sum_{i=1}^I h_i^{\text{GY}}(\text{TH}_i) \cdot m_i}}; \frac{\sum_{i=1}^I \frac{t_{\text{R},i}}{m_i}}{1 - \sum_{i=1}^I \frac{x_{\text{v},i}}{x_{\text{p},i}}} \right\}$	(4–51) α

Tabelle 7: Äquivalente Bestimmungsgleichungen bei sortenindividuellen Transporthäufigkeiten

4.5 Ansatz variierender Losgrößen

Ebenso wie für den BPA existiert für die Lösung des klassischen ELSP nach dem TVL-Ansatz bisher kein Modell zur Berücksichtigung von Teillosen im Sinne der Losüberlappung.⁴¹¹ Daher wird im Folgenden der Ansatz von DOBSON mit der Erweiterung von ZIPKIN entsprechend adaptiert,⁴¹² so dass eine simultane Transportlosgrößenplanung bei von Auflage zu Auflage variierenden Fertigungslosgrößen integriert werden kann.

⁴⁰⁹ Bei Berücksichtigung sortenindividueller Transporthäufigkeiten werden diese dementsprechend nach Algorithmus 1 auf Grundlage von (4–16) unter Wegfall des Summenzeichens ermittelt. Die isoliert optimalen Verbrauchszeiten ergeben sich sodann gemäß (4–15) (vgl. hierzu auch Kapitel 4.2.2).

⁴¹⁰ Insbesondere sind auch die bei gleich großen Teillosen und sortenindividuellen Transporthäufigkeiten angeführten Erweiterungen in Schritt 3.1 zu berücksichtigen. Zum Nachweis der Konvexität von (4–49) α vgl. die Ausführungen in Anlage B.

⁴¹¹ Vgl. Kapitel 4.1.

⁴¹² Vgl. DOBSON, G., 1987 bzw. ZIPKIN, P. H., 1991.

4.5.1 Erläuterungen zu den Auswirkungen aufgrund der spezifischen Eigenschaften des Ansatzes

Die Vorgehensweise zur Lösungsfindung (bei „offener Fertigung“) wurde bereits in Kapitel 2.3.4 in ihrer Struktur erläutert und erfolgt in drei Stufen. Der Fokus der folgenden Ausführungen liegt auf dem Ermitteln der Auflagehäufigkeiten und eines Startwerts für die Gesamtzykluslänge (Stufe 1), der Generierung und Fixierung einer ausgeglichenen Produktionsreihenfolge (Stufe 2) sowie der Aufstellung und Konkretisierung der Zielfunktion mit den zu berücksichtigenden Nebenbedingungen (Stufe 3). Die eigentliche Lösung des daraus resultierenden Optimierungsproblems wird nicht explizit beschrieben, da sie ausschließlich computergestützt mittels der Funktion „NMinimize“ in WOLFRAM MATHEMATICA erfolgt.⁴¹³ Der so ermittelte Kostenwert kann insbesondere als zusätzliche Referenz zur Beurteilung der Qualität der jeweiligen BPA-Lösung herangezogen werden. Dabei ist allerdings zu beachten, dass sich beim TVL-Ansatz – aufgrund der nicht mehr produkt- sondern positionsbezogenen Maschinenbelegungsplanung – eine weitere Gestaltungsalternative hinsichtlich der Festlegung der Teillosanzahl ergibt. Zusätzlich zur einheitlichen und sortenindividuellen Transporthäufigkeit besteht beim TVL-Ansatz die Möglichkeit zur Berücksichtigung einer positionsspezifisch optimalen Anzahl an Transporten. Diese letztgenannte Alternative wird in Kapitel 4.5.2 exemplarisch für die Formulierung und Erläuterung des entwickelten Lösungsalgorithmus herangezogen. Zur Vermeidung von Redundanzen durch die Einbeziehung der beiden anderen Fälle wird deren anschließende Darstellung – sowohl bei gleich großen als auch bei dynamischen Teillosen – auf die Ermittlung bzw. Anpassung der Zielfunktion und der Nebenbedingungen sowie die Erläuterung wesentlicher Unterschiede begrenzt.

Während im CCM die einheitliche Verbrauchszeit t_v und beim BPA die produktspezifischen Multiplikatoren m_i zusammen mit der gemeinsamen BP-Länge BP die zentralen Variablen der Zielfunktion repräsentieren, kommt diese Rolle im TVL-Ansatz der positionsspezifischen Produktionszeit $t_{p,j}$ sowie der Gesamtzykluslänge T_{zyk} zu. Dies spiegelt sich auch in den Nebenbedingungen des Planungsproblems wider.⁴¹⁴ Während (2–21) bis (2–23) unabhängig vom Lagerhaltungsmodell für die weiteren Betrachtungen über-

⁴¹³ Vgl. hierzu auch die Ausführungen am Ende von Kapitel 2.3.4.

⁴¹⁴ Vgl. Kapitel 2.3.4.

nommen werden können, besitzt Restriktion (2–20) hingegen in dieser Form lediglich für den Fall einer „offenen Fertigung“ Gültigkeit und muss somit zur Integration des Lossplittings entsprechend angepasst werden.

Im Allgemeinen soll Nebenbedingung (2–20) sicherstellen, dass die Fertigungslosgröße eines Produkts so dimensioniert wird, dass sie exakt ausreichend ist bis zum frühestmöglichen Verbrauchsbeginn von dessen nächster Losauflage.

$$(2-20) \quad x_{p,j} \cdot t_{p,j} = x_{v,j} \cdot \left[t_{p,j} + t_{f,j} + \sum_{s=j+1}^{j'(j)-1} (t_{R,s} + t_{p,s} + t_{f,s}) + t_{R,j'(j)} \right]$$

Bei einer „offenen Fertigung“ entspricht der Zeitpunkt der Verfügbarkeit eines Fertigungsloses für den Verbrauch seinem Produktionsstart.⁴¹⁵ Eine Abhängigkeit zwischen der Fertigungsmenge eines Produkts ($x_{p,j} \cdot t_{p,j}$) und der nächsten Losauflage des gleichen Produkts besteht in diesem Fall somit ausschließlich durch die anfallende Rüstzeit $t_{R,j'(j)}$. Da diese jedoch annahmegemäß reihenfolgeunabhängig und für jede Losauflage eines Produkts i identisch ist ($t_{R,j} = t_{R,j'(j)} = t_{R,i}$), kann ein Fertigungslos als in sich geschlossenes, unabhängiges Produktions- und Verbrauchsintervall angesehen werden. In anderen Worten: Bei der „offenen Fertigung“ entspricht die in Position j gefertigte Menge von Produkt i exakt der im Zeitraum bis zur erneuten Auflage von i verbrauchten Menge. Es findet lediglich eine „Verschiebung“ um $t_{R,i}$ statt, die im Endeffekt – aufgrund der erläuterten Zusammenhänge – allerdings keinen weiteren Einfluss auf die vorliegende Kosten- und Planungssituation hat.

Durch die Integration des Lossplittings ändert sich die Situation nun dahingehend, dass die Reichweite eines Fertigungsloses – neben der Rüstzeit – auch noch die Produktionszeit des ersten Transportloses der nächsten Auflage des gleichen Produkts abdecken muss (vgl. Abbildung 14).

⁴¹⁵ Dieser Sachverhalt repräsentiert die „zero-inventory“-Bedingung im klassischen Sinne (vgl. Kapitel 2.2.1).

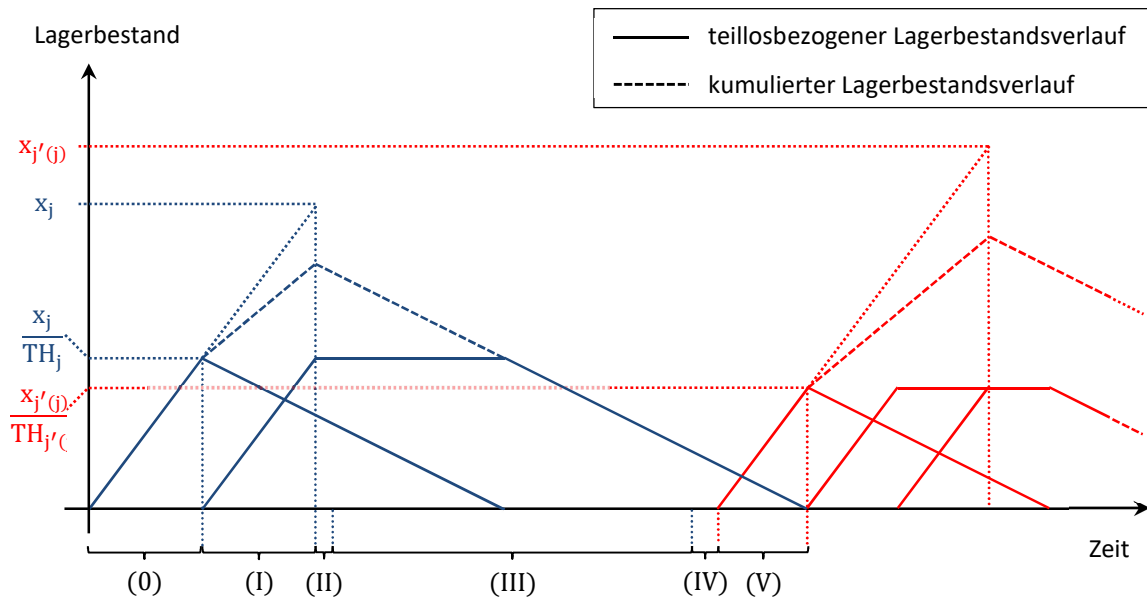


Abbildung 14: Zwei aufeinanderfolgende Losaufträge eines Produkts bei gleich großen Teillosen und positionsspezifischen Transporthäufigkeiten (Veranschaulichung zu Nebenbedingung (4-52))

Aufgrund der Möglichkeit variierender Losgrößen ($x_j \neq x_{j'(j)}$) sowie gegebenenfalls noch zusätzlich positionsspezifischer Transporthäufigkeiten ($TH_j \neq TH_{j'(j)}$) sind die Zeitabschnitte (0) und (V) in der Regel nicht identisch und müssen demnach separat berücksichtigt werden. Für den in Abbildung 14 dargestellten Fall setzt sich die ursprüngliche Nebenbedingung (2-20) nun generell wie folgt zusammen:

$$x_{p,j} \cdot t_{p,j} = x_{v,j} \cdot \left[\underbrace{\left(t_{p,j} - \frac{t_{p,j}}{TH_j} \right)}_{(I)} + \underbrace{t_{f,j}}_{(II)} + \underbrace{\sum_{s=j+1}^{j'(j)-1} (t_{R,s} + t_{p,s} + t_{f,s})}_{(III)} + \underbrace{t_{R,j'(j)}}_{(IV)} + \underbrace{\frac{t_{p,j'(j)}}{TH_{j'(j)}}}_{(V)} \right] \quad (4-52)$$

Dabei repräsentieren die einzelnen Abschnitte folgende Zeitintervalle:

- (I): restliche Produktionszeit der Sorte i in Position j nach Fertigstellung des ersten Teilloses
- (II): freie Maschinenzeit in Position j
- (III): Summe der Rüst-, Produktions- und freien Maschinenzeiten aller Produkte bis zur erneuten Auflage der Sorte i aus Position j
- (IV): Rüstzeit für Produkt i in Position $j'(j)$
- (V): Produktionszeit des ersten Teilloses von Produkt i in Position $j'(j)$

Die Summe der Abschnitte (I) bis (V) entspricht somit dem Verbrauchszeitraum der in Position j gefertigten Menge von Produkt i.

Erläuterungen zur „zero-inventory“-Bedingung im Kontext des CCM und BPA

Prinzipiell ist eine solch differenzierte Betrachtung der Produktions- und Verbrauchsintervalle auch für das CCM und den BPA zu führen, sofern das zugrunde liegende Lagerhaltungsmodell einen Fall des Lossplittings oder die „geschlossene Fertigung“ ($TH=1$) abbildet.⁴¹⁶ Da im CCM und beim BPA jedoch die Fertigungslosgrößen (und damit auch die Transporthäufigkeiten) eines Produkts von Auflage zu Auflage konstant bleiben, gilt $\frac{t_{p,j}}{TH_j} = \frac{t_{p,j'(j)}}{TH_{j'(j)}}$ bzw. $\frac{t_{p,i}}{TH_i} = \text{const.}$ ⁴¹⁷ Demzufolge lässt sich die Summe aus (I) und (V) verkürzen zu $t_{p,j}$ (bzw. $t_{p,i}$). Somit stellt sich im Endeffekt ein zum TVL-Ansatz bei „offener Fertigung“ gewissermaßen vergleichbares Resultat ein, da es sich wiederum lediglich um eine „Verschiebung“ der Zeiträume (um $t_{R,i} + \frac{t_{p,i}}{TH_i}$) handelt. Die Länge der Produktions- und Verbrauchsintervalle bleibt demnach unverändert, so dass schlussendlich keine weiteren Anpassungen des Modells hinsichtlich der Kosten- und Planungssituation notwendig werden.

Für alle Lösungsansätze in dieser Arbeit, bei denen vom Lagerhaltungsmodell der „offenen Fertigung“ abgewichen wird, bleibt in diesem Zusammenhang jedoch anzumerken, dass die eigentliche Definition der „zero-inventory“-Bedingung⁴¹⁸ nicht mehr zutreffend ist. Würde die Fertigung eines Produkts erst dann wieder beginnen, wenn der Lagerbestand auf null gesunken ist, so könnte die Nachfrage bis zur Fertigstellung des ersten Transportloses⁴¹⁹ nicht bedient werden. Daher wird die „zero-inventory“-Bedingung im erweiterten Sinne wie folgt interpretiert: Bei jeder Losauflage eines Produkts darf nur exakt die Menge produziert werden, die bis zum frühestmöglichen Verbrauchsstart der nächsten Auflage des gleichen Produkts zur kontinuierlichen Deckung von dessen Nachfrage benötigt wird.⁴²⁰

⁴¹⁶ Vgl. zur „geschlossenen Fertigung“ Kapitel 5.2.2 sowie zum Lossplitting im CCM Kapitel 4.3 bzw. im BPA Kapitel 4.4.

⁴¹⁷ Für den Fall dynamischer Teillose gilt analog $\frac{q_{1,j}(TH_j)}{x_{p,j}} = \frac{q_{1,j'(j)}(TH_{j'(j)})}{x_{p,j}}$ bzw. $\frac{q_{1,i}(TH_i)}{x_{p,i}} = \text{const.}$

⁴¹⁸ Vgl. Kapitel 2.2.1.

⁴¹⁹ Im Fall der „geschlossenen Fertigung“ entspräche dies der gesamten Losauflage.

⁴²⁰ Das heißt sowohl Fehlmengen bzw. Rückstände als auch eine über den aktuellen Bedarf hinausgehende „Überproduktion“ sind nicht erlaubt.

4.5.2 Gleich große Teillöse

Positionsspezifische Transporthäufigkeiten

Wird die Möglichkeit zur Berücksichtigung positionsspezifischer Transporthäufigkeiten in Betracht gezogen, so kann die Funktion der entscheidungsrelevanten Gesamtkosten wie folgt hergeleitet werden. Den Ausgangspunkt hierfür bilden die Kosten je Zeiteinheit der isolierten Lösung in Abhängigkeit von den produktindividuellen Variablen $t_{v,i}$ und TH_i :

$$(4-1) \quad K^{SZ}(t_{v,i}, TH_i) = \sum_{i=1}^I h_i^{SZ}(TH_i) \cdot t_{v,i} + \sum_{i=1}^I \frac{k_{R,i} + TH_i \cdot k_{T,i}}{t_{v,i}}$$

Der Übergang von der produkt- zur positionsbezogenen Betrachtung basiert nun auf der Grundlage, dass jeder Position j genau ein Produkt i zugeordnet ist.⁴²¹ Die Kosten einer Fertigungsposition j entsprechen somit den losweisen Kosten eines Produkts i , das in Position j gefertigt wird und ergeben sich demnach aus (4-1) durch den Wegfall des Summenzeichens und die Multiplikation mit der Losreichweite $t_{v,i}$:

$$K_{\text{los}}^{SZ}(t_{v,j}, TH_j) = h_j^{SZ}(TH_j) \cdot t_{v,j}^2 + k_{R,j} + TH_j \cdot k_{T,j}$$

Aus der Summe über alle j Positionen resultieren wiederum die in der Zykluszeit anfallenden Gesamtkosten.⁴²² Werden diese durch T_{zyk} dividiert und wird zudem noch $t_{v,j} = \frac{x_{p,j}}{x_{v,j}} \cdot t_{p,j}$ berücksichtigt, so ergibt sich letztendlich als Funktion der Gesamtkosten je Zeiteinheit:⁴²³

$$K(T_{\text{zyk}}, t_{p,j}, TH_j) = \frac{1}{T_{\text{zyk}}} \left[\sum_{j=1}^J h_j^{SZ}(TH_j) \cdot \frac{x_{p,j}^2}{x_{v,j}^2} \cdot t_{p,j}^2 + \sum_{j=1}^J (k_{R,j} + TH_j \cdot k_{T,j}) \right] \quad (4-53)$$

Diese (insbesondere vom Quadrat der Produktionszeiten abhängige) Zielfunktion ist unter Einhaltung der in Kapitel 2.3.4 erläuterten Nebenbedingungen (2-21) - (2-23) sowie der

⁴²¹ Vgl. Kapitel 2.3.4. Jede Position entspricht somit der Losauflage eines ihr zugeordneten Produkts.

⁴²² Die Zykluszeit setzt sich aus den Verbrauchszeiten der einzelnen Losauflagen zusammen (vgl. hierzu auch (2-22)).

⁴²³ Eine direkte Gegenüberstellung mit (2-19) lässt erkennen, dass sich (4-53) ebenso aus (2-19) ableiten lässt, indem eine Anpassung der losvariablen Bestandteile durch das Ersetzen von h_j^o mit h_j^{SZ} erfolgt und der losfixe Anteil um $TH_j \cdot k_{T,j}$ ergänzt wird.

im vorangegangenen Abschnitt aus (2–20) abgeleiteten Restriktion (4–52) zu minimieren. Zur Initialisierung des Lösungsverfahrens sind jedoch zunächst potentiell kostengünstige Auflagehäufigkeiten, eine damit verbundene Produktionsreihenfolge sowie sinnvolle Startwerte für die Variablen T_{zyk} , $t_{p,j}$ und TH_j festzulegen. Hierfür wird auf die produkt-spezifischen Optimalwerte der isolierten Lösung bei Berücksichtigung der maximalen Bruttoauslastung zurückgegriffen.⁴²⁴ Daher ist es notwendig, Kostenfunktion (4–1) in Abhängigkeit von der Gesamtzykluszeit T_{zyk} und den produktindividuellen Auflagehäufigkeiten n_i darzustellen, indem $t_{v,i} = \frac{T_{zyk}}{n_i}$ berücksichtigt wird:

$$K^{SZ}(T_{zyk}, n_i, TH_i) = T_{zyk} \cdot \sum_{i=1}^I \frac{h_i^{SZ}(TH_i)}{n_i} + \frac{1}{T_{zyk}} \cdot \sum_{i=1}^I (k_{R,i} + TH_i \cdot k_{T,i}) \cdot n_i \quad (4-54)$$

Aus den partiellen Ableitungen dieser Funktion nach TH_i bzw. T_{zyk} resultieren durch Nullsetzen und entsprechende Umformungen folgende Formeln zur kostenoptimalen Anpassung der Transporthäufigkeiten bzw. der Gesamtzykluslänge bei Veränderungen eines dieser Werte oder der Auflagehäufigkeiten:⁴²⁵

$$TH_i(T_{zyk}, n_i) = \frac{T_{zyk}}{n_i} \cdot \sqrt{\frac{c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2}{k_{T,i} \cdot x_{p,i}}} \quad (4-55)$$

$$T_{zyk}(n_i, TH_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^I (k_{R,i} + TH_i \cdot k_{T,i}) \cdot n_i}{\sum_{i=1}^I \frac{h_i^{SZ}(TH_i)}{n_i}}}$$

Wird zudem berücksichtigt, dass T_{zyk} zur Einhaltung der maximalen Bruttoauslastung eine gewisse Mindestlänge aufweisen muss, so ergibt sich letztendlich:⁴²⁶

$$T_{zyk}(n_i, TH_i) = \max \left\{ \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^I (k_{R,i} + TH_i \cdot k_{T,i}) \cdot n_i}{\sum_{i=1}^I \frac{h_i^{SZ}(TH_i)}{n_i}}}; \frac{\sum_{i=1}^I n_i \cdot t_{R,i}}{1 - \sum_{i=1}^I \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}} \right\} \quad (4-56)$$

⁴²⁴ Vgl. Kapitel 4.2.1.

⁴²⁵ Zum Nachweis der Konvexität von (4–54) bezüglich TH_i bzw. T_{zyk} vgl. die Ausführungen in Anlage B.

⁴²⁶ Die Bedingung für die Mindestlänge resultiert aus (2–4) unter Berücksichtigung von $t_{v,i} = \frac{T_{zyk}}{n_i}$.

Damit sind die zentralen Bestimmungsgleichungen zur Erweiterung des TVL-Ansatzes um die Möglichkeit des Lossplittings gegeben, so dass die Vorgehensweise zur Aufstellung des konkreten Optimierungsproblems und der Ermittlung geeigneter Startwerte im folgenden Algorithmus beschrieben werden kann.

Algorithmus 6: Eine Heuristik nach dem TVL-Ansatz bei der Einbeziehung von Lossplitting

Schritt 1: Berechne die isoliert optimalen Verbrauchszeiten⁴²⁷

$$t_{v,i}^* = \max \left\{ \sqrt{\frac{k_{R,i}}{h_i^0}} ; \frac{t_{R,i}}{1 - \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}} \right\} \text{ nach (2-3) sowie die korrespondierenden}$$

$$\text{Transporthäufigkeiten } TH_{i,opt}(t_{v,i}) = t_{v,i} \cdot \sqrt{\frac{c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2}{k_{T,i} \cdot x_{p,i}}} \text{ nach (4-3).}$$

Schritt 2: Bestimmung der relativen Auflagehäufigkeiten $n_{i,rel}$

- Falls $\sum_{i=1}^I \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}} + \frac{t_{R,i}}{t_{v,i}} \leq 1$ (vgl. (2-4)), dann setze $\lambda = 0$,
sonst bestimme λ so, dass (4-7) erfüllt ist.⁴²⁸
- Berechne $t_{v,i}(\lambda)$ nach (4-6) und setze $n_{i,rel} = \frac{1}{t_{v,i}}$ (vgl. (2-17)).

Schritt 3: Vorläufige Festlegung von maximal vier (a, b, c, d) alternativen Gesamtzykluslängen T_{zyk} und Auflagehäufigkeitstupeln n_i

- Setze $T_{zyk}^a = \max\{t_{v,i}\}$, $T_{zyk}^b = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \max\{t_{v,i}\}$ sowie
 $T_{zyk}^c = \sqrt{2} \cdot \max\{t_{v,i}\}$ und berechne $n_i^a = T_{zyk}^a \cdot n_{i,rel}$,
 $n_i^b = T_{zyk}^b \cdot n_{i,rel}$ sowie $n_i^c = T_{zyk}^c \cdot n_{i,rel}$.⁴²⁹

⁴²⁷ Vgl. auch die Ausführungen zu Formel (4-4) in Kapitel 4.2.1.

⁴²⁸ Im konkreten Fall erfolgt die Berechnung von λ mittels WOLFRAM MATHEMATICA und der Funktion „NSolve“.

⁴²⁹ DOBSON betrachtet die Gesamtzykluslänge mehr oder weniger als gegeben bzw. auf einen gewünschten Wert festgelegt (vgl. DOBSON, G., 1987, S. 767). CARSTENSEN stellt hierzu Folgendes fest: „Über die vorzugebene [sic!] Zykluslänge trifft Dobson keine Aussage. Sinnvollerweise müsste diese im Bereich der größten Produktzykluslänge aus der unabhängigen Lösung sein, sofern die Bruttoauslastung ... kleiner eins ist.“ (CARSTENSEN, P., 2002, S. 48). Um im Weiteren nicht nur eine, zu $T_{zyk}^a = \max\{t_{v,i}\}$ korrespondierende Auflagehäufigkeitskombination n_i^a als potentielle Lösung zu betrachten, werden die Grenzen des von CARSTENSEN benannten Intervalls ($T_{zyk} \in \left[\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \max\{t_{v,i}\}; \sqrt{2} \cdot \max\{t_{v,i}\} \right]$) mit den zugehörigen, in der Regel von n_i^a verschiedenen Produktauflegehäufigkeiten miteinbezogen (vgl. hierzu auch die Erläuterungen zu (2-18) in Kapitel 2.3.4).

- Falls $\lambda > 0$ setze zudem $T_{zyk}^d = \frac{1}{\min\{n_{i,rel}\}}$
und berechne $n_i^d = \frac{n_{i,rel}}{\min\{n_{i,rel}\}}$.⁴³⁰

Schritt 4: Ermittlung der POT-Auflagehäufigkeiten⁴³¹

- Falls $n_i < 1$, setze $n_i = 1$ und bestimme n_i^- und n_i^+ so, dass gilt:
 $n_i^- \leq n_i < n_i^+$ mit $n_i^- \in \{1, 2, 4, 8, \dots\}$ und $n_i^+ = 2 \cdot n_i^-$.
- Berechne $TH_i^-(T_{zyk}, n_i^-)$ und $TH_i^+(T_{zyk}, n_i^+)$ nach (4–55).
- Berechne $K_i^-(T_{zyk}, n_i^-, TH_i^-)$ und $K_i^+(T_{zyk}, n_i^+, TH_i^+)$ nach (4–54) unter Wegfall des Summenzeichens.
- Falls $K_i^+ < K_i^-$, setze $n_i = n_i^+$, sonst setze $n_i = n_i^-$.

Schritt 5: • Berechne die zu T_{zyk} und n_i optimalen Transporthäufigkeiten $TH_i(T_{zyk}, n_i)$ gemäß (4–55).

- Anpassung der Zykluszeit an die aktuellen Werte für n_i und TH_i gemäß (4–56).
- Aktualisierung von $TH_i(T_{zyk}, n_i)$ gemäß (4–55).

Schritt 6: Gehe zurück zu Schritt 4 und wiederhole die bis hierher beschriebene Vorgehensweise solange, bis sich die in Schritt 4 ermittelten Werte für die Auflagehäufigkeiten n_i im Vergleich zur vorherigen Iteration nicht mehr ändern.⁴³²

⁴³⁰ Zur Festlegung eines vorläufigen Startwerts für die Zykluslänge im Fall einer Bruttoauslastung größer eins trifft auch CARSTENSEN keine weitere Aussage. Für $\lambda > 0$ wird daher an dieser Stelle eine weitere, alternative Gesamtzykluszeit in die Betrachtung einbezogen. Dazu werden aus den relativen Auflagehäufigkeiten normierte Werte $n_i^d = \frac{n_{i,rel}}{\min\{n_{i,rel}\}}$ berechnet, so dass $\min\{n_i^d\} = 1$ und somit $T_{zyk}^d = \frac{1}{\min\{n_{i,rel}\}}$ gilt.

⁴³¹ Ab hier werden sämtliche Anweisungen jeweils auf alle in Schritt 3 generierten Alternativen (a, b, c und gegebenenfalls d) angewendet. Aus Gründen der Übersichtlichkeit und zur Vermeidung von Redundanzen wird dabei auf eine separate Darstellung jeder im Einzelnen betrachteten Alternative verzichtet und eine allgemeine Symbolik (T_{zyk}, n_i) verwendet.

⁴³² Diese Vorgehensweise wurde vom BPA übernommen und entsprechend adaptiert (vgl. Algorithmus 5).

Schritt 7: Fixierung der Produktionsreihenfolge⁴³³

- Berechne die vorläufigen Belegungszeiten der Produkte

$$t_{B,i} = t_{p,i} + t_{R,i} \quad \text{mit} \quad t_{p,i}(T_{zyk}, n_i) = \frac{T_{zyk}}{n_i} \cdot \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}$$
- Sortiere die Produkte absteigend primär nach n_i bzw. bei gleichen Auflagehäufigkeiten sekundär nach $t_{B,i}$ und unterteile T_{zyk} in $\max\{n_i\}$ gleich große Abschnitte.
- Ordne die Produkte entsprechend dieser Sortierung sukzessive den $\max\{n_i\}$ identisch langen Teilbereichen so zu, dass eine möglichst gleichmäßige Auslastung aller Abschnitte resultiert. Dabei muss die durch $\frac{\max\{n_i\}}{n_i}$ festgelegte Anzahl an Abschnitten bis zur erneuten Auflage eines Produkts konstant sein.⁴³⁴
- Aus dem Zusammensetzen der einzelnen Abschnitte resultiert letztendlich eine eindeutige Produktionsreihenfolge für den Gesamtzyklus T_{zyk} . Dabei wird jede Produktauflage als eine von $\sum_{i=1}^I n_i$ Positionen interpretiert, deren endgültige Fertigungslosgröße und Transportanzahl noch zu determinieren sind.

Schritt 8: Optimierungsproblem und Startwerte für die Lösungssuche

- Minimiere Kostenfunktion (4–53) unter Berücksichtigung der Nebenbedingungen (2–21), (2–22), (2–23) und (4–52). Hierzu sind konkrete Werte der positionsspezifischen Variablen $t_{p,j}$, $t_{f,j}$ und TH_j sowie die Länge der Gesamtzykluszeit T_{zyk} explizit zu bestimmen.⁴³⁵

⁴³³ Vgl. DOBSON, G., 1987, S. 768 bzw. CARSTENSEN, P., 1999, S. 441.

⁴³⁴ Bei der Generierung eines zulässigen Maschinenbelegungsplans nach dem BPA (vgl. Algorithmus 5) kann es aufgrund der Einplanung eines Produkts in die erste BP mit ausreichend freier Kapazität zu einer ungleichmäßigen Auslastung der BP kommen. Beim TVL-Ansatz hingegen ist zu gewährleisten, dass bei der Fixierung der Produktreihenfolge in jedem Fall eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Produkte auf die einzelnen Abschnitte erfolgt, da die herangezogenen Belegungszeiten lediglich vorläufig sind.

⁴³⁵ Die Betrachtung der Gesamtzykluslänge als Variable geht ursprünglich zurück auf ZIPKIN, P. H., 1991. Für den Fall positionsabhängiger Transporthäufigkeiten umfasst das Optimierungsproblem somit insgesamt $(1 + 3 \cdot \sum_{i=1}^I n_i)$ Variablen, die teilweise über mehrere Nebenbedingungen voneinander abhängig sind.

- Als Startwerte der Optimierungsprozedur werden die aktuellen produktspezifischen Werte $t_{p,i}$ (vgl. Schritt 7) und TH_i (vgl. Schritt 5) den jeweiligen Variablen der Positionen zugeordnet, in denen Produkt i eingeplant ist. Für T_{zyk} wird ebenfalls der zuletzt aktualisierte Wert (aus Schritt 5) übergeben. Die freien Zeiten $t_{f,j}$ nehmen zur Initialisierung in allen Positionen den Wert null an.

Schritt 9: Ermittlung und Vergleich der Lösungsalternativen

Das in Schritt 8 definierte Optimierungsproblem wird nun für alle Alternativen (a, b, c und gegebenenfalls d) – sinnvollerweise computergestützt⁴³⁶ – gelöst. Ein Vergleich der ermittelten Gesamtkosten führt letztendlich zur Auswahl der günstigsten Lösung mit den zugehörigen Ausprägungen der Entscheidungsvariablen T_{zyk} , $t_{p,j}$, $t_{f,j}$ und TH_j .

Für die Berücksichtigung sortenindividueller Transporthäufigkeiten ($TH_j=TH_{j'(j)}$) oder den Fall einer über alle Produkte einheitlichen Anzahl an Teillosen ($TH_j=TH_i=TH$) kann die prinzipielle Abfolge und Vorgehensweise von Algorithmus 6 beibehalten werden. Relevante Unterschiede zum Fall positionsspezifischer Transporthäufigkeiten sind nachfolgend in Tabelle 8 bzw. Tabelle 9 festgehalten.

Sortenindividuelle Transporthäufigkeiten

zu Schritt 8: In der Zielfunktion (4–53) und der Nebenbedingung (4–52) wird $TH_j = TH_i$ gesetzt für alle $j \in J_i$ mit J_i als Menge aller Positionen in denen Produkt i gefertigt wird.⁴³⁷

Tabelle 8: Anpassungen von Algorithmus 6 bei sortenindividuellen Transporthäufigkeiten und gleich großen Teillosen

⁴³⁶ Dies erfolgt hier konkret mittels der Funktion „NMinimize“ in WOLFRAM MATHEMATICA.

⁴³⁷ Die Anzahl der Variablen des Optimierungsproblems beträgt in diesem Fall $1 + I + 2 \cdot \sum_{i=1}^I n_i$.

Einheitliche Transporthäufigkeit

zu Schritt 1: Die Berechnung der Transporthäufigkeit erfolgt nach (4–10).

zu Schritt 2:

- Um $TH_i = TH$ zu berücksichtigen, wird (4–7) durch (4–13) und (4–6) durch (4–12) ersetzt.
- Falls $\lambda > 0$, passe die Transporthäufigkeit TH gemäß (4–10) an die neuen Verbrauchswerte $t_{v,i}(\lambda)$ an.

zu Schritt 4: Im Falle einer einheitlichen Transporthäufigkeit wird auf die Anpassung von TH an n_i^- bzw. n_i^+ verzichtet und stattdessen der letzte ermittelte Wert von TH für beide alternativen Auflagehäufigkeiten verwendet.⁴³⁸

zu Schritt 5: In (4–56) wird $TH_i = TH$ gesetzt und die Berechnung bzw. Aktualisierung der Transporthäufigkeit erfolgt gemäß

$$TH(T_{zyk}, n_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^I \frac{c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2 \cdot T_{zyk}}{x_{p,i} \cdot n_i}}{\sum_{i=1}^I \frac{k_{T,i} \cdot n_i}{T_{zyk}}} \quad (4-55)\alpha$$

zu Schritt 8: In der Zielfunktion (4–53) und der Nebenbedingung (4–52) wird $TH_j = TH$ gesetzt.⁴³⁹

Tabelle 9: Anpassungen von Algorithmus 6 bei einheitlicher Transporthäufigkeit und gleich großen Teillosen

4.5.3 Dynamische Teillosgrößen

Positionsspezifische Transporthäufigkeiten

Für den Fall dynamischer Teillosgrößen erfolgt die Herleitung bzw. Anpassung der Zielfunktion und Nebenbedingungen sowie der Gleichungen zur Startwertermittlung analog zum vorhergehenden Kapitel. Bei Berücksichtigung positionsbezogener Transporthäufig-

⁴³⁸ Vgl. zur Begründung Fußnote 392, wobei Multiplikatoren und Auflagehäufigkeiten in diesem Kontext als jeweilige (reziproke) Äquivalente im BPA bzw. TVL-Ansatz verstanden werden können. Bei der anschließenden Berechnung der Kostenwerte $K_i^-(T_{zyk}, n_i^-, TH)$ und $K_i^+(T_{zyk}, n_i^+, TH)$ nach (4–54) ist nicht nur der Wegfall des Summenzeichens, sondern auch $TH_i = TH$ zu berücksichtigen.

⁴³⁹ Die Anzahl der Variablen des Optimierungsproblems beträgt in diesem Fall $2 + 2 \cdot \sum_{i=1}^I n_i$.

keiten kann die zu minimierende Kostenfunktion somit auf Basis (4–53) durch den Austausch des spezifischen Lagerhaltungskostenterms $h_j^{SZ}(TH_j)$ mit $h_j^{GY}(TH_j)$ angegeben werden:

$$K(T_{zyk}, t_{p,j}, TH_j) = \frac{1}{T_{zyk}} \left[\sum_{j=1}^J h_j^{GY}(TH_j) \cdot \frac{x_{p,j}^2}{x_{v,j}^2} \cdot t_{p,j}^2 + \sum_{j=1}^J (k_{R,j} + TH_j \cdot k_{T,j}) \right] \quad (4-57)$$

In Nebenbedingung (4–52) ist die Produktionszeit des jeweils ersten Teilloses eines Fertigungsloses ($\frac{t_{p,j}}{TH_j}$ bzw. $\frac{t_{p,j'(j)}}{TH_{j'(j)}}$ bei gleich großen Transportlosen) an das vorliegende Lossplittingmodell anzupassen und dementsprechend durch den Ausdruck $\frac{q_{1,j}(TH_j)}{x_{p,j}}$ bzw. $\frac{q_{1,j'(j)}(TH_{j'(j)})}{x_{p,j}}$ zu ersetzen:⁴⁴⁰

$$x_{p,j} \cdot t_{p,j} = x_{v,j} \cdot \left[\left(t_{p,j} - \frac{q_{1,j}(TH_j)}{x_{p,j}} \right) + \dots \right. \\ \left. \dots + t_{f,j} + \sum_{s=j+1}^{j'(j)-1} (t_{R,s} + t_{p,s} + t_{f,s}) + t_{R,j'(j)} + \frac{q_{1,j'(j)}(TH_{j'(j)})}{x_{p,j}} \right] \quad (4-58)$$

Die Nebenbedingungen (2–21) bis (2–23) bleiben unverändert, so dass das Gleichungssystem des grundlegenden Optimierungsproblems hiermit vollständig beschrieben ist. Die des Weiteren zur Initialisierung des Lösungsverfahrens erforderlichen Bestimmungsgleichungen lassen sich wiederum aus (4–14) unter Berücksichtigung von $t_{v,i} = \frac{T_{zyk}}{n_i}$ ableiten:

$$K^{GY}(T_{zyk}, n_i, TH_i) = T_{zyk} \cdot \sum_{i=1}^I \frac{h_i^{GY}(TH_i)}{n_i} + \frac{1}{T_{zyk}} \cdot \sum_{i=1}^I (k_{R,i} + TH_i \cdot k_{T,i}) \cdot n_i \quad (4-59)$$

Durch partielles Differenzieren von (4–59) nach T_{zyk} lässt sich durch Nullsetzen und Umformen des resultierenden Ausdrucks die Formel zur Berechnung der Gesamtzykluszeit in Abhängigkeit von den produktindividuellen Auflage- und Transporthäufigkeiten ermitteln:⁴⁴¹

⁴⁴⁰ Vgl. Abbildung 14 sowie Fußnote 417 auf Seite 113.

⁴⁴¹ Zum Nachweis der Konvexität von (4–59) bezüglich TH_i bzw. T_{zyk} vgl. die Ausführungen in Anlage B.

$$T_{\text{zyk}}(n_i, TH_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^I (k_{R,i} + TH_i \cdot k_{T,i}) \cdot n_i}{\sum_{i=1}^I \frac{h_i^{\text{GY}}(TH_i)}{n_i}}}$$

Dabei ist zu beachten, dass T_{zyk} zur Einhaltung der maximalen Bruttoauslastung eine gewisse Mindestlänge aufweisen muss, die sich wiederum aus (2–4) unter Berücksichtigung von $t_{v,i} = \frac{T_{\text{zyk}}}{n_i}$ ergibt. Der Startwert für die Gesamtzykluslänge ist somit letztendlich determiniert durch:

$$T_{\text{zyk}}(n_i, TH_i) = \max \left\{ \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^I (k_{R,i} + TH_i \cdot k_{T,i}) \cdot n_i}{\sum_{i=1}^I \frac{h_i^{\text{GY}}(TH_i)}{n_i}}}, \frac{\sum_{i=1}^I n_i \cdot t_{R,i}}{1 - \sum_{i=1}^I \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}} \right\} \quad (4-60)$$

Basierend auf diesen adaptierten Kostenfunktionen und Bestimmungsgleichungen werden im Folgenden die bezüglich Algorithmus 6 notwendigen Anpassungen zur Aufstellung des konkreten Optimierungsproblems und zur Ermittlung geeigneter Startwerte in Tabelle 10 für die betroffenen Schritte erläutert. Gleiches folgt im Anschluss für die Berücksichtigung sortenindividueller Transporthäufigkeiten sowie für den Fall einer über alle Positionen einheitlichen Anzahl an Teillosen.

zu Schritt 1: Vorab werden die isoliert optimalen Transporthäufigkeiten TH_i nach Algorithmus 1 auf Basis von Kostenfunktion (4–16) unter Wegfall des Summenzeichens ermittelt. Die anschließende Berechnung der korrespondierenden Verbrauchszeiten $t_{v,i}(TH_i)$ erfolgt gemäß (4–15).

zu Schritt 2: (4–7) wird durch (4–18) und (4–6) durch (4–17) ersetzt.⁴⁴²

⁴⁴² Die Änderungen berücksichtigen den Austausch des spezifischen Lagerkostenterms h_i^{SZ} durch h_i^{GY} .

- zu Schritt 4:
- Die Ermittlung der Transporthäufigkeiten $TH_i^-(T_{zyk}, n_i^-)$ und $TH_i^+(T_{zyk}, n_i^+)$ erfolgt nach Algorithmus 1 auf Basis von Kostenfunktion (4–59) unter Wegfall des Summenzeichens.
 - Die Kostenwerte $K_i^-(T_{zyk}, n_i^-, TH_i^-)$ und $K_i^+(T_{zyk}, n_i^+, TH_i^+)$ werden ebenfalls nach (4–59) unter Wegfall des Summenzeichens berechnet.
- zu Schritt 5:
- Die Ermittlung der Transporthäufigkeiten $TH_i(T_{zyk}, n_i)$ erfolgt nach Algorithmus 1 auf Basis von Kostenfunktion (4–59) unter Wegfall des Summenzeichens.
 - (4–56) wird durch (4–60) ersetzt.⁴⁴³
 - Die Aktualisierung der Transporthäufigkeiten $TH_i(T_{zyk}, n_i)$ erfolgt wiederum nach Algorithmus 1 auf Basis von Kostenfunktion (4–59) unter Wegfall des Summenzeichens.
- zu Schritt 8: Zielfunktion (4–53) wird durch (4–57) und Nebenbedingung (4–52) durch (4–58) ersetzt.

Tabelle 10: Anpassungen von Algorithmus 6 bei positionsspezifischen Transporthäufigkeiten und dynamischen Teillosen

Sortenindividuelle Transporthäufigkeiten

Ergänzend zu den in Tabelle 10 angeführten Änderungen ist lediglich in Schritt 8 noch zu berücksichtigen, dass in der Zielfunktion (4–57) und der Nebenbedingung (4–58) $TH_j = TH_i$ gesetzt wird, für alle $j \in J_i$ mit J_i als Menge aller Positionen in denen Produkt i eingeplant ist.

Einheitliche Transporthäufigkeit

Die Unterschiede in den Bestimmungsgleichungen basieren größtenteils auf der Berücksichtigung von $TH_i = TH$. Diese Änderung ist insbesondere bei Verwendung der Formeln (4–59) und (4–60) in Tabelle 11 zu beachten.

⁴⁴³ Die Änderungen berücksichtigen den Austausch des spezifischen Lagerkostenterms h_i^{SZ} durch h_i^{GY} .

- zu Schritt 1: Vorab wird die optimale, einheitliche Transporthäufigkeit TH nach Algorithmus 1 auf Basis von Kostenfunktion (4–21) ermittelt. Die anschließende Berechnung der korrespondierenden Verbrauchszeiten $t_{v,i}(TH)$ erfolgt gemäß (4–20).
- zu Schritt 2: • (4–18) wird durch (4–22) und (4–17) durch (4–23) ersetzt.
• Falls $\lambda > 0$, ermittle für die neuen Verbrauchswerte $t_{v,i}(\lambda)$ die Transporthäufigkeit TH nach Algorithmus 1 auf Basis von Kostenfunktion (4–19).
- zu Schritt 4: • Im Falle einer einheitlichen Transporthäufigkeit wird auf die Anpassung von TH an n_i^- bzw. n_i^+ verzichtet und stattdessen der letzte ermittelte Wert von TH für beide alternativen Auflagehäufigkeiten verwendet.⁴⁴⁴
• Die Kostenwerte $K_i^-(T_{zyk}, n_i^-, TH)$ und $K_i^+(T_{zyk}, n_i^+, TH)$ werden nach (4–59) unter Wegfall des Summenzeichens berechnet.
- zu Schritt 5: • Die Ermittlung der Transporthäufigkeit $TH(T_{zyk}, n_i)$ erfolgt nach Algorithmus 1 auf Basis von Kostenfunktion (4–59).
• (4–56) wird durch (4–60) ersetzt.
• Die Aktualisierung der Transporthäufigkeiten $TH(T_{zyk}, n_i)$ erfolgt wiederum nach Algorithmus 1 auf Basis von Kostenfunktion (4–59).
- zu Schritt 8: Zielfunktion (4–53) wird durch (4–57) und Nebenbedingung (4–52) durch (4–58) ersetzt, wobei $TH_j = TH$ zu berücksichtigen ist.

Tabelle 11: Anpassungen von Algorithmus 6 bei einheitlicher Transporthäufigkeit und dynamischen Teillosten

⁴⁴⁴ Vgl. zur Begründung Fußnote 392, wobei Multiplikatoren und Auflagehäufigkeiten in diesem Kontext als jeweilige (reziproke) Äquivalente im BPA bzw. TVL-Ansatz verstanden werden können.

5 Modellperformance

5.1 Fallbeispiele zum reduzierten Rechenaufwand der optimierten Lösungsverfahren bei einheitlicher Transporthäufigkeit im CCM

Die Performance der Algorithmen 3 und 4 gegenüber den originären Lösungsverfahren wird im Folgenden anhand der Zahlenbeispiele der jeweiligen Ursprungsquelle veranschaulicht. Von einer allgemeinen Evaluation der Laufzeiten wird im vorliegenden Fall abgesehen, da die maximale Anzahl der Schleifendurchläufe der ursprünglichen Algorithmen nicht ohne weiteres bestimmt werden kann.⁴⁴⁵ Dies liegt im Wesentlichen darin begründet, dass zum einen letztendlich in jedem Fall die Optimallösung ermittelt wird sowie zum anderen die Anzahl potentieller Iterationen ausschließlich von der jeweiligen Parameterkonstellation abhängig ist und somit kein allgemeines „worst-case“-Szenario für die Zuordnung zu einer Komplexitätsklasse abgeleitet werden kann.

5.1.1 Zahlenbeispiel zur Anwendung und Performance von Algorithmus 3

Das bei BUSCHER/LINDNER angeführte Rechenexempel beinhaltet zwei Produktsorten und basiert auf folgenden Parameterwerten:⁴⁴⁶

Produkt i	$x_{p,i}$	$x_{v,i}$	$c_{L,i}$	$k_{R,i}$	$k_{T,i}$	$t_{R,i}$
1	80	40	0,1	90	5	0,05
2	51	25	0,2	80	6,1	0,034

Tabelle 12: Parameterwerte des Zahlenbeispiels von BUSCHER/LINDNER

Aus der Summe der Stufenleistungsrelationen⁴⁴⁷ lässt sich die sehr hohe Nettoauslastung von 99,02% berechnen. Dies legt bereits die Vermutung nahe, dass die optimale, gemein-

⁴⁴⁵ Zudem handelt es sich in diesem Fall nicht um klassische Programmierschleifen im eigentlichen Sinne, sondern vielmehr um bedingte Sprungstellen, deren Iterationsanzahl nicht in üblicher Weise offensichtlich oder allgemein ermittelbar ist.

⁴⁴⁶ Vgl. BUSCHER, U.; LINDNER, G., 2000a, S. 33. Weiterhin wird dort ein konkreter Planungszeitraum von $T=200$ Zeiteinheiten zugrunde gelegt, was für einen direkten Vergleich der Berechnungen beachtet werden muss, da in der vorliegenden Arbeit stets die Kosten je Zeiteinheit und als Entscheidungsvariable im CCM die gemeinsame Verbrauchszeit (und nicht wie bei BUSCHER/LINDNER die Auflagehäufigkeit) herangezogen werden.

⁴⁴⁷ $\sum_{i=1}^I \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}$

same Verbrauchszeit voraussichtlich nicht realisierbar sein wird. Für eine detaillierte Darstellung der einzelnen Rechenschritte zur Lösungsfindung nach dem von BUSCHER/LINDNER beschriebenen Verfahren sei auf die zitierte Quelle verwiesen. Im Folgenden soll lediglich die Anzahl der unterschiedlichen Rechen- und Vergleichsoperationen erfasst und mit Algorithmus 3 verglichen werden. Hierfür wird zunächst der Lösungsweg von Algorithmus 3 anhand des Zahlenbeispiels aus Tabelle 12 aufgezeigt. Der relevante Verlauf der beiden Kostenfunktionen sowie die zu deren Tangentialpunkt korrespondierende Transporthäufigkeit TH_{tan} sind zudem in Abbildung 15 dargestellt.

$$\text{Schritt 1: } \bar{t}_v = \frac{\sum_{i=1}^I t_{R,i}}{1 - \sum_{i=1}^I \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}} = 8,568 ;$$

$$TH_{\text{opt}}(t_{v,\text{opt}}) = 5,47453 \quad (\text{nach (4-29)}) ;$$

$$TH_{\text{tan}}(\bar{t}_v) = 5,29095 \quad (\text{nach (4-31)}) ;$$

$$TH_{\text{tan}} < TH_{\text{opt}}(t_{v,\text{opt}}) \rightarrow \text{gehe zu Schritt 2.}$$

$$\text{Schritt 2: } TH_{\text{ab}}^{\text{gz}} = \lfloor TH_{\text{opt}}(t_{v,\text{opt}}) \rfloor = 5 \quad \text{und} \quad TH_{\text{auf}}^{\text{gz}} = \lceil TH_{\text{opt}}(t_{v,\text{opt}}) \rceil = 6 ;$$

$$TH_{\text{ab}}^{\text{gz}} < TH_{\text{tan}} \rightarrow K^{\text{SZ}}(TH_{\text{auf}}^{\text{gz}} = 6) = 53,4291 \quad (\text{nach (4-27)}) ;$$

$$K^{\text{SZ}}(\bar{t}_v, TH_{\text{ab}}^{\text{gz}} = 5) = 53,4341 \quad (\text{nach (4-24)}) ;$$

$$K^{\text{SZ}}(TH_{\text{auf}}^{\text{gz}} = 6) < K^{\text{SZ}}(\bar{t}_v, TH_{\text{ab}}^{\text{gz}} = 5) \rightarrow TH^{\text{gz}} = TH_{\text{auf}}^{\text{gz}} = 6 ;$$

Gehe zu Schritt 4.

$$\text{Schritt 4: } TH^{\text{gz}} = 6 \quad \text{und} \quad t_v = \max \left\{ \underbrace{t_{v,\text{opt}}(TH^{\text{gz}})}_{(4-25)} = 8,8566 ; \bar{t}_v \right\} = 8,8566 ;$$

$$K^{\text{SZ}}(t_v, TH^{\text{gz}}) = K^{\text{SZ}}(TH_{\text{auf}}^{\text{gz}}) = 53,4291 .$$

	BUSCHER/LINDNER	Algorithmus 3
Berechnungen von TH und t_v bzw. n	8	4
Kostenberechnungen	2	2
Vergleichsoperationen	5	4

Tabelle 13: Anzahl Rechen- und Vergleichsoperationen nach BUSCHER/LINDNER bzw. Algorithmus 3

Zu den Werten in Tabelle 13 sind folgende Punkte anzumerken. Einfaches mathematisches Auf- oder Abrunden wird nicht berücksichtigt.⁴⁴⁸ Die Schleife zwischen Schritt 5 und 6 im Lösungsverfahren von BUSCHER/LINDNER wird im vorliegenden Zahlenbeispiel lediglich einmal durchlaufen. Die Ermittlung der ganzzahligen Transporthäufigkeit erfolgt bei Algorithmus 3 auf Basis eines Kostenvergleichs, bei dem die Nebenbedingung für t_v bereits implizit berücksichtigt ist und somit sichergestellt wird, dass der jeweilige – zu den beiden alternativen, ganzzahligen Transporthäufigkeiten – optimale Wert für die Zykluszeit in die Berechnung eingeht. BUSCHER/LINDNER berechnen hingegen zunächst einen reellen Wert für TH, der auf der (restringierten) Auflagehäufigkeit basiert und runden diesen letztendlich auf die nächstgelegene, ganzzahlige Transporthäufigkeit.

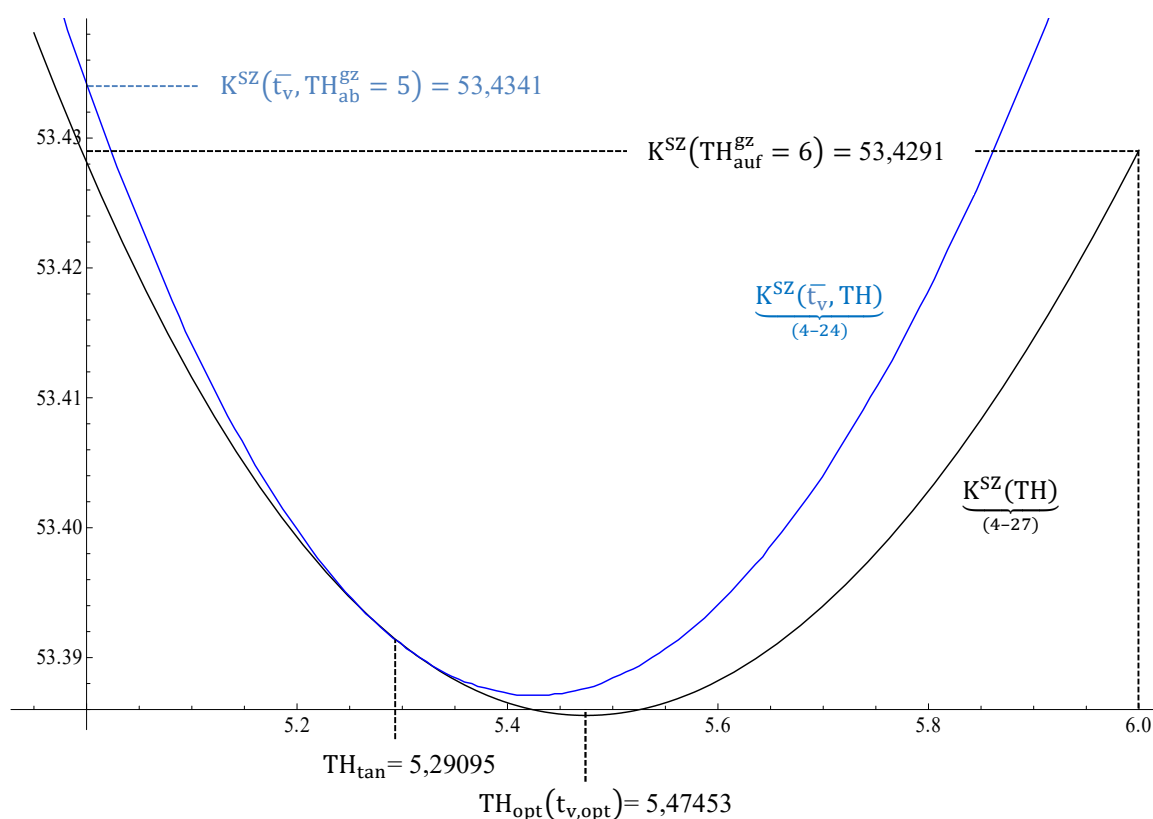


Abbildung 15: Kostenfunktionsverläufe zum Zahlenbeispiel von BUSCHER/LINDNER

Im konkreten Zahlenbeispiel wird dadurch allerdings in Schritt 3 des Verfahrens von BUSCHER/LINDNER eine ganzzahlige Transporthäufigkeit von 5 ermittelt, obwohl bei entsprechender Anpassung der Auflagehäufigkeit für $TH = 6$ ein geringerer Kostenwert

⁴⁴⁸ Die Anzahl dieser Vorgänge wäre allerdings bei BUSCHER/LINDNER höher, da jede Berechnung einer ganzzahligen Transporthäufigkeit damit verbunden ist.

resultieren würde.⁴⁴⁹ Im Allgemeinen ist damit die von BUSCHER/LINDNER gewählte Parameterkonstellation nur bedingt zur Veranschaulichung der Gesamtproblematik geeignet, da die Lösungsfindung durch eine einfache Anpassung der Vorgehensweise verkürzt werden könnte. Dies ist insbesondere auch dadurch bedingt, dass der Tangentialpunkt beider Kostenfunktionen links des absoluten Kostenminimums liegt. Im nachfolgenden Zahlenbeispiel zu dynamischen Teillosen im CCM wird der konträre Fall betrachtet.

5.1.2 Zahlenbeispiel zur Anwendung und Performance von Algorithmus 4

Die von LINDNER exemplarisch betrachtete Planungssituation umfasst zwei Produkte mit folgenden Parameterwerten und einer kumulierten Nettoauslastung von 70%:⁴⁵⁰

Produkt i	$x_{p,i}$	$x_{v,i}$	$c_{L,i}$	$k_{R,i}$	$k_{T,i}$	$t_{R,i}$
1	240	120	0,4	400	30	0,6
2	300	60	0,25	350	12	1,519

Tabelle 14: Parameterwerte des Zahlenbeispiels von LINDNER

Der explizite Lösungsweg nach Algorithmus 4 gestaltet sich im vorliegenden Fall wie folgt. Zur graphischen Veranschaulichung ist der relevante Verlauf der Kostenfunktionen in Abbildung 16 dargestellt.

Schritt 1: Algorithmus 1 auf Basis von (4-39) führt zu $TH_{t_{v,opt}}^{opt} = 4$.

$$t_{v,opt} \left(TH_{t_{v,opt}}^{opt} = 4 \right) = 6,84038 \quad (\text{nach (4-38)});$$

$$\bar{t}_v = \frac{\sum_{i=1}^I t_{R,i}}{1 - \sum_{i=1}^I \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}} = 7,06333 \quad \rightarrow t_{v,opt} \left(TH_{t_{v,opt}}^{opt} = 4 \right) < \bar{t}_v;$$

$$\rightarrow K_{ST}^{GY} \left(t_{v,opt} = 6,84038, TH_{t_{v,opt}}^{opt} = 4 \right) = -2,164 \quad (\text{nach (4-40)});$$

$$t_{v,opt} \left(TH_{t_{v,opt}}^{opt} + 1 = 5 \right) = 7,15007 \quad (\text{nach (4-38)}).$$

⁴⁴⁹ Vgl. BUSCHER, U.; LINDNER, G., 2000a, S. 34. Der ermittelte Kostenwert für die durch die Nebenbedingung begrenzte Auflagehäufigkeit $n=23,3427$ (entspricht $\bar{t}_v=8,568$) und $TH=5$ beläuft sich auf 10686,8119 (entspricht 53,4341 Kosten je Zeiteinheit). Für $TH = 6$ und ergibt sich eine optimale Auflagehäufigkeit von $n=22,5820$ (entspricht $\bar{t}_v=8,8566$) und Kosten in Höhe von 10685,8113 (entspricht 53,4291 Kosten je Zeiteinheit).

⁴⁵⁰ Vgl. LINDNER, G., 2001, S. 24.

Schritt 2: $K_{ST}^{GY} \leq 0$ und $t_{v,opt} (TH_{t_{v,opt}}^{opt} + 1 = 5) \geq \bar{t}_v$;

$$K^{GY} (TH_{t_{v,opt}}^{opt} + 1 = 5) = 268,529 \quad (\text{nach (4-39)});$$

$$K^{GY} (\bar{t}_v, TH_{t_{v,opt}}^{opt} = 4) = 268,544 \quad (\text{nach (4-37)});$$

$$\rightarrow K^{GY} (TH_{t_{v,opt}}^{opt} + 1 = 5) \leq K^{GY} (\bar{t}_v, TH_{t_{v,opt}}^{opt} = 4)$$

$\rightarrow TH = TH_{t_{v,opt}}^{opt} + 1 = 5$; Gehe zu Schritt 5.

Schritt 5: $t_v = \max \left\{ \underbrace{t_{v,opt}(TH)}_{(4-38)} = 7,15007; \bar{t}_v \right\} = 7,15007$;

$$K^{GY}(t_v = 7,15007, TH = 5) = K^{GY}(TH_{t_{v,opt}}^{opt} + 1 = 5) = 268,529.$$

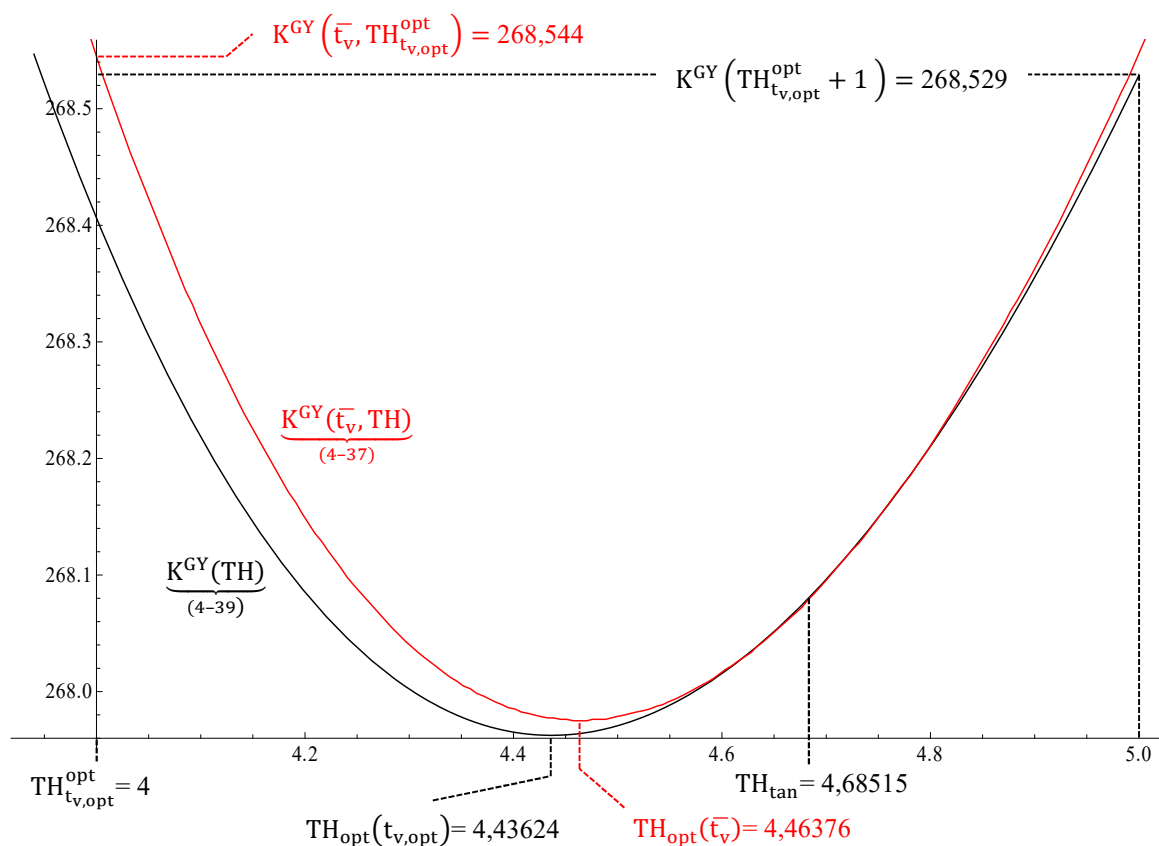


Abbildung 16: Kostenfunktionsverläufe zum Zahlenbeispiel von LINDNER

In Relation zu der von LINDNER konkretisierten Vorgehensweise⁴⁵¹ ergeben sich nach Algorithmus 4 somit die in Tabelle 15 quantitativ erfassten Rechen- und Vergleichsoperationen. Dabei findet der in Schritt 1 erforderliche Aufwand zur Bestimmung von $TH_{t_v, opt}^{opt}$ auf Basis von Algorithmus 1 keine Berücksichtigung, da beide Lösungsverfahren hierin übereinstimmen.

	LINDNER	Algorithmus 4
Berechnungen von t_v, K_{ST}^{GY} bzw. der Vergleichsreichweite⁴⁵²	4	3
Kostenberechnungen	2	2
Vergleichsoperationen	6	5

Tabelle 15: Anzahl Rechen- und Vergleichsoperationen nach LINDNER bzw. Algorithmus 4

Für das vorliegende Zahlenbeispiel halten sich die Einsparungen bei den Rechen- und Vergleichsoperationen von Algorithmus 4 gegenüber dem von LINDNER beschriebenen Lösungsverfahren in Grenzen. Zu Letzterem ist allerdings anzumerken, dass hier keine der beiden Schleifen⁴⁵³ durchlaufen wird und sich der Lösungsweg somit als linear darstellt. Das Zahlenbeispiel stellt jedoch durch seine besondere Parameterkonstellation einen durch beide Verfahren abgedeckten Spezialfall dar, der vor allem veranschaulichen soll, warum der zur Ermittlung der Optimallösung betriebene Aufwand notwendig ist.

5.2 Kostensenkungspotential

5.2.1 Verbesserung der Lösungsqualität des BPA durch Erweiterung des Suchraums

Im Folgenden wird anhand eines konkreten Zahlenbeispiels das Kostensenkungspotential der in Algorithmus 5 eingeführten Halbierungssperren für die Multiplikatoren im BPA veranschaulicht. Dabei soll die Kostenwirkung der simultanen Transportlosgrößenplanung außen vor bleiben, so dass eine Planungssituation bei „offener Fertigung“ betrachtet wird. Die zugrunde liegenden Parameterwerte basieren auf einem Zahlen-

⁴⁵¹ Vgl. LINDNER, G., 2001, S. 25 ff.

⁴⁵² Vgl. LINDNER, G., 2001, S. 17 Gleichung (18).

⁴⁵³ Vgl. LINDNER, G., 2001, S. 21 ff.: Schleifen zwischen Schritt 9 und 8 sowie Schritt 13 und 12.

beispiel von CARSTENSEN und sind in Tabelle 16 festgehalten.⁴⁵⁴ Demnach kann – als Summe der Stufenleistungsrelationen aller drei Produkte – eine Nettoauslastung von 73,33% errechnet werden.

Produkt i	$x_{p,i}$	$x_{v,i}$	$c_{L,i}$	$k_{R,i}$	$t_{R,i}$
1	15	4	3	3960	2
2	10	3	1	2625	5
3	6	1	1	9375	5

Tabelle 16: Parameterwerte des Zahlenbeispiels von CARSTENSEN

Der konkrete Lösungsweg von Algorithmus 5 stellt sich im vorliegenden Fall wie folgt dar. In den Schritten 1 und 2 ergeben sich zunächst die isoliert optimalen Verbrauchszeiten $t_{v,i}^*$ sowie der daraus abgeleitete Startwert für die BP-Länge:

Produkt i	1	2	3
$t_{v,i}^* = \max \left\{ \sqrt{\frac{k_{R,i}}{h_i^0}} ; \frac{t_{R,i}}{1 - \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}} \right\}$	30	50	150
$BP = \min\{t_{v,i}\}$	30		

Der anschließende, iterative Prozess zur Ermittlung der POT-Multiplikatoren gemäß den Schritten 3.1 bis 5 beruht auf folgenden Berechnungen:

1. Iteration

Produkt i	1		2		3	
$\frac{t_{v,i}^*}{BP}$	1		1,6666		5	
m_i^- und m_i^+	1	2	1	2	4	8
$K_i^-(BP, m_i^-)$ und $K_i^+(BP, m_i^+)$	264	330	119	106,75	128,125	139,063
$BP(m_i)$	30,5385					

⁴⁵⁴ Vgl. CARSTENSEN, P., 1999, S. 432 Tabelle 1.

2. Iteration

Produkt i	1		2		3	
$\frac{t_{v,i}^*}{BP}$	0,9824		1,6373		4,9118	
m_i^- und m_i^+	1	2	1	2	4	8
$K_i^-(BP, m_i^-)$ und $K_i^+(BP, m_i^+)$	264,042	333,575	118,022	107,109	127,645	140,169
$BP(m_i)$	30,5385					
$K(BP, m_i)$	498,796					

Da die POT-Multiplikatoren in der zweiten Iteration konstant bleiben, folgt Schritt 6:

Produkt i	1	2	3
m_i	1	2	4
BP und Gesamtkosten für $m_1=2, m_2=2, m_3=4$	$BP(m_i) = 21,1780$ $K(BP, m_i) = 532,274 > 498,796$		
BP und Gesamtkosten für $m_1=1, m_2=4, m_3=4$	$BP(m_i) = 26,0369$ $K(BP, m_i) = 534,625 > 498,796$		
BP und Gesamtkosten für $m_1=1, m_2=2, m_3=8$	$BP(m_i) = 25,6000$ $K(BP, m_i) = 503,467 > 498,796$		
m_i	1	2	4
$BP(m_i)$	30,5385		

Nachdem eine Anpassung der Multiplikatoren keinerlei Kostensenkungspotential aufweist, wird in Schritt 7 als Nächstes der Versuch unternommen für $m_i = (1|2|4)$ einen zulässigen Maschinenbelegungsplan zu generieren. Hierfür sind die Produkte zunächst entsprechend ihrer Multiplikatoren und Belegungszeiten zu sortieren.

Produkt i	1	2	3
m_i	1	2	4
$t_B(BP, m_i)$	10,1436	23,3231	25,3590

Dabei wird offensichtlich, dass die aktuelle BP-Länge von 30,3585 [ZE] nicht ausreichend ist, um eine Losauflage von Produkt 1 zusammen mit Produkt 2 bzw. Produkt 3 zu ermöglichen (vgl. Abbildung 17).

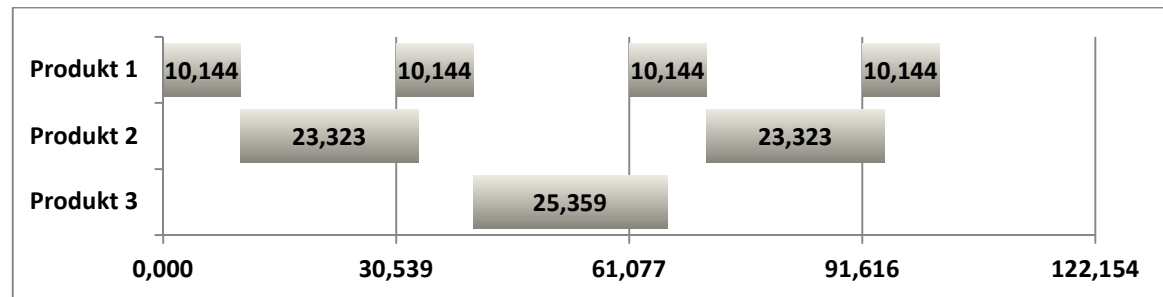


Abbildung 17: Unzulässiger Maschinenbelegungsplan für $m_i=(1|2|4)$ bei optimaler BP-Länge

Da (4–47) jedoch eingehalten wird, kann die erforderliche Mindestlänge der BP in Schritt 8 wie folgt bestimmt werden:

$$(4-47) \quad \max_{BP} \left\{ \sum_k m_k \cdot \frac{x_{v,k}}{x_{p,k}} \right\} = m_1 \cdot \frac{x_{v,1}}{x_{p,1}} + m_3 \cdot \frac{x_{v,3}}{x_{p,3}} = 1 \cdot \frac{4}{15} + 4 \cdot \frac{1}{6} = \frac{14}{15} < 1$$

$$(2-15) \quad BP \geq \max_{BP} \left\{ \frac{\sum_k t_{R,k}}{1 - \sum_k m_k \cdot \frac{x_{v,k}}{x_{p,k}}} \right\} = \frac{t_{R,1} + t_{R,3}}{1 - \left(m_1 \cdot \frac{x_{1,k}}{x_{1,k}} + m_3 \cdot \frac{x_{3,k}}{x_{3,k}} \right)} = \frac{7}{15} = 105$$

Dieser Wert stellt eine erhebliche Abweichung von der optimalen BP = 30,5385 [ZE] dar und führt zu Gesamtkosten in Höhe von $K_{ref} = 930,036$ [GE/ZE] sowie dem in Abbildung 18 dargestellten Maschinenbelegungsplan.

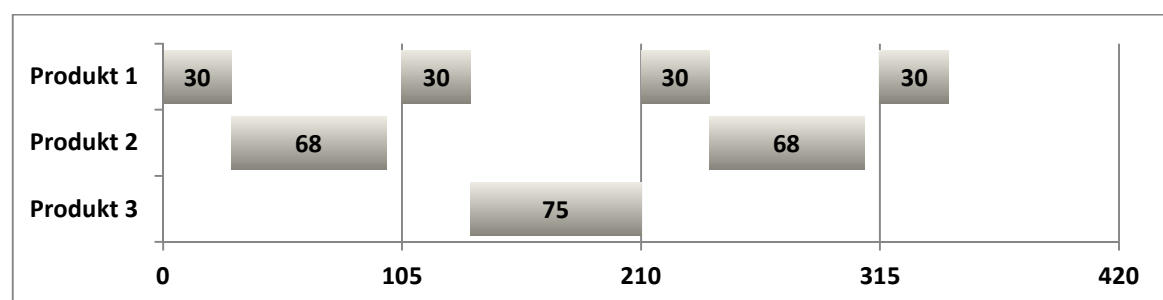


Abbildung 18: Überschneidungsfreier Maschinenbelegungsplan für $m_i=(1|2|4)$ bei angepasster BP-Länge

Somit ist in Schritt 9.1 als Nächstes zu prüfen, ob prinzipiell die Möglichkeit besteht durch gezielte Multiplikatorhalbierung eine günstigere Lösung zu erzielen.

$m_{i,\text{ref}} = (1 2 4)$	$m_i = (1 1 4)$	$m_i = (1 2 2)$
$BP_{\text{ref}} = 105$	BP = 35,4207	BP = 36,8535
$K_{\text{ref}} = 930,036$	K(BP, m_i) = 504,154	K(BP, m_i) = 540,518

Entsprechend der vorläufigen Kostenwerte wird zunächst für $m_i = (1|1|4)$ der Versuch unternommen, einen überschneidungsfreien Maschinenbelegungsplan (Schritt 7) zu generieren. Dies scheitert jedoch für die vorliegende Multiplikatorkombination daran, dass alle Produkte in einer BP aufeinander treffen und somit (4–47) verletzt ist (Schritt 8):

$$(4-47) \quad \max_{BP} \left\{ \sum_k m_k \cdot \frac{x_{v,k}}{x_{p,k}} \right\} = \sum_{i=1}^I m_i \cdot \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}} = \frac{37}{30} > 1$$

Daher wird die Ausgangslösung $m_{i,\text{ref}} = (1|2|4)$ wiederhergestellt und m_2 vorläufig für weitere Halbierungen gesperrt. Infolgedessen bleibt als weiteres Multiplikatorentupel vorerst lediglich noch $m_i = (1|2|2)$ zu prüfen. Nach Ausdehnung der BP⁴⁵⁵ kann hierfür der in Abbildung 19 dargestellte Maschinenbelegungsplan mit Kosten in Höhe von 574,714 [GE/ZE] generiert werden. Demnach ist die bisherige Referenzlösung zu ersetzen und alle Multiplikatorsperren sind aufzuheben.



Abbildung 19: Überschneidungsfreier Maschinenbelegungsplan für $m_i=(1|2|2)$ bei angepasster BP-Länge

An dieser Stelle sei explizit darauf hingewiesen, dass diese Lösungsalternative – selbst bei großzügiger Auslegung und Interpretation – von HAESSLERS originärem Algorithmus nicht berücksichtigt wird.⁴⁵⁶ Letzterer könnte allenfalls so interpretiert werden, dass nach

⁴⁵⁵ Aus (2–15) folgt $BP \geq \max_{BP} \left\{ \frac{\sum_k t_{R,k}}{1 - \sum_k m_k \frac{x_{v,k}}{x_{p,k}}} \right\} = \frac{t_{R,1} + t_{R,2}}{1 - (m_1 \frac{x_{1,k}}{x_{1,k}} + m_2 \frac{x_{2,k}}{x_{2,k}})} = \frac{7}{\frac{2}{15}} = 52,5$.

⁴⁵⁶ CARSTENSEN macht diesbezüglich eine ähnliche Feststellung, wenngleich seine Beobachtung jedoch auf einer anderen Ausgangssituation basiert, da er das Verfahren von HAESSLER derart modifiziert, dass nicht BP und Multiplikatoren, sondern Gesamtzykluszeit und Auflagehäufigkeiten als Variablen herangezogen werden (Vgl. CARSTENSEN, P., 2002, S. 38ff.). Dies hat im vorliegenden Fall zur Folge, dass sich bereits das als erstes zu prüfende Auflagemuster unterscheidet, da CARSTENSEN die Auflagehäufig-

Feststellung der Unzulässigkeit von $m_i = (1|1|4)$ eine Halbierung von m_3 (und damit $m_i = (1|1|2)$) in Betracht gezogen wird. Diese Multiplikatorkombination ist allerdings auch Teil des weiteren Lösungswegs von Algorithmus 5.

Im Folgenden werden die Schritte 7 bis 9 erneut wiederholt durchlaufen, um zu prüfen, ob durch weitere Multiplikatorhalbierungen eine kostengünstigere, überschneidungsfreie Maschinenbelegung realisiert werden kann.

$m_{i,ref} = (1 2 2)$	$m_i = (1 1 2)$	$m_i = (1 2 1)$
$BP_{ref} = 52,5$	BP = 42,3560	BP = 46,0186
$K_{ref} = 574,714$	K(BP, m_i) = 532,274	$K(BP, m_i) = 636,591$

Für $m_i = (1|1|2)$ kann eine weitere zulässige Lösung erzielt werden (vgl. Abbildung 20), deren Kosten mit 847,937 [GE/ZE] jedoch – aufgrund der notwendigen Ausdehnung der BP auf 120 Zeiteinheiten⁴⁵⁷ – höher ausfallen, als die der aktuellen Referenz.

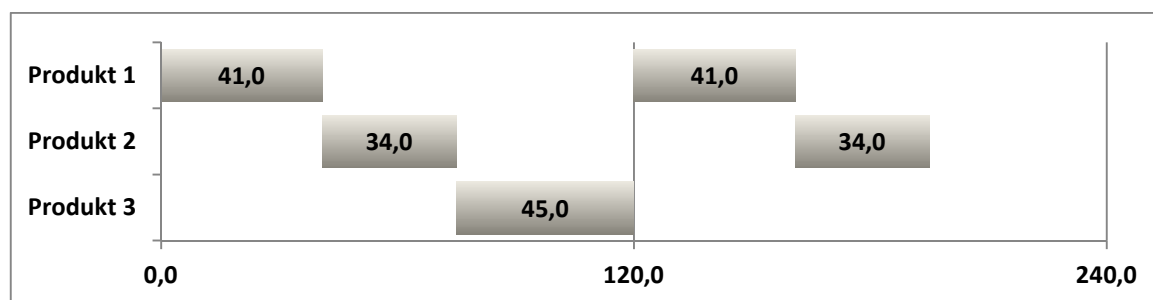


Abbildung 20: Überschneidungsfreier Maschinenbelegungsplan für $m_i=(1|1|2)$ bei angepasster BP-Länge

Daher wird Letztere wiederhergestellt und m_2 erneut für weitere Halbierungen gesperrt, so dass schließlich noch $m_i = (1|2|1)$ zu prüfen wäre. Da allerdings der niedrigstmögliche

keiten (4|4|1) (entspricht den Multiplikatoren (1|1|4)) als Startwerte ermittelt und somit die Auflagefähigkeiten (4|2|1) (entspricht den Multiplikatoren (1|2|4)) auch im weiteren Verlauf nicht mehr berücksichtigt. Demzufolge weist CARSTENSEN bei den Multiplikatorentupeln (1|2|4) und (1|2|2) darauf hin, dass diese mit dem Verfahren von HAESSLER (bzw. HAESSLER und HOGUE) nicht erfasst werden. Für $m_i=(1|2|4)$ ist diese Aussage bei Verwendung von BP und Multiplikatoren (wie im vorliegenden Zahlenbeispiel gezeigt) allerdings nicht zutreffend. Das Multiplikatorentupel $m_i=(1|2|2)$ wird bisher bei keiner Lösungssuche erfasst und findet erst durch die Einführung der Halbierungssperren Berücksichtigung.

⁴⁵⁷ $BP \geq \max_{BP} \left\{ \frac{\sum_k t_{R,k}}{1 - \sum_k m_k \frac{x_{v,k}}{x_{p,k}}} \right\} = \frac{\sum_{i=1}^I t_{R,i}}{1 - \sum_{i=1}^I m_i \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}} = \frac{12}{\frac{1}{10}} = 120.$

Kostenwert dieser Multiplikatorkombination bereits K_{ref} übersteigt, ist eine weitere Betrachtung dieser Alternative nicht zielführend.⁴⁵⁸

Damit ist im Vergleich zur aktuellen Referenzlösung keine Kostenverbesserung durch Halbierung eines einzelnen Multiplikators mehr möglich, so dass in Schritt 9.2 alle Multiplikatoren größer 1 gleichzeitig halbiert werden. Dies hat zur Folge, dass Algorithmus 5 in der Common Cycle Lösung ($m_i = (1|1|1)$) terminiert (vgl. Abbildung 21), die mit Gesamtkosten in Höhe von 611,987 [GE/ZE] wiederum über dem aktuellen Referenzwert von $K_{\text{ref}} = 574,714$ [GE/ZE] liegt.

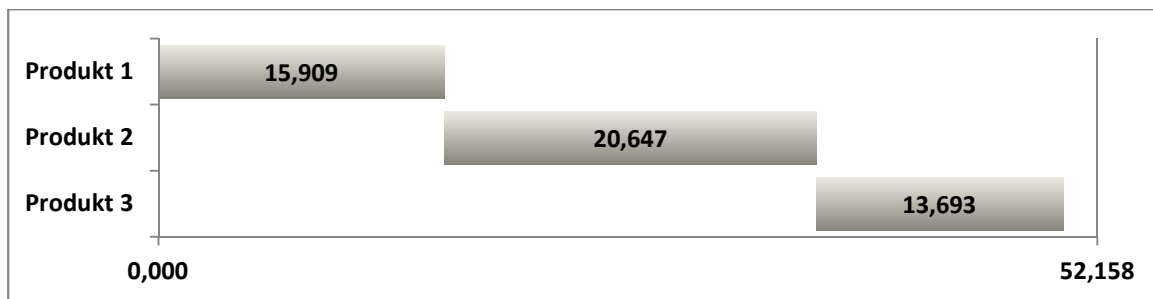


Abbildung 21: Überschneidungsfreier Maschinenbelegungsplan für $m_i=(1|1|1)$

Allerdings stellt diese letzte Multiplikatorkombination $m_i = (1|1|1)$ die günstigste, nach dem originären Verfahren von HAESSLER gefundene Alternative dar (vgl. Tabelle 17). Somit können, durch die Erweiterung des Suchraums aufgrund der Einführung von Halbierungssperren für die Multiplikatoren, im vorliegenden Zahlenbeispiel Kosteneinsparungen in Höhe von 37,264 [GE/ZE] bzw. ca. 6,1% realisiert werden.⁴⁵⁹

m_i	(1 2 4)	(1 1 4)	(1 1 2)	(1 1 1)
$K(\text{BP}, m_i)$	930,036	∞	847,937	611,987

Tabelle 17: Lösungsweg nach dem originären Verfahren von HAESSLER

Eine weitere Alternative mit Potential zur Verbesserung der Lösungsqualität durch die Ausweitung des Suchraums wird in Kapitel 5.2.4 diskutiert und bewertet.

⁴⁵⁸ Da wiederum alle Produkte in einer BP aufzulegen wären, ist zudem (4–47) verletzt, so dass für dieses Tupel kein zulässiger Maschinenbelegungsplan generiert werden könnte: $\max_{\text{BP}} \left\{ \sum_k m_k \cdot \frac{x_{v,k}}{x_{p,k}} \right\} = \frac{31}{30} > 1$.

⁴⁵⁹ $\frac{611,987 - 574,714}{611,987} = \frac{37,264}{611,987} = 0,06089$.

5.2.2 Referenzmodell „geschlossene Fertigung“

Um die Auswirkungen und das Potential der Integration des Lossplittings in die Lösungsansätze zum ELSP adäquat beurteilen zu können, werden die beiden Extremfälle der Produktweitergabe aus Kapitel 3.1 herangezogen.⁴⁶⁰ Während die „offene Fertigung“ das grundlegende Lagerhaltungsmodell der in Kapitel 2.3 beschriebenen Lösungsansätze aus der Literatur darstellt, ist die „geschlossene Fertigung“ im Kontext des ELSP bisher nicht explizit in die Betrachtungen einbezogen worden. Daher sollen im Folgenden die erforderlichen Anpassungen der Bestimmungsgleichungen aus den prinzipiellen Zusammenhängen zwischen den Lagerhaltungsmodellen abgeleitet werden.

Wird als Ausgangspunkt die „offene Fertigung“ herangezogen, so unterscheidet sich die Kostenfunktion der „geschlossenen Fertigung“ – rein mathematisch betrachtet – augenscheinlich zunächst lediglich im entsprechenden Lagerhaltungskostenterm h_i^o bzw. h_i^g :⁴⁶¹

$$(2-1) \quad K(t_{v,i}) = \sum_{i=1}^I h_i \cdot t_{v,i} + \sum_{i=1}^I \frac{k_{R,i}}{t_{v,i}}$$

$$\text{mit} \quad h_i^o = \frac{1}{2} \cdot c_{L,i} \cdot x_{v,i} \cdot \left(1 - \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}\right) \quad \text{bzw.} \quad h_i^g = \frac{1}{2} \cdot c_{L,i} \cdot x_{v,i} \cdot \left(1 + \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}\right)$$

Allerdings ist dabei zu beachten, dass der Rüstkostensatz $k_{R,i}$ alle in einem Verbrauchszeitraum $t_{v,i}$ anfallenden, losfixen Kostenbestandteile beinhaltet, die eine Abhängigkeit zur Planungsgröße aufweisen und damit entscheidungsrelevant sind. Da bei „geschlossener Fertigung“ genau ein Transportvorgang zur Weitergabe der bei einer Losauflage produzierten Menge an die verbrauchende Stufe (bzw. ein Zwischenlager) notwendig ist, zählen hierzu auch die dafür zu berücksichtigenden Kosten. Demnach beinhaltet $k_{R,i}$ bereits einen für jedes Fertigungslos gegebenenfalls anfallenden Transportkostensatz $k_{T,i}$. Um Unklarheiten hinsichtlich der Notation und der Bestandteile beider Kostensätze zu vermeiden, wird die „geschlossene Fertigung“ im Folgenden als Sonderfall einer einheit-

⁴⁶⁰ Vgl. hier insbesondere die dort genannten Voraussetzungen für ein Transportsystem bei „offener Fertigung“ und die damit einhergehenden Einschränkungen hinsichtlich der Vergleichbarkeit mit der „geschlossenen Fertigung“ bzw. einem Lagerhaltungsmodell mit Lossplitting.

⁴⁶¹ Vgl. die Erläuterungen zu den Kostenfunktionen (3-1) und (3-3) in Kapitel 3.1.

lichen Transporthäufigkeit von $TH = 1$ interpretiert,⁴⁶² so dass $k_{R,i}$ und $k_{T,i}$ weiterhin separat aufgeführt werden. Dieser Zusammenhang soll exemplarisch für den Fall produktindividueller Planung mit gleich großen Teillosen dargestellt werden. Bei Berücksichtigung von $TH = 1$ folgt aus (4–8):

$$\begin{aligned}
 K(t_{v,i}) &= \sum_{i=1}^I \left[\underbrace{\frac{1}{2} \cdot c_{L,i} \cdot x_{v,i} \cdot \left(1 - \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}\right)}_{h_i^o} + \frac{c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2}{x_{p,i}} \right] \cdot t_{v,i} + \sum_{i=1}^I \frac{k_{R,i} + k_{T,i}}{t_{v,i}} \\
 &= \sum_{i=1}^I \frac{1}{2} \cdot c_{L,i} \cdot x_{v,i} \cdot \left(\left(1 - \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}\right) + \frac{c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2}{\frac{1}{2} \cdot c_{L,i} \cdot x_{v,i} \cdot x_{p,i}} \right) \cdot t_{v,i} + \sum_{i=1}^I \frac{k_{R,i} + k_{T,i}}{t_{v,i}} \\
 &= \sum_{i=1}^I \frac{1}{2} \cdot c_{L,i} \cdot x_{v,i} \cdot \left(1 - \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}} + 2 \cdot \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}\right) \cdot t_{v,i} + \sum_{i=1}^I \frac{k_{R,i} + k_{T,i}}{t_{v,i}} \\
 &= \sum_{i=1}^I \frac{1}{2} \cdot c_{L,i} \cdot x_{v,i} \cdot \underbrace{\left(1 + \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}\right)}_{h_i^g} \cdot t_{v,i} + \sum_{i=1}^I \frac{k_{R,i} + k_{T,i}}{t_{v,i}}
 \end{aligned}$$

Analog dazu kann Gleiches auf Basis von (4–19) für den Fall dynamischer Teillose gezeigt werden, da der im Lagerhaltungskostenterm $h_i^{GY}(TH)$ auftretende Ausdruck $A(TH)$ für $TH = 1$ ebenfalls den Wert 1 annimmt.⁴⁶³ Demnach wird zur Abbildung der „geschlossenen Fertigung“ in allen Modellen (IS, CCM, BPA und TVL-Ansatz) der entsprechende Lagerhaltungskostenterm h_i^g verwendet und der Anteil losfixer Kosten durch die Summe $k_{R,i} + k_{T,i}$ bestimmt.

⁴⁶² Vgl. BOGASCHESKY, R.; BUSCHER, U., 1999, S. 339.

⁴⁶³ Vgl. Formel (3–10) in Kapitel 3.3: $A(TH) = \frac{\left(\frac{x_p}{x_v}\right)^{TH} - 1}{\frac{x_p}{x_v} - 1}$

5.2.3 Berücksichtigung von Lossplitting bei Referenzdatensätzen aus der Literatur

Zur Beurteilung der Lösungsqualität der in Kapitel 4 entwickelten Algorithmen sollen zunächst einige Referenzdatensätze aus der Literatur herangezogen werden. Ein Zahlenbeispiel auf das sehr häufig Bezug genommen wird, geht zurück auf BOMBERGER und beschreibt ein ELSP bei dem die Produktion von zehn verschiedenen Stanzteilen auf einer Metallpresse geplant werden soll.⁴⁶⁴ BOMBERGER betrachtet die Situation bei drei unterschiedlichen Nettoauslastungsgraden der Maschine, die sich durch Multiplikation der Verbrauchsrate mit den Faktoren 1, 3 und 4 ergeben.⁴⁶⁵ ELMAGHRABY greift dieses Beispiel auf und führt fünf weitere Datensätze mit ebenfalls zehn Produkten an, die er zur Veranschaulichung seines eBPA⁴⁶⁶ heranzieht.⁴⁶⁷ CHATFIELD merkt hierzu jedoch an: „Numerical inconsistencies in the appendix of ELMAGHRABY .. lead us to recommend that the data [should] be obtained from the appendix in FUJITA ..“.⁴⁶⁸ Daher werden im Folgenden die auf FUJITA⁴⁶⁹ basierenden, angepassten Parameterwerte herangezogen.⁴⁷⁰ Zudem werden noch drei weitere Zahlenbeispiele mit abweichender Produktanzahl aufgegriffen: (1) ein Praxisbeispiel von MALLYA⁴⁷¹ mit fünf Produkten, (2) ein Datensatz von PINEDO⁴⁷² mit vier Produkten sowie (3) das bereits in Abschnitt 5.2.1 herangezogene Exempel von CARSTENSEN⁴⁷³ mit drei Produkten.

5.2.3.1 Diskussion zur Höhe des Transportkostensatzes

Zur Integration des Lossplittings müssen die Parameter der angeführten Zahlenbeispiele zunächst um einen adäquaten Transportkostensatz ergänzt werden. Wie SZENDROVITS in diesem Kontext bereits anmerkt, sind die Kosten eines (möglichst flexibel zu gestalten- den) Transportsystems unter anderem abhängig von der Taktung und Abfolge der Trans-

⁴⁶⁴ Vgl. BOMBERGER, E. E., 1966, S. 778. Der Datensatz wird bspw. auch herangezogen von ELMAGHRABY, S. E., 1978b, S. 588, HAESSLER, R. W., 1979, S. 339, MAYR, M., 1996, S. 52 oder CHATFIELD, D. C., 2007, S. 2869.

⁴⁶⁵ Vgl. BOMBERGER, E. E., 1966, S. 783 f.

⁴⁶⁶ Vgl. Kapitel 2.3.3.4.

⁴⁶⁷ Vgl. ELMAGHRABY, S. E., 1978a, S. 656 ff. Beispiel 1 von ELMAGHRABY entspricht dem Datensatz von BOMBERGER mit der höchsten Nettoauslastung.

⁴⁶⁸ CHATFIELD, D. C., 2007, S. 2874.

⁴⁶⁹ Vgl. FUJITA, S., 1978, S. 361.

⁴⁷⁰ Vgl. hierzu auch HAESSLER, R. W., 1979, S. 340.

⁴⁷¹ Vgl. MALLYA, R., 1992, S. 530.

⁴⁷² Vgl. PINEDO, M., 2009, S. 160.

⁴⁷³ Vgl. CARSTENSEN, P., 1999, S. 432 Tabelle 1.

porte sowie der Variabilität des Transportmediums hinsichtlich Kapazität und Handling. Ferner kann es sich in der Praxis als schwierig erweisen, die durch das zum Einsatz kommende Transportsystem anfallenden Gesamtkosten verursachungsgemäß und gegebenenfalls produktspezifisch einem einzelnen Transportvorgang zuzuordnen.⁴⁷⁴ Demzufolge werden (insbesondere innerbetriebliche) Transportkosten in der Regel als „sunk costs“ angesehen⁴⁷⁵ und können damit nicht explizit bei der Planung berücksichtigt werden. Diese allgemeine Problematik wird im vorliegenden Fall durch die Prämissen einer vernachlässigbaren Transportzeit sowie eines mengenunabhängigen Transportkostensatzes entschärft.⁴⁷⁶

Als Anhaltspunkt für einen dem jeweiligen Datensatz angemessenen Transportkostensatz sollen im Weiteren zwei Parameter näher beleuchtet werden. (1) Der Rüstkostensatz $k_{R,i}$ weist folgende Parallelen zum Transportkostensatz auf: Zum einen zählt er ebenso zu den losfixen Kostenbestandteilen⁴⁷⁷ und stellt damit zum anderen die einzige, weitere, zeitunabhängige Größe ([GE] je Rüstvorgang) dar. Daher würde sich die Dimensionierung des Transportkostensatzes als Bruchteil von $k_{R,i}$ anbieten. Allerdings ist der kostenmäßige Zusammenhang zwischen einem Rüst- und einem Transportvorgang in der Regel nicht unbedingt gegeben. (2) Der Lagerhaltungskostensatz $c_{L,i}$ basiert hingegen im Wesentlichen auf den Kosten für die Kapitalbindung sowie für das bestandsabhängige Handling des Materials⁴⁷⁸ und weist demzufolge einen durchaus begründeten Bezug zum Transportkostensatz auf. Indes stellt sich jedoch – insbesondere aufgrund der zeitbezogenen Dimension des Lagerhaltungskostensatzes ($\left[\frac{\text{GE}}{\text{ME} \cdot \text{ZE}}\right]$) – die Frage nach der Determinierung einer angemessenen Relation zwischen $k_{T,i}$ und $c_{L,i}$. Einen ungefähren Anhaltspunkt hierfür liefert die Tatsache, dass die Ermittlung der Lagerhaltungskostenparameter, bei den meisten der betrachteten Referenzdatensätze, auf den angegebenen Stückkosten der Produkte basiert. So setzt bspw. BOMBERGER zehn Cent pro Dollar (also 10%) der Lohn- und Materialkosten pro Einheit eines Produkts als jährlichen Lagerhaltungskostensatz

⁴⁷⁴ Vgl. SZENDROVITS, A. Z., 1978, S. 334.

⁴⁷⁵ Vgl. SZENDROVITS, A. Z., 1978, S. 334.

⁴⁷⁶ Vgl. Kapitel 3.1.

⁴⁷⁷ Vgl. Kapitel 3.2.

⁴⁷⁸ Wie bspw. physische Handhabung, Pflege, Wartung und Versicherung (vgl. BOGASCHEWSKY, R., 1996, Sp. 1143 f.).

an.⁴⁷⁹ BOURLAND und YANO setzen bei der Generierung zufälliger Datensätze diesbezüglich einen Wert von 30% an.⁴⁸⁰ MALLYA differenziert bei seinem Praxisbeispiel ferner zwischen einem Stückkostenanteil von 20% für die Kapitalbindung und 15% für die physische Lagerhaltung (also insbesondere Kosten für den Lagerraum sowie das Ein-, Aus- und gegebenenfalls Umlagern).⁴⁸¹ Gerade der letztgenannte Prozentsatz eignet sich somit – aufgrund seiner Separierung von den anzurechnenden Zinskosten – als Orientierungshilfe für die Höhe eines angemessenen Transportkostensatzes. Einen ähnlichen Wert nennen auch RODRIGUE/NOTTEBOOM, die den Transportkostenanteil eines Produkts auf ca. 10% bzw. 20% seines Gesamtwerts beziffern.⁴⁸²

Da im vorliegenden Fall angesichts der zur Verfügung stehenden Daten keine weiteren Anhaltspunkte zur Bestimmung adäquater Transportkostensätze vorliegen oder ermittelt werden können, erscheint somit zur näherungsweisen Orientierung ein Wert zwischen 10% und 30% der Stückkosten des jeweiligen Produkts als sinnvolle und angemessene Alternative. Da die hieraus resultierenden Schätzwerte für $k_{T,i}$ teilweise jedoch zu Transporthäufigkeiten führen, die denen der Referenzmodelle der „geschlossenen“ bzw. „offenen Fertigung“ gleichen bzw. sehr nahe kommen, wird der Transportkostensatz in diesen Fällen entsprechend niedriger bzw. höher angesetzt. Hierbei wird für die IS bei gleich großen Teillosten ein Wert von $TH_{i,opt}$ angestrebt, der im Allgemeinen zwischen zwei und maximal 30 Transportvorgängen je Fertigungslos liegen soll. Für Referenzdatensätze, bei denen die Stückkosten eines Produkts nicht angegeben sind oder berechnet werden können, wird ebenso verfahren. Die dementsprechend ermittelten Transportkostensätze sind, zusammen mit den der jeweiligen Quelle entnommenen und normierten Parameterwerten, in Anlage D aufgeführt.

⁴⁷⁹ Vgl. BOMBERGER, E. E., 1966, S. 784. Dabei ist zu beachten, dass die Normierung auf eine Zeiteinheit (hier ein Tag) unter der Prämisse von 240 Arbeitstagen je Jahr erfolgt.

⁴⁸⁰ Vgl. BOURLAND, K. E.; YANO, C. A., 1997, S. 105.

⁴⁸¹ Vgl. MALLYA, R., 1992, S. 532.

⁴⁸² In der 1. Auflage (vgl. RODRIGUE, J.-P.; COMTOIS, C.; SLACK, B., 2006, S. 43) wird ein Wert von 20%, in der aktuellen, 3. Auflage (vgl. RODRIGUE, J.-P.; COMTOIS, C.; SLACK, B., 2013, S. 236) ein Wert von 10% angegeben (vgl. hierzu auch DARWISH, M. A., 2008, S. 3902). Zudem ist anzumerken, dass hierbei nicht explizit auf innerbetriebliche Transporte Bezug genommen wird.

5.2.3.2 Auswertung der Ergebnisse

Für die angeführten Referenzdatensätze wurden jeweils die IS und die CC-Lösung (als untere bzw. obere Kostenschranke) sowie die Lösungen nach dem BPA und dem TVL-Ansatz – entsprechend der in Kapitel 4 dargestellten bzw. entwickelten Verfahren – ermittelt.⁴⁸³ Die Resultate dieser Berechnungen sollen im Folgenden, mit Bezug auf die unterschiedlichen Lossplittingvarianten, gezielt analysiert und beurteilt werden. Dabei stehen insbesondere die Kostenwirkung der Teillosbildung im Vergleich zur „geschlossenen Fertigung“ (Forschungsziel 3)⁴⁸⁴ sowie der Einfluss der Lossplittingmodelle auf die optimalen Auflagehäufigkeiten bzw. Multiplikatoren (Forschungsfrage 4) im Fokus der Betrachtungen. Die Diskussion erfolgt dabei stets vor dem Hintergrund der durch die spezifischen Parameterwerte determinierten Eigenschaften eines Datensatzes wie bspw. der Netto- und Bruttoauslastung (vgl. im Folgenden jeweils Tabelle 18).

Auslastung in %	B1	B2	B3	F2	F3	F4	F5	F6
Netto	22,06	66,18	88,24	66,52	71,04	58,45	41,25	59,60
Brutto	26,16	73,53	96,87	80,28	89,86	68,13	50,37	70,60

Auslastung in %	MALLYA	M (Mod. 1)	M (Mod. 2)	M (Mod. 3)	PINEDO	CARSTENSEN
Netto	88,98	88,98	88,98	88,98	52,00	73,33
Brutto	170,78	97,16	96,42	95,80	165,97	99,37

Tabelle 18: Netto- und Bruttoauslastungen der Referenzdatensätze⁴⁸⁵

Die drei Datensätze von BOMBERGER (B1 bis B3) unterscheiden sich lediglich durch eine um den Faktor 3 bzw. 4 produktübergreifend erhöhte Nachfragerate.⁴⁸⁶ Dabei weist B1 eine – sowohl im Allgemeinen, als auch im Vergleich aller Referenzdatensätze – sehr geringe Netto- bzw. Bruttoauslastung auf, was einen hohen Freiheitsgrad bei der Maschinenbelegungsplanung mit sich bringt. Demzufolge erzielt der BPA für B1 Lösungen, die (mit einer Abweichung von lediglich 1,1% bis 1,4%) kostenmäßig sehr nahe an der IS liegen und durch den TVL-Ansatz faktisch nicht verbessert werden können.⁴⁸⁷ Somit fällt

⁴⁸³ Detaillierte Ergebnisse können im Einzelnen Tabelle 34 bis Tabelle 47 in Anlage E entnommen werden.

⁴⁸⁴ Vgl. Tabelle 19.

⁴⁸⁵ Die angegebene Bruttoauslastung bezieht sich jeweils auf die IS bei „geschlossener Fertigung“.

⁴⁸⁶ Vgl. Tabelle 25.

⁴⁸⁷ Vgl. DOBSON, G., 1987, S. 769.

auch der maximale Kostenvorteil des im Vergleich zur „geschlossenen Fertigung“ günstigsten Teillosmodells mit 3,36% (vgl. hier und im Folgenden jeweils Tabelle 19) relativ gering aus. Dies liegt auch darin begründet, dass die initialen Multiplikator-kombinationen des BPA ohne eine Anpassung der BP-Länge realisierbar (damit also kostenoptimal) und für alle Lossplittingvarianten identisch sind. Gleiches gilt ebenso für die Datensätze B2 und B3, mit Ausnahme der „geschlossenen Fertigung“, da sich dort die optimalen Multiplikatoren von denen der anderen Transportalternativen unterscheiden. Bei B2 ist die Kostendifferenz von 10,66% gegenüber dem Ansatz mit dynamischen Teillosen und sortenindividuellen Transporthäufigkeiten ursächlich rein auf die Auswirkungen des Lagerhaltungsmodells an sich zurückzuführen, da wiederum mittels der initialen Multiplikatorkombination und ohne Abweichung von der korrespondierenden, optimalen BP-Länge ein zulässiger Maschinenbelegungsplan generiert werden kann. Für B3 – mit einer relativ hohen Netto- und Bruttoauslastung – ist dies nicht möglich, so dass sich die initialen von den letztendlich optimalen m_i -Werten unterscheiden und die entsprechende Kostendifferenz mit 17,47% nochmals höher ausfällt. Die in diesem Fall bindende Wirkung der Restriktion für die BP-Länge wird auch daran ersichtlich, dass der TVL-Ansatz gegenüber dem BPA bei „geschlossener Fertigung“ eine – wenn auch geringfügige – Kosteneinsparung um 2,26%⁴⁸⁸ ermöglicht. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass beim TVL-Ansatz in diesem Fall Multiplikatoren realisiert werden können, die näher an denen der IS liegen.

Kostendifferenz	B1	B2	B3	F2	F3	F4	F5	F6
in %	3,36	10,66	17,47	6,52	5,98	7,45	8,50	4,57

Kostendifferenz	MALLYA	M (Mod. 1)	M (Mod. 2)	M (Mod. 3)	PINEDO	CARSTENSEN
in %	31,24	8,38	8,38	7,23	15,69	27,32

Tabelle 19: Prozentuale Kostendifferenz des BPA bei „geschlossener Fertigung“ und bei dynamischen Teillosen mit sortenindividuellen Transporthäufigkeiten

Für die Referenzdatensätze von FUJITA (F2 bis F5) stellt sich die Situation ähnlich dar. Auch hier kann beim BPA jeweils die initiale Multiplikatorkombination ohne Abweichung von der optimalen BP-Länge für alle Lossplittingvarianten realisiert werden. Aus-

⁴⁸⁸ $\frac{39,2625 - 3,3749}{38,5770} = 0,0226$ (vgl. Tabelle 36).

nahmen hiervon bilden lediglich die Fälle mit einheitlicher Transporthäufigkeit (inkl. der „geschlossenen Fertigung“) bei F2. Dies führt – in Zusammenhang mit den bei diesem Datensatz relativ stark divergierenden, individuellen Transporthäufigkeiten – letztendlich sogar dazu, dass das Modell mit gleich großen Teillosen und sortenspezifischen Transporthäufigkeiten einen geringen Kostenvorteil von 0,91%⁴⁸⁹ gegenüber der Alternative mit dynamischen Teillosen bei einheitlicher Transporthäufigkeit aufweist. Allerdings kann Letztere (ebenso wie der Fall der „geschlossene Fertigung“) durch den TVL-Ansatz um 1,88% (bzw. 1,99%)⁴⁹⁰ verbessert werden. Dies liegt wiederum auch darin begründet, dass die zugehörigen Multiplikatoren näher an denen der IS liegen. Des Weiteren ist bezüglich F2 festzuhalten, dass sich sowohl bei gleich großen, als auch bei dynamischen Teillosen die jeweils günstigsten Multiplikator kombinationen bei einheitlicher und sortenspezifischer Transporthäufigkeit(en) unterscheiden. Innerhalb dieser fünf Parameterkonstellationen liegt das durch Teillosbildung maximal erzielbare Kostensenkungspotential von 8,50% bei F5 und somit interessanterweise bei dem Zahlenbeispiel mit der geringsten Brutto- und Nettoauslastung.

Die Besonderheit des Datensatzes von MALLYA liegt in der extrem hohen Bruttoauslastung von über 170%. Dies hat zur Folge, dass sich sowohl nach dem BPA als auch beim TVL-Ansatz für alle Lossplittingvarianten die CC-Lösung als günstigstes, zulässiges Ergebnis einstellt. Dabei zeigt sich, dass bei einem solch stark restringierten Szenario der potentielle Flexibilitätsgewinn durch die Teillosbildung zu erheblichen Kosteneinsparungen (hier maximal 31,24%) gegenüber der „geschlossenen Fertigung“ führen kann. Senkt man die Bruttoauslastung durch eine Reduzierung der Rüstzeiten (Modifikationen M (Mod. 1) bis M (Mod. 3)), so sinkt diese Kostendifferenz deutlich auf 8,38% bzw. 7,23% und es lassen sich zudem folgende, weitere Beobachtungen festhalten: Zunächst kann im Vergleich zum Originaldatensatz eine erhebliche Kostenreduktion aller Lösungsalternativen festgestellt werden.⁴⁹¹ Des Weiteren ist zu konstatieren, dass aus Kostensicht die Attraktivität der Teillosbildung im Allgemeinen extrem abnimmt und sich Lösungen nahe der bzw. identisch zur „geschlossenen Fertigung“ einstellen. Durch die

⁴⁸⁹ $\frac{20,3507 - 20,1646}{20,3507} = 0,0091$ (vgl. Tabelle 37).

⁴⁹⁰ $\frac{20,3507 - 19,9673}{20,3507} = 0,0188$ bzw. $\frac{21,2801 - 20,8857}{21,2801} = 0,0199$ (vgl. Tabelle 37).

⁴⁹¹ Vgl. Tabelle 42 bis Tabelle 45 in Anlage E.

Verkürzung der Rüstzeiten auf ein Zehntel ihres Ausgangswertes bei M (Mod. 1) sind zudem für das Modell mit dynamischen Teillosen nach dem BPA günstigere Multiplikator kombinationen als die der CC-Lösung realisierbar. Gleiches gilt für alle Lossplittingvarianten des TVL-Ansatzes, wobei für die Alternativen mit positionsspezifischen Transporthäufigkeiten keine signifikanten Kostenverbesserungen gegenüber der sortenindividuellen Betrachtung ermittelt werden konnten. Zudem unterscheiden sich im Modell dynamischer Teillose die jeweils optimalen Multiplikator kombinationen bei einheitlicher bzw. sortenspezifischer Transporthäufigkeit(en) sowohl nach dem BPA (für Produkt 1), als auch beim TVL-Ansatz (für die Produkte 1, 4 und 5). Diese Beobachtung hat auch bei einer weiteren Verkürzung der Rüstzeiten auf ein Elftel der Ausgangswerte bei M (Mod. 2) bzw. ein Zwölftel bei M (Mod. 3) Bestand. Die damit verbundene Differenz der Bruttoauslastung gegenüber M (Mod. 1) fällt mit 0,74% bzw. 1,36% zwar relativ gering aus, bewirkt allerdings, dass bei M (Mod. 2) der BPA lediglich noch für die „geschlossene Fertigung“ in der CC-Lösung terminiert, während bei M (Mod. 3) letztendlich auch für diesen Fall eine günstigere Multiplikator kombination als $m_i = 1$ erzielt werden kann.

Das Zahlenbeispiel von PINEDO weist zum einen bei einer relativ niedrigen Nettoauslastung von 52% eine gleichzeitig hohe Bruttoauslastung von 165,97% auf und zeichnet sich zum anderen dadurch aus, dass bei der Auflage von Produkt 4 keine relevanten Rüstkosten anfallen.⁴⁹² Letzteres hat – insbesondere im Zusammenhang mit dem relativ hohen Lagerhaltungskostensatz $c_{L,4}$ – zur Folge, dass die optimale Zykluszeit von Produkt 4 vergleichsweise kurz ausfällt und somit der Multiplikator m_4 bei allen Lösungsansätzen den Wert 1 annimmt. In Relation zu den Produkten 1 und 2 ist dies in abgeschwächter Form ebenso für Produkt 3 zutreffend, so dass dessen Multiplikator beim BPA ebenfalls stets 1 bzw. beim TVL-Ansatz 2 beträgt. Die konstanten Multiplikatorwerte innerhalb eines Lösungsansatzes über alle Lossplittingvarianten hinweg, stehen in Zusammenhang mit der hohen Bruttoauslastung. Diese führt des Weiteren dazu, dass die

⁴⁹² Ein Rüstkostensatz von $k_{R,4}=0$ kann bspw. in Form von „sunken costs“ eines nicht voll ausgelasteten Rüsttrupps oder als Grundzustand der Produktionseinrichtung interpretiert werden. Letzterer ist evtl. ohne relevanten Arbeitsaufwand eines Werkzeugwechsels herbeizuführen und zeichnet sich gegebenenfalls zusätzlich durch einen vernachlässigbaren Ausschuss nach Wiederanlauf des Herstellungsprozesses für das betreffende Produkt aus. Die im angeführten Fall zu berücksichtigende Rüstzeit kann zum Beispiel als Abkühlprozess, der keinen Arbeitsaufwand erfordert, angesehen werden.

BP bzw. die Gesamtzykluszeit eine entsprechende Mindestlänge aufweisen müssen, was durch die ebenfalls konstanten Werte dieser Zeiten zum Ausdruck kommt. Zudem kann der TVL-Ansatz unter diesen Gegebenheiten für jede Lossplittingvariante eine günstigere Lösung als die des BPA erzielen.⁴⁹³ Bei diesem Vergleich ist insbesondere das Resultat des Modells gleich großer Teillose bei einheitlicher Transporthäufigkeit zu beachten: Während beim TVL-Ansatz mit TH=1 weiterhin die Option der „geschlossene Fertigung“ gewählt wird, kann beim BPA durch das Aufteilen eines Fertigungsloses auf drei Transportlose die Kostendifferenz zum Ergebnis des TVL-Ansatzes deutlich in Grenzen gehalten werden und beträgt lediglich noch 3,10% anstelle von 12,06%, die sich bei Realisierung von TH=1 nach dem BPA ergeben würden.⁴⁹⁴

Anhand des Datensatzes von CARSTENSEN wird ersichtlich, dass sich eine zum vorhergehenden Zahlenbeispiel von PINEDO vergleichbare Situation auch bereits bei einer – durchaus anzustrebenden – Bruttoauslastung von 99,37% darstellen kann. Auch hier wird die BPA-Lösung stets durch die bindende Restriktion der Mindestlänge für die BP beschränkt. Dabei ist hervorzuheben, dass der BPA bei „geschlossener Fertigung“ in der CC-Lösung terminiert und somit die maximale Kostendifferenz zur günstigsten Lossplittingalternative mit 27,32% relativ hoch ausfällt. Insbesondere an dieser Stelle wird auch das Potential des TVL-Ansatzes offensichtlich, da sich dort – unabhängig vom Teillosmodell – die der IS nahekommenden Multiplikatoren realisieren lassen und somit bei „geschlossener Fertigung“ ein Kostenvorteil gegenüber dem BPA von 17,3% resultiert.⁴⁹⁵

5.2.4 Auswertung und Diskussion der Lösungen zufallsgenerierter Datensätze

5.2.4.1 Rahmenbedingungen

Um möglichst belastbare Aussagen hinsichtlich der Kostenwirkung der entwickelten Modelle zur Integration des Lossplitting in das ELSP ableiten zu können, werden im Folgenden die Ergebnisse von insgesamt 4000 nach dem Zufallsprinzip generierten Datensätzen

⁴⁹³ Auch hier wird dieser Vorteil unter anderem dadurch ermöglicht, dass Multiplikatoren realisiert werden können, deren Werte näher an denen der IS liegen.

⁴⁹⁴ $\frac{11.501,0 - 10.113,7}{11.501,0} = 0,1206$ bzw. $\frac{10.437,4 - 10.113,7}{10.437,4} = 0,0310$ (vgl. Tabelle 45).

⁴⁹⁵ $\frac{816,222 - 675,029}{816,222} = 0,1730$ (vgl. Tabelle 47).

ausgewertet. Im Fokus der Betrachtung stehen dabei die Lösungsverfahren, deren Implementierung nicht in irgendeiner Weise auf zusätzliche, numerische Näherungsverfahren (wie „NMinimize“ oder „NSolve“ in WOLFRAM MATHEMATICA) zurückgreift. Dadurch soll sichergestellt werden, dass die erzielte Lösungsqualität unabhängig von den eingesetzten Werkzeugen und Programmen ist und die Ergebnisse und Lösungswege weitestgehend nachvollziehbar und reproduzierbar sind. Während dementsprechend der TVL-Ansatz außen vor bleibt und im CCM die Alternative sortenindividueller Transporthäufigkeiten ausgeklammert wird, können beim BPA weiterhin alle Lossplittingvarianten (von „offener“ bis „geschlossener Fertigung“) berücksichtigt werden.

Die Bereichsgrenzen zur Generierung der Parameterwerte sind in Tabelle 20 festgehalten und orientieren sich – mit Ausnahme von $k_{T,i}$ – an BOURLAND/YANO⁴⁹⁶. Dabei ermöglichen die relativ großen Intervalle grundsätzlich auch Kombinationen von Produkten mit ausgeprägt differenzierten Einflussgrößen.⁴⁹⁷ Des Weiteren ist anzumerken, dass BOURLAND/YANO zur Ermittlung der Lagerhaltungskostensätze folgende Annahmen treffen: Die jährlichen Lagerhaltungskosten belaufen sich auf 30% der Stückkosten, welche wiederum im Intervall [0,5; 200] liegen. Bei 2000 Produktionsstunden pro Jahr ergeben sich somit die unten angeführten Grenzen für $c_{L,i}$.⁴⁹⁸ Der Transportkostensatz $k_{T,i}$ wird auf 15% bis 25% der Stückkosten festgelegt (vgl. Kapitel 5.2.3.1) und steht somit wiederum indirekt in Abhängigkeit zu $c_{L,i}$.

	Minimum	Maximum
$x_{p,i}$	500	2000
$x_{v,i}$	1	100
$c_{L,i}$	0,000075	0,03
$k_{R,i}$	100	5000
$t_{R,i}$	0,5	2
$k_{T,i}$	$0,15 \cdot \left(\frac{2000}{0,3} \cdot c_{L,i}\right)$	$0,25 \cdot \left(\frac{2000}{0,3} \cdot c_{L,i}\right)$

Tabelle 20: Intervallgrenzen für die Parameterwerte der zufallsgenerierten Datensätze

⁴⁹⁶ Vgl. BOURLAND, K. E.; YANO, C. A., 1997, S. 106.

⁴⁹⁷ Vgl. BOURLAND, K. E.; YANO, C. A., 1997, S. 105.

⁴⁹⁸ Vgl. BOURLAND, K. E.; YANO, C. A., 1997, S. 105 f.

Die Zusammenstellung der Produkte zu einem Datensatz unterliegt ebenfalls dem Zufallsprinzip sowie der Prämisse, dass eine Nettoauslastung zwischen 65% und 95% erreicht wird.⁴⁹⁹ Im Gegensatz zu BOURLAND/YANO setzt sich hier ein Datensatz allerdings explizit aus 8, 12, 16 oder 20 Produkten zusammen, so dass letztendlich vier Gruppen mit jeweils 1000 unabhängigen Produktkombinationen unterschieden werden können.

5.2.4.2 Analyse und Bewertung der Ergebnisse

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse ist in Tabelle 21 dargestellt. Die durchschnittlich ($\phi \Delta K$) bzw. maximal ($max\{\Delta K\}$) erzielbaren Kosteneinsparungen sind für jedes einbezogene Teilloosmodell⁵⁰⁰ sowohl gruppenweise ($I=8, 12, 16$ oder 20), als auch insgesamt über alle 4000 Datensätze ($\phi \Sigma$) angeführt. Dabei wird zum einen der Vergleich innerhalb des BPA (geschlossene Fertigung vs. Teilloosmodell) sowie zum anderen zwischen CCM und BPA betrachtet. Letzterer dient insbesondere dazu, das Kosteneinsparungspotential der neu entwickelten gegenüber den bestehenden Ansätzen zur Integration des Lossplitting in das ELSP zu verdeutlichen. Dieses liegt im Gesamtdurchschnitt für gleich große Teilloose bei 9,317% sowie im GOYAL-Modell bei 9,405% und stellt somit eine deutliche Verbesserung der Kostensituation dar, welche hier im Extremfall sogar bis zu 31,45% beträgt. Gruppenweise betrachtet, kann mit steigender Produktanzahl (und Nettoauslastung) ein gemäßigt positiv korrelierter Trend der mittleren Kostendifferenzen sowie ein schwach negativer Zusammenhang hinsichtlich der maximalen Kostenersparnis vermutet werden. Der Kostenunterschied zwischen beiden Teilloosmodellen innerhalb einer Gruppe fällt für die Betrachtung „CCM vs. BPA“ sehr gering aus, so dass keine signifikanten Vorteile der dynamischen gegenüber den gleich großen Transportlosen festgestellt werden können.

⁴⁹⁹ Vgl. zu den Grenzen der Nettoauslastung BOURLAND, K. E.; YANO, C. A., 1997, S. 106. Falls eine Produktkombination dieses Kriterium nicht erfüllt, wird sie verworfen und eine neue generiert.

⁵⁰⁰ GY: dynamische Transportlose nach GOYAL; SZ: gleich große Transportlose nach SZENDROVITS; TH: einheitliche Transporthäufigkeit; THi: sortenindividuelle Transporthäufigkeit; beste Lsg.: für jeden Datensatz wird ausschließlich das jeweils beste Ergebnis aus allen Teilloosmodellen berücksichtigt.

I	Φ Nettoauslastung [%]	BPA geschlossene Fertigung vs. BPA Teillosmodell						CCM vs. BPA	
		Teillosmodell	$\Phi \Delta K$ [%]	$max\{\Delta K\}$ [%]	$min\{\Delta K\}$ [%]	Anzahl $\Delta K < 0$	$\Phi \Delta K < 0$ [%]	$\Phi \Delta K$ [%]	$max\{\Delta K\}$ [%]
8	69,108	GYTHi	8,113	19,246	-2,716	2	-1,368		
		GYTH	7,964	19,177	-2,904	4	-1,509	8,701	30,014
		SZTHi	5,679	16,600	-5,258	9	-2,794		
		SZTH	5,248	16,351	-5,692	5	-2,529	8,541	29,764
		beste Lsg.	8,199	19,246	-2,716	1	-2,716		
12	72,759	GYTHi	6,486	16,294	-8,526	3	-4,566		
		GYTH	6,337	16,225	-8,564	2	-5,420	9,686	31,450
		SZTHi	4,500	14,573	-11,730	8	-3,388		
		SZTH	4,100	13,087	-4,233	12	-1,770	9,604	31,210
		beste Lsg.	6,571	16,294	-2,121	2	-2,109		
16	77,583	GYTHi	6,615	23,929	-9,732	6	-3,038		
		GYTH	6,492	23,818	-9,951	8	-2,575	9,261	25,254
		SZTHi	4,842	22,041	-11,706	19	-2,724		
		SZTH	4,558	21,909	-11,203	16	-2,699	9,198	25,244
		beste Lsg.	6,702	23,929	0	0	0		
20	83,139	GYTHi	7,166	28,182	-11,257	21	-3,171		
		GYTH	7,086	28,134	-11,273	21	-3,330	9,970	25,255
		SZTHi	5,640	26,912	-12,596	32	-4,081		
		SZTH	5,420	21,116	-12,387	30	-4,000	9,925	25,128
		beste Lsg.	7,290	28,182	-11,257	17	-3,769		
Φ Σ	75,647	GYTHi	7,095	21,913	-8,058	8	-3,036		
		GYTH	6,970	21,839	-8,173	8,75	-3,209	9,405	27,993
		SZTHi	5,165	20,032	-10,323	17	-3,247		
		SZTH	4,832	18,116	-8,379	15,75	-2,750	9,317	27,837
		beste Lsg.	7,191	21,913	-4,024	5	-2,149		

Tabelle 21: Zusammenfassung der Ergebnisse zufallsgenerierter Datensätze

Vergleicht man hingegen im Rahmen des BPA die rein „geschlossene Fertigung“ mit den jeweiligen Teillosmodellen, so ist ein Kostenvorteil der dynamischen in Relation zu den gleich großen Transportlosen von durchschnittlich ca. 2% festzustellen.⁵⁰¹ Des Weiteren kann bezüglich dieser Differenz ein mit steigender Produktanzahl schwach negativ korrelierter Trend beobachtet werden.⁵⁰² Insgesamt betrachtet besteht auch bei diesem Vergleich durch die neu entwickelten Modelle ein eindeutiges Kostensenkungspotential von durchschnittlich ca. 5% bei gleich großen und ca. 7% bei dynamischen Teillosen,

⁵⁰¹ Kostendifferenz gesamt in % GY THi vs. SZ THi: 7,017-5,107=1,930; GY TH vs. SZ TH: 6,876-4,759=2,138 (vgl. Tabelle 21);

⁵⁰² Kostendifferenz für GY THi vs. SZ THi bzw. GY TH vs. SZ TH und I=8: 2,434 bzw. 2,716; I=12: 1,986 bzw. 2,237; I=16: 1,773 bzw. 1,934; I=20: 1,526 bzw. 1,666 (vgl. Tabelle 21);

welches hier im Maximum bis zu 28,182% betragen kann. Dabei beinhalten die Durchschnittswerte auch Fälle, bei denen durch die Teillosbildung keine Kostenverbesserung gegenüber der „geschlossenen Fertigung“ erreicht werden konnte. Bei der Häufigkeit dieser Fälle (Anzahl $\Delta K < 0$) kann zum einen ein eindeutiger Anstieg in Korrelation mit der Produktanzahl (und somit auch mit der durchschnittlichen Nettoauslastung) festgestellt werden. Zum anderen ist ersichtlich, dass die entsprechenden Fallzahlen bei gleich großen Transportlosen deutlich (nahezu 100%) über denen bei dynamischen Teillosen liegen. Wird die jeweils beste Lösung eines der Teillosmodelle herangezogen, so beträgt der Anteil dieser Fälle insgesamt nur 0,5% bei einer durchschnittlichen, negativen Kostenabweichung ($\bar{\Delta K} < 0$) von 2,149%. Lediglich für $I=20$ nimmt die Fallzahl – bei Berücksichtigung der jeweils besten Lösung – mit 17 einen relativ großen Wert an. Insgesamt betrachtet halten sich die Fälle mit negativen Kostendifferenzen somit zwar nach Anzahl und Abweichung in Grenzen, allerdings sollen im Folgenden dennoch die Ursachen dieser Ergebniswerte erörtert und ein modifizierter Lösungsansatz zur Verbesserung der Situation diskutiert werden.

5.2.4.3 Diskussion eines modifizierten Lösungsansatzes mit erweitertem Suchraum

Die zuvor erläuterten Fälle, bei denen die Modelle nach dem BPA mit integriertem Lossplitting keine kostenmäßige Besserstellung gegenüber der „geschlossenen Fertigung“ erzielen, verdeutlichen insbesondere den heuristischen Charakter der Lösungsfindung. Dabei sind die negativen Kostendifferenzen ausschließlich auf Unterschiede bei den Produktauflagehäufigkeiten zurückzuführen.⁵⁰³ Daher beruht der folgende Ansatz zur Reduzierung dieser Fälle auf einer Erweiterung der Menge der in Betracht gezogenen Multiplikatorkombinationen. Dies erfolgt durch eine Modifikation von Schritt 9.2 in Algorithmus 5. Dort ist bisher die gleichzeitige Halbierung aller Multiplikatoren vorgesehen, falls einzelne Multiplikatorhalbierungen zu keiner günstigeren, realisierbaren Alternative als die der aktuellen Referenzlösung führen. Diese Vorgehensweise wird nun dahingehend geändert, dass ausschließlich der Multiplikator reduziert wird, dessen Hal-

⁵⁰³ Bei gleicher Kombination der Produktauflagehäufigkeiten erzielt jedes Teillosmodell für $TH>1$ in der Regel niedrigere Kosten bzw. für $TH=1$ eine der „geschlossenen Fertigung“ entsprechende (und somit gleichwertige) Lösung (vgl. Kapitel 3 bzw. Abschnitt 5.2.2).

bierung den „lowest lower bound“⁵⁰⁴ aufweist. Diese Halbierung wird in jedem Falle beibehalten und nicht in Abhängigkeit vom endgültigen Ergebnis wieder rückgängig gemacht. Demzufolge wird eine Zwischenlösung generiert, deren endgültiger Maschinenbelegungsplan zwar entweder unzulässig ist oder Kosten aufweist, die über denen der bisherigen Referenzlösung liegen.⁵⁰⁵ Allerdings besteht anschließend wiederum die Möglichkeit durch weitere, gezielte Multiplikatorhalbierungen (Schritt 9.1) eine letztendlich günstigere Multiplikatorkombination zu ermitteln, welche durch die ursprüngliche Vorgehensweise nicht berücksichtigt wurde.

Wird die eben erläuterte Modifikation von Schritt 9.2 in Algorithmus 5 auf dieselben, zufallsgenerierten Datensätze des vorangegangenen Abschnitts angewendet, so ergeben sich die in Tabelle 22 zusammengefassten Resultate. Der Vergleich mit Tabelle 21 zeigt, dass sich die Zahl der Fälle, bei denen das jeweilige Teillosmodell keine Kostenverbesserung gegenüber der „geschlossenen Fertigung“ erzielt hat, durch die Erweiterung des Suchraums erheblich reduziert werden konnte. Die durchschnittliche Fallzahl über alle Datensätze ist um den Faktor 3,3 gesunken.⁵⁰⁶ Wird für jedes Zahlenbeispiel jeweils nur die beste Lösung aller Teillosmodelle berücksichtigt, so treten lediglich noch vier Fälle von $\Delta K < 0$ bei $I=20$ auf, während in allen anderen Gruppen für jeden Datensatz immer mindestens eines der Teillosmodelle ein kostengünstigeres (oder zumindest gleichwertiges) Ergebnis erzielt. Das verfolgte Ziel, die in Relation zu den beiden Gruppen $I=8$ und $I=12$ relativ hohen Fallzahlen von $\Delta K < 0$ für $I=16$ und $I=20$ zu reduzieren, kann demnach durch die Erweiterung des Suchraums erreicht werden. Diesbezüglich profitieren die Losssplittingmodelle somit in höherem Maße von der Modifikation als die „geschlossene Fertigung“.

⁵⁰⁴ Der „lowest lower bound“ wird durch einen Vergleich der Kostenwerte ermittelt, die sich jeweils durch eine separate Halbierung jedes einzelnen Multiplikators und der daraus folgenden Anpassung der BP-Länge ergeben. Dabei bleibt die Zulässigkeit der jeweiligen Multiplikatorkombination hinsichtlich einer überschneidungsfreien Maschinenbelegung bzw. deren Kostenwirkung zunächst außen vor. Vgl. auch Schritt 9.1 in Algorithmus 5 bzw. Fußnote 400 auf Seite 104.

⁵⁰⁵ Die Halbierung des betreffenden Multiplikators wurde bereits zuvor geprüft und entweder nicht durchgeführt (da der damit verbundene „lower bound“ über dem Kostenwert der aktuellen Referenzlösung lag) oder wieder rückgängig gemacht (da mit dieser Multiplikatorkombination kein zulässiger Maschinenbelegungsplan generiert werden konnte, der geringere Kosten als die bisherige Referenzlösung aufgewiesen hat).

⁵⁰⁶ $\frac{8+8,75+17+15,75}{2+2,75+5,25+5} = \frac{49,5}{15} = 3,3$ (vgl. Tabelle 22).

I	ϕ Nettoauslastung [%]	BPA geschlossene Fertigung vs. BPA Teillosmodell (modifiziert)						CCM vs. BPA	
		Teillosmodell	$\phi \Delta K$ [%]	$\max\{\Delta K\}$ [%]	$\min\{\Delta K\}$ [%]	Anzahl $\Delta K < 0$	$\phi \Delta K < 0$ [%]	$\phi \Delta K$ [%]	$\max\{\Delta K\}$ [%]
8	69,108	GYTHi	8,111	19,246	0,873	0	0		
		GYTH	7,942	19,177	0,790	0	0	8,960	30,014
		SZTHi	5,675	16,600	-1,076	3	-0,558		
		SZTH	5,240	16,351	-1,950	2	-1,320	8,816	29,764
		beste Lsg.	8,137	19,246	3,408	0	0		
12	72,759	GYTHi	6,440	16,294	-0,586	1	-0,586		
		GYTH	6,263	16,225	-0,767	1	-0,767	10,111	31,450
		SZTHi	4,448	14,573	-3,501	6	-1,765		
		SZTH	4,037	13,153	-3,641	5	-1,441	10,039	31,210
		beste Lsg.	6,463	16,294	1,008	0	0		
16	77,583	GYTHi	6,412	20,025	-1,668	3	-0,881		
		GYTH	6,278	19,996	-1,952	4	-0,844	9,968	26,333
		SZTHi	4,691	18,371	-4,116	5	-1,812		
		SZTH	4,358	18,264	-4,716	6	-2,185	9,923	26,138
		beste Lsg.	6,436	20,025	0	0	0		
20	83,139	GYTHi	7,106	19,911	-5,927	4	-1,824		
		GYTH	7,022	19,890	-5,954	6	-1,537	11,358	25,255
		SZTHi	5,614	18,960	-7,236	7	-2,371		
		SZTH	5,402	18,887	-7,395	7	-2,526	11,367	25,128
		beste Lsg.	7,156	19,911	-5,927	4	-1,824		
$\phi \sum$	75,647	GYTHi	7,017	18,869	-1,827	2	-0,823		
		GYTH	6,876	18,822	-1,971	2,75	-0,787	10,099	28,263
		SZTHi	5,107	17,126	-3,982	5,25	-1,627		
		SZTH	4,759	16,664	-4,426	5	-1,868	10,036	28,060
		beste Lsg.	7,048	18,869	-0,378	1	-0,456		

Tabelle 22: Zusammenfassung der Ergebnisse zufallsgenerierter Datensätze bei erweitertem Suchraum

Wird hingegen die Kostenwirkung insgesamt betrachtet, so stellt sich auch bei der „geschlossenen Fertigung“ ein positiver Effekt ein, der letztendlich dazu führt, dass die durchschnittliche (und für I=16 und I=20 auch die maximale) Kostendifferenz für sämtliche Teillosmodelle über alle Gruppen hinweg leicht abnimmt. Die Reduzierung der mittleren, absoluten Kosten durch die Modifikation fällt somit bei den Lossplittingmodellen geringer aus als bei der „geschlossenen Fertigung“. Im Vergleich „CCM vs. BPA“ kann das Kosteneinsparungspotential erwartungsgemäß weiter gesteigert werden und beträgt nun über alle Datensätze durchschnittlich rund 10%.

Den positiven Effekten der Erweiterung des Suchraums steht allerdings eine nicht unerhebliche Erhöhung der Rechenzeiten gegenüber, da diese sich durch die Modifikation durchschnittlich verdoppeln (vgl. Tabelle 23). Somit sollte eine sorgfältige Abwägung getroffen werden, ob die potentiell zu erwartenden Kosteneinsparungen den deutlich ansteigenden Rechenaufwand rechtfertigen. Mögliche Anhaltspunkte hierfür werden im folgenden Kapitel 5.3 diskutiert.

I	Rechenzeit für jeweils 1000 Datensätze [Sekunden]		Erhöhung [%]
	ursprünglich	modifiziert	
8	1.854,33	3.404,36	83,590
12	4.771,62	10.302,43	115,911
16	10.226,22	22.209,82	117,185
20	20.903,28	41.216,22	97,176

Tabelle 23: Anstieg der Rechenzeiten durch die Modifikation von Schritt 9.2 in Algorithmus 5

Abschließend sei noch angemerkt, dass die Modifikationen von Schritt 9.2 in Algorithmus 5 auch auf die Referenzdatensätze aus Abschnitt 5.2.3 angewendet wurden. Dabei resultierte lediglich für M (Mod. 3) im Fall dynamischer Teillose bei sortenindividueller Transporthäufigkeit (GY THi) ein geringfügig besseres Ergebnis. Durch die Halbierung des Multiplikators m_1 von 2 auf 1 und den Anstieg der BP von 1,067 auf 1,301 ergibt sich eine Kostensenkung von 830,451 auf 829,978.⁵⁰⁷

⁵⁰⁷ Vgl. hierzu auch Tabelle 45 in Anlage E.

5.3 Interpretation und Ableitung von Handlungsempfehlungen

Im Folgenden sollen die gewonnenen Erkenntnisse zur Performance der neu entwickelten Modelle und Lösungsansätze zusammenfassend dargestellt und als Grundlage für die Ableitung von Handlungsempfehlungen herangezogen werden.

Optimierte Lösungsverfahren bei Lossplitting im CCM

Die für gleich große und dynamische Teillose bei einheitlicher Transporthäufigkeit neu entwickelten Algorithmen zur Ermittlung der Optimallösung im CCM⁵⁰⁸ weisen den generellen Vorteil eines schleifenfreien Ablaufs auf. Hierdurch verringert sich im Allgemeinen die Anzahl der Rechen- und Vergleichsoperationen,⁵⁰⁹ was in der Regel wiederum zu einer Verkürzung der Rechenzeit beiträgt. Da diese Ersparnis im vorliegenden Fall mit keinerlei Nachteilen – insbesondere in Bezug auf die Lösungsqualität – einhergeht, kann an dieser Stelle eine uneingeschränkte Empfehlung zur Anwendung der optimierten Algorithmen ausgesprochen werden. Allerdings ist auch davon auszugehen, dass die potentielle Verkürzung der Rechenzeit erst bei einer großen Anzahl an Datensätzen oder bei der Einbindung in ein komplexeres Planungsumfeld⁵¹⁰ ein relevantes Ausmaß erreicht. Für diese Situationen stellt sich dann jedoch die Frage, ob es effizient ist, den Anspruch der Optimalitätsgarantie aufrecht zu erhalten, oder ob gegebenenfalls auch eine geringfügig abweichende Näherungslösung akzeptabel wäre. Falls Letzteres zutreffend ist, so könnte der Aufwand zur Lösungsfindung weiter reduziert werden.⁵¹¹

Kostensenkungspotential beim BPA durch Erweiterung des Suchraums

Beim Versuch der Lösungsverbesserung durch gezielte Multiplikatorhalbierungen können – für den Fall, dass die endgültigen Kosten eines zulässigen Maschinenbelegungsplans die des vorherigen übersteigen – durch das Wiederherstellen der Ausgangslösung und das Setzen von Halbierungssperren weitere Multiplikatorkombinationen in die Lösungssuche

⁵⁰⁸ Vgl. Algorithmus 3 bzw. Algorithmus 4.

⁵⁰⁹ Vgl. Tabelle 13 bzw. Tabelle 15.

⁵¹⁰ Bspw. bei Betrachtungen über mehrere, interdependente Stufen einer Wertschöpfungskette.

⁵¹¹ Bspw. würde bei gleich großen Teillosen die Lösungsfindung mit Schritt 3 von Algorithmus 2 enden.

einbezogen werden,⁵¹² die nach der originären Vorgehensweise von HAESSLER keine Berücksichtigung finden würden.⁵¹³ Das damit prinzipiell einhergehende Potential zur Steigerung der Lösungsqualität sowie die zusätzlich erforderlichen Verfahrensschritte wurden in Kapitel 5.2.1 anhand eines Beispieldatensatzes explizit und unabhängig von der Kostenwirkung der Teillosbildung aufgezeigt. Zudem wurde im Rahmen der Ergebnisanalyse zufallsgenerierter Datensätze eine noch weitergehende Ausdehnung des Suchraums unter Einbeziehung der Lossplittingmodelle in Betracht gezogen (vgl. Kapitel 5.2.4.3). Die hieraus resultierenden Kosteneinsparungen⁵¹⁴ müssen allerdings in Relation zur gemessenen Verdopplung der Rechenzeiten⁵¹⁵ gesetzt und einer kritischen Abwägung unterzogen werden. Aufgrund dieser Sachlage bleibt als Empfehlung festzuhalten, dass auf die in Kapitel 5.2.4.3 beschriebene Erweiterung des Suchraums im Allgemeinen zunächst verzichtet und diese lediglich dann in Erwägung gezogen werden sollte, wenn sich die Kostensituation der bisherigen Lösungsalternative als weit unterdurchschnittlich oder nicht zufriedenstellend erweist.

Erkenntnisse aus den Auswertungen der Referenzdatensätze

Da Anzahl und Umfang der Referenzdatensätze keine statistisch auswertbaren Größen darstellen, beschränkt sich die Interpretation der Ergebnisse im Wesentlichen auf fallbezogenen Beobachtungen. Dennoch sind teilweise auch grundlegende Zusammenhänge erkennbar, deren Kausalität schlüssig erscheint und die als Anhaltspunkte zur Beurteilung der Kostenwirkung des Lossplittings in den betrachteten Lösungsansätzen zum ELSP herangezogen werden können. So wird bspw. ersichtlich, dass die Einbeziehung der Teillosbildung Auswirkungen auf die realisierten Multiplikatoren der Produkte (und somit auf den kombinatorischen Teil des ELSP) haben kann. Ferner ist beobachtbar, dass die Kostendifferenz zwischen der jeweils günstigsten Lossplittingalternative und der „geschlossenen Fertigung“ bei unterschiedlichen Multiplikator kombinationen regelmäßig höher ausfällt.⁵¹⁶ Einen Extremfall stellt hier das Ergebnis auf Basis des Datensatzes von CARSTENSEN dar, für den sich nach dem BPA bei „geschlossener Fertigung“ als güns-

⁵¹² Vgl. Schritt 9.1 in Algorithmus 5.

⁵¹³ Vgl. Kapitel 2.3.3.3 sowie Fußnote 400 auf Seite 104.

⁵¹⁴ Im Mittel können bspw. beim Vergleich „CCM vs. BPA“ zusätzlich ca. 0,7% erzielt werden (vgl. Tabelle 21 und Tabelle 22).

⁵¹⁵ Vgl. Tabelle 23.

⁵¹⁶ Vgl. z. B. Tabelle 34 bis Tabelle 36.

tigste Alternative lediglich die CC-Lösung einstellt.⁵¹⁷ Die Kostendifferenz zwischen Teillosmodellen mit einheitlicher und sortenindividueller Transporthäufigkeit fällt überwiegend relativ gering aus. Kommt es jedoch parameterbedingt zu vergleichsweise produktspezifisch stark divergierenden, optimalen Transporthäufigkeiten (wie bei F2)⁵¹⁸, so fällt dieser Kostenunterschied erwartungsgemäß größer aus. Dies ist im vorliegenden Fall allerdings nicht allein durch den (relativ schlechten) Kompromiss einer einheitlichen Transporthäufigkeit bedingt, sondern beruht ebenso auf Unterschieden in den Multiplikator kombinationen, was wiederum einen kausalen Zusammenhang zwischen dem Lossplittingmodell und der Reihenfolgeplanung nahelegt.

Des Weiteren liegt – bspw. bei Betrachtung der Auswertung von B1 bis B3 oder M (Mod. 1) bis M (Mod. 3)⁵¹⁹ – die Vermutung nahe, dass das Kostensenkungspotential der Teillosbildung mit steigender Kapazitätsauslastung prozentual höher ausfällt. Allerdings zeigt die Analyse der Ergebnisse von F5, dass selbst bei relativ geringer Netto- und Bruttoauslastung signifikante Kosteneinsparungen realisierbar sind.⁵²⁰ Das Potential des TVL-Ansatzes gegenüber dem BPA hält sich bei den Referenzdatensätzen von BOMBERGER und FUJITA weitestgehend in Grenzen und kommt lediglich bei den Parameterkonstellationen von MALLYA, PINEDO und insbesondere CARSTENSEN mit einer hohen Bruttoauslastung (von 100% und mehr)⁵²¹ zum Tragen.⁵²² Da der Rechenaufwand des TVL-Ansatzes im Vergleich zum BPA aufgrund der Problemkomplexität und der relativ hohen Anzahl an Variablen deutlich höher ausfällt,⁵²³ sollte das Modell mit variierenden Losgrößen lediglich dann zum Einsatz kommen, wenn die Lösung nach dem BPA ein – in Relation zur oberen und unteren Kostenschranke – vergleichsweise schlechtes Ergebnis liefert. In diesen Fällen sollte die Option positionsspezifischer Transporthäufigkeiten zunächst außen vor bleiben, da sich diesbezügliche Kostenunterschiede zur Alternative sortenbezogener Transporthäufigkeiten im Rahmen der Referenzdatensätze nicht relevant bemerkbar machen und somit die Anzahl der zu determinierenden Variablen geringer ist.

⁵¹⁷ Vgl. Tabelle 47.

⁵¹⁸ Vgl. Tabelle 37.

⁵¹⁹ Vgl. Tabelle 34 bis Tabelle 36 sowie Tabelle 43 bis Tabelle 45.

⁵²⁰ Netto- bzw. Bruttoauslastung: 41,25% bzw. 50,37% (vgl. Tabelle 18), maximale Kostendifferenz zur „geschlossenen Fertigung“: 8,5% (vgl. Tabelle 19).

⁵²¹ Vgl. Tabelle 18.

⁵²² Vgl. Tabelle 34 bis Tabelle 47.

⁵²³ Vgl. Kapitel 2.3.4 bzw. 4.5.

Erkenntnisse aus den Auswertungen zufallsgenerierter Datensätze

Statistisch belastbare Aussagen zur Kostenwirkung des Lossplittings beim BPA können aus den Ergebnisanalysen der insgesamt 4000 nach dem Zufallsprinzip generierten Datensätze abgeleitet werden. Da gegenüber dem CCM mit Teillosbildung eine durchschnittliche Kostenreduzierung von 9,3% bei gleich großen und 9,4% bei dynamischen Teillosen erzielt werden kann, sollte – trotz des höheren Rechenaufwands und heuristischen Charakters des Lösungsverfahrens – der in dieser Arbeit entwickelte Algorithmus zur Berücksichtigung von Transportlosen beim BPA präferiert werden. Ein Vergleich der unterschiedlichen Teillosmodelle innerhalb des BPA zeigt zudem, dass gegenüber der „geschlossenen Fertigung“ im Mittel ein Kostenvorteil von 5% bei gleich großen und 7% bei dynamischen Teillosen zu erwarten ist. Demnach sollte erwartungsgemäß dem Transportlosmodell nach GOYAL der Vorzug gewährt werden, sofern produktions- und absatztechnische sowie logistische Gegebenheiten (oder andere Gründe) einer entsprechenden Umsetzung nicht entgegenstehen. Tritt der Fall ein, dass ein Ergebnis nach dem BPA mit Lossplitting für eine konkrete Parameterkonstellation keine wesentliche – oder sogar eine geringfügig negative⁵²⁴ – Kostendifferenz gegenüber der „geschlossenen Fertigung“ aufweist, so sollte alternativ der in Kapitel 5.2.4.3 vorgestellte, modifizierte BPA mit erweitertem Lösungsraum oder der Ansatz variierender Losgrößen zum Zuge kommen.

⁵²⁴ Betrifft ca. 0,5% der hier betrachteten, zufallsgenerierten Datensätze.

6 Einordnung der Ergebnisse und Ausblick

6.1 Kritische Reflexion

Im Folgenden sollen die in Kapitel 4.1 formulierten Forschungsziele bzw. -fragen (Punkte 1 bis 4) retrospektiv reflektiert und einer kritischen Würdigung unterzogen werden. Da die Ableitung von Handlungsempfehlungen (Punkt 5) bereits Gegenstand des vorangegangenen Abschnitts war, sei diesbezüglich auf Kapitel 5.3 verwiesen.

1. Die für das CCM bestehenden Optimierungsverfahren zur Berücksichtigung gleich großer bzw. dynamischer Teilloser von BUSCHER/LINDNER bzw. LINDNER konnten in Kapitel 4.3 durch einen alternativen Lösungsansatz schleifenfrei formuliert werden. Hieraus resultiert im Allgemeinen eine Reduzierung der zur Ermittlung der Optimallösung notwendigen Anzahl an Rechen- und Vergleichsoperationen.⁵²⁵ Da diese potentielle Verkürzung des Lösungswegs mit keinerlei nachteiligen Effekten korreliert, kann uneingeschränkt zum Einsatz der optimierten Algorithmen geraten werden.⁵²⁶ Die Erweiterung der Modelle in Bezug auf die Berücksichtigung sortenindividueller Transporthäufigkeiten wurde ebenfalls in Kapitel 4.3 dargestellt. Da hierbei weder auf die Ganzzahligkeitsanforderung hinsichtlich der Transporthäufigkeit, noch auf den unbedingten Optimalitätsanspruch der Lösung verzichtet wurde, erfolgte die Implementierung unter Einsatz mathematischer Werkzeuge⁵²⁷. Die erzielten Ergebnisse sind daher in erster Linie als Referenzwerte für das Potential sortenindividueller gegenüber einheitlicher Transporthäufigkeiten im CCM anzusehen. Letzteres ist hinsichtlich der Kostenwirkung allerdings nicht sehr vielversprechend, wie zumindest die Auswertung der Lösungsalternativen der Referenzdatensätze vermuten lässt. Hierbei ergibt sich ein durchschnittlicher Kostenvorteil produktspezifischer Transporthäufigkeiten von ca. 0,7% bei gleich großen und ca. 0,2% bei dynamischen Teillosern.⁵²⁸

⁵²⁵ Vgl. Kapitel 5.1.

⁵²⁶ Vgl. hierzu auch die weiterführenden Erläuterungen in Kapitel 5.3.

⁵²⁷ Wie im vorliegenden Fall mittels der Optimierungsfunktion „NMinimize“ in WOLFRAM MATHEMATICA (vgl. Kapitel 4.3).

⁵²⁸ Vgl. Tabelle 34 bis Tabelle 47 in Anlage E.

2. Der im Fokus dieser Arbeit stehende BPA nach HAESSLER wurde in Kapitel 4.4 dahingehend erweitert, dass simultan zur Fertigungslosgrößenplanung sowohl gleich große, als auch dynamische Teillöse bei einheitlicher und sortenindividueller Transporthäufigkeit berücksichtigt werden können. Zur Lösung der verschiedenen Modelle wurden Algorithmen entwickelt und in WOLFRAM MATHEMATICA implementiert. Dabei wurde der originäre Ansatz von HAESSLER nicht nur entsprechend adaptiert und expandiert, sondern in einigen Punkten auch konkretisiert sowie grundlegend modifiziert,⁵²⁹ so dass eine allgemeine, von der Integration des Lossplittings unabhängige Erweiterung des Lösungsraums erfolgt ist, die wiederum zusätzliches Kosteneinsparungspotential⁵³⁰ mit sich bringt. Bezüglich des TVL-Ansatzes wurde das auf DOBSON bzw. ZIPKIN basierende Modell ebenfalls um die betrachteten Losssplittingalternativen erweitert. Das durch Algorithmus 6 definierte Optimierungsproblem setzt sich aus einer quadratischen Zielfunktion und vier korrelierten Nebenbedingungen mit insgesamt bis zu $(1 + 3 \cdot \sum_{i=1}^I n_i)$ Variablen zusammen. Die Lösung dieses komplexen Planungsproblems erfolgte daher im Rahmen der Implementierung mittels eines numerischen Optimierungsverfahrens und wurde deshalb im Wesentlichen als zusätzlicher Anhaltspunkt zur Beurteilung der Qualität der korrespondierenden BPA-Lösung herangezogen.⁵³¹

3. Das im Rahmen der hier betrachteten Lösungsansätze zum ELSP realisierbare Kostensenkungspotential des Lossplittings gegenüber der „geschlossenen Fertigung“ wurde bereits in Kapitel 5.2 ausführlich analysiert und diskutiert bzw. in Kapitel 5.3 – unter Ableitung von Handlungsempfehlungen – zusammenfassend interpretiert. Daher soll an dieser Stelle letztendlich noch einmal explizit auf die Frage eingegangen werden, ob sich die aufgrund der Losüberlappung durchschnittlich zu erwartenden Kosteneinsparungen zwischen den verschiedenen Lösungsansätzen (CCM, BPA oder TVL) signifikant unterscheiden. Wird die Auswertung der Ergebnisse der zufallsgenerierten Datensätze betrachtet (vgl. Tabelle 21), so ist ersichtlich, dass die Kosteneinsparungen des Lossplittings im CCM durchschnittlich höher ausfallen als beim BPA. Die entsprechende Differenz beläuft sich auf 4,485% bei gleich großen

⁵²⁹ Vgl. insbesondere die Erläuterungen zu Algorithmus 5.

⁵³⁰ Vgl. Kapitel 5.2.1.

⁵³¹ Vgl. Kapitel 4.5.1.

und 2,435% bei dynamischen Teillosen.⁵³² Eine ähnliche Tendenz lässt sich ebenso beim Vergleich des BPA mit dem TVL-Ansatz feststellen, auch wenn hier lediglich die Ergebnisse der Referenzdatensätze als Grundlage dienen und somit keine statistisch belastbare Auswertung möglich ist. Zieht man die entsprechenden Kostenwerte aus den Tabellen in Anlage E heran und berücksichtigt die Beispiele, bei denen sich die Ergebnisse von BPA und TVL-Ansatz zumindest für den Fall der „geschlossenen Fertigung“ unterscheiden,⁵³³ so ergeben sich die in Tabelle 24 festgehaltenen Werte. Demnach fällt der durchschnittliche Kostenvorteil der Lossplittingmodelle gegenüber der „geschlossenen Fertigung“ beim BPA um 2,852% (bei gleich großen) bzw. 2,497% (bei dynamischen Teillosen) höher aus als beim TVL-Ansatz.

Datensatz	Kostenvorteil Lossplitting vs. „geschlossene Fertigung“ [%]					
	SZTH			GYTH		
	BPA	TVL	BPA-TVL	BPA	TVL	BPA-TVL
B3	13,237	12,352	0,886	15,940	15,082	0,858
F2	3,375	1,409	1,966	4,367	4,260	0,108
F4	6,236	5,981	0,256	7,402	7,149	0,253
M(Mod.1)	0,000	0,000	0,000	6,834	4,250	2,583
M(Mod.2)	0,882	-0,516	1,398	7,751	4,245	3,506
M(Mod.3)	0,324	-0,008	0,332	6,742	4,240	2,502
PINEDO	9,248	0,000	9,248	15,435	12,201	3,234
CARSTENSEN	21,576	12,843	8,734	27,205	20,269	6,936
$\phi \Sigma$	6,860	4,007	2,852	11,460	8,962	2,497

Tabelle 24: Kostenvorteil des Lossplittings beim BPA im Vergleich zum TVL-Ansatz

Insgesamt betrachtet liegt daher die durchaus schlüssige Vermutung nahe, dass die potentiellen Kostenvorteile des Lossplittings mit steigendem Freiheitsgrad der Lösungsansätze (also vom CCM über den BPA bis hin zum TVL-Ansatz) in der Regel fortwährend geringer ausfallen. Oder in anderen Worten: Je restriktiver sich eine Lösung des ELSP gestaltet (also je weiter sie im Allgemeinen von der IS

⁵³² $9,317\% - 4,832\% = 4,485\%$ bzw. $9,405\% - 6,970\% = 2,435\%$ bei jeweils einheitlicher Transporthäufigkeit.

⁵³³ Wie bereits in Kapitel 5.3 festgestellt, konnte bei den Referenzdatensätzen mit geringer Netto- bzw. Bruttoauslastung durch den TVL-Ansatzes in der Regel keine signifikante Kostenverbesserung gegenüber der BPA-Lösung ermittelt werden. Die Einbeziehung dieser Datensätze würde daher lediglich die durchschnittliche Kostendifferenz reduzieren, was auf den Sachverhalt an sich sowie dessen Interpretation allerdings keine relevanten Auswirkungen hat.

entfernt ist), desto höher ist der Flexibilitätsgewinn durch die Teillosbildung und somit auch das Potential ihrer kostenreduzierenden Wirkung.⁵³⁴

4. Ein etwaiger Einfluss der Teillosbildung auf die optimalen Produktmultiplikatoren beim BPA wurde bereits im Rahmen der Interpretation der Erkenntnisse aus den Auswertungen der Referenzdatensätze in Kapitel 5.3 diskutiert. Demnach bleibt festzuhalten, dass die Möglichkeit der Einbeziehung des Lossplittings generell zur Realisierung günstigerer Multiplikatorkombinationen führen kann. Tritt dieser Fall ein, so liegt die dadurch erzielbare Kostenreduktion im Allgemeinen erwartungsgemäß über dem Durchschnitt. Unabhängig von der Option des Lossplittings können zudem die Unterschiede in der Relation zwischen den optimalen Multiplikatoren der IS,⁵³⁵ als zusätzliche Anhaltspunkte für die Homogenität bzw. Heterogenität der Produkte in Bezug auf die Maschinenbelegungsplanung herangezogen werden. Damit würde – neben der Netto- bzw. Bruttoauslastung (und anderen Größen⁵³⁶) einer Parameterkonstellation – ein zusätzliches Entscheidungskriterium für die Wahl eines geeigneten Lösungsansatzes (bspw. CCM oder BPA) vorliegen.

6.2 Perspektiven

“By definition, every model is an abstraction from reality and none can be used as a universal problem solver; nevertheless, many can be regarded as a helpful aid to understanding some specific situations.”⁵³⁷ In diesem Sinne bieten die in dieser Arbeit entwickelten Modelle zur Integration des Lossplittings in die betrachteten Lösungsansätze zum ELSP die Möglichkeit, diesen Teilbereich der PPS für entsprechend gegebene Planungssituationen realitätsnäher zu gestalten, ohne dabei auf den potentiell nicht unerheblichen Kostenvorteil in Relation zur „upper bound“-Lösung des CCM verzichten zu müssen. Somit kann auch davon ausgegangen werden, dass die prinzipielle Relevanz für eine Anwendung der entwickelten Algorithmen in der Praxis gegeben ist. Insbesondere

⁵³⁴ Einen vergleichbaren, auch unabhängig vom Aspekt des Lossplittings auftretenden Sachverhalt stellt die Situation dar, dass die relativ guten BPA-Lösungen der in Tabelle 24 nicht angeführten Referenzdatensätze durch den TVL-Ansatz nicht weiter verbessert werden können.

⁵³⁵ Vgl. die Ergebnisse der Referenzdatensätze in Tabelle 34 bis Tabelle 47.

⁵³⁶ Vgl. JONES, P. C.; INMAN, R. R., 1989, S. 15 und HOCKSTRA, D. J., 1997, S. 29.

⁵³⁷ SZENDROVITS, A. Z., 1975.

für die im Fokus dieser Arbeit stehenden Lösungsverfahren auf Basis des BPA erscheint der Einsatz in – um spezielle Planungstools ergänzten – ERP-Systemen⁵³⁸ sinnvoll und mittelfristig naheliegend.

Aus wissenschaftlicher Perspektive betrachtet, können aus den vorgestellten Modell-erweiterungen, den präsentierten Lösungsvorschlägen sowie den – aus der Ergebnis-analyse der Datensätze und der Beantwortung der Forschungsfragen – gewonnenen Erkenntnissen diverse weitere Forschungsansätze abgeleitet werden. Daher soll zum Schluss der Arbeit eine Auswahl diesbezüglicher Anregungen durch die im Folgenden erläuterten Aspekte gegeben werden:

- Da beim TVL-Ansatz (im Vergleich zum BPA) die Anzahl der Variablen und Nebenbedingungen sowie die Komplexität der Zielfunktion deutlich höher ausfallen und durch die Berücksichtigung der Teillostbildung weiter ansteigen,⁵³⁹ erscheint es nahe-liegend, durch den Einsatz speziell adaptierter Lösungsmethoden eine Reduzierung der Rechenzeiten anzustreben. Neben den bereits in der Literatur zur Lösung des ELSP im Allgemeinen diskutierten und herangezogenen Verfahren wie „tabu search“, „simulated annealing“, „ant colony optimization“ oder „genetischen Algo-rithmen“,⁵⁴⁰ würde sich hierfür bspw. die Erweiterung eines von ZIPKIN⁵⁴¹ speziell für den TVL-Ansatz angepassten Lösungsverfahrens anbieten, welches bei „offener Fertigung“ das Potential einer durchschnittlichen Verkürzung der Rechenzeiten um ca. 60% gegenüber einer adäquaten (also für nicht-lineare, quadratische Probleme geeigneten), aber unspezifischen Lösungsmethode aufweist.⁵⁴²

⁵³⁸ Wie bspw. mySAP ERP in Verbindung mit der Softwaresuite mySAP SCM die wiederum das Tool Advanced Planning and Optimization (APO) umfasst (vgl. bspw. DICKERSBACH, J. T., 2006, S. 6 ff.).

⁵³⁹ Vgl. Kapitel 4.5.

⁵⁴⁰ Vgl. Kapitel 2.3.5. Zwar beinhaltet die beim TVL-Ansatz zum Einsatz gekommene Funktion „NMinimize“ bereits bspw. „simulated annealing“ als Optimierungsmethode (vgl. Anlage F), allerdings ist die Implementierung an sich nicht dementsprechend ausgerichtet bzw. darauf abgestimmt.

⁵⁴¹ ZIPKIN, P. H., 1991.

⁵⁴² Vgl. ZIPKIN, P. H., 1991, S. 62 f. Der Autor zieht 160 zufallsgenerierte Datensätzen heran und vergleicht die zur Lösungsfindung erforderlichen Rechenzeiten seines speziell an das Modell des TVL-Ansatzes adaptierten Algorithmus mit denen eines universalen Solvers.

- Wie in Kapitel 5.3 erläutert, kann beim Lossplitting im CCM – durch den Verzicht auf einen absoluten Optimalitätsanspruch der Lösung – eine weitere, teils deutliche Reduzierung der erforderlichen Rechen- und Vergleichsoperationen erzielt werden. Diesbezüglich wäre eine statistisch auswertbare Analyse der relativen Veränderung von Lösungsaufwand zu -qualität angezeigt.
- Die plausible Hypothese eines degressiven Kostenvorteils des Lossplittings vom CCM über den BPA hin zum TVL-Ansatz (vgl. Punkt 3 in Kapitel 6.1) bedarf einer detaillierteren Betrachtung bzw. eines statistisch belastbaren Belegs für den Vergleich der beiden letztgenannten Verfahren.
- Der Transport der Produkte von einer Fertigungsstufe zur nächsten (bzw. zum Absatz) unterliegt in dieser Arbeit – mit Ausnahme einer ganzzahligen Transporthäufigkeit – annahmegemäß keiner Beschränkung. Würde allerdings lediglich ein Transportmittel mit begrenzter Kapazität zur Verfügung stehen⁵⁴³ oder fielen mengenabhängig gestaffelte Transportkosten anstelle eines fixen Kostensatzes an, so wäre dies durch eine entsprechende Modellerweiterung abzubilden. Gleiches würde für die Berücksichtigung von Transportzeiten gelten, sofern sie einen entscheidungsrelevanten Einfluss auf die Planungssituation haben können.⁵⁴⁴ Dies wäre insbesondere dann der Fall, wenn die Transportzeit bspw. ebenfalls mengenabhängig zu bestimmen oder allgemein produktindividuell verschieden wäre. Bei einer für alle Sorten identischen, fixen Transportzeit, würde sich lediglich der Produktionsbeginn für alle Losauflagen um diesen Zeitraum nach vorne verschieben, so dass im Allgemeinen effektiv keine ergebnisrelevanten Änderungen zu erwarten sind. Allerdings müsste dabei beachtet werden, dass die Transportzeit die Verbrauchszeit eines Teilloses nicht übersteigt, so dass eine kontinuierliche Versorgung gewährleistet bleibt. Dies entspricht einer indirekten Beschränkung der Transporthäufigkeit.

⁵⁴³ Vgl. SZENDROVITS, A. Z., 1978, GOYAL, S. K., 1979 sowie GOYAL, S. K.; SZENDROVITS, A. Z., 1986.

⁵⁴⁴ Vgl. TRUSCOTT, W. G., 1985. TRUSCOTT, W. G., 1986 diskutiert in diesem Zusammenhang bspw. auch eine beschränkte Anzahl zur Verfügung stehender Transportmittel.

- In der vorliegenden Arbeit werden die unterschiedlichen Teillosmodelle jeweils separat betrachtet. Insbesondere bei Vorliegen einer beschränkten Transportkapazität kann es sich jedoch als vorteilhaft erweisen, beide Lossplittingmodelle miteinander zu kombinieren,⁵⁴⁵ da die mit der Transporthäufigkeit anwachsenden, dynamischen Teillose bei relativ hohen Stufenleistungsrelationen schnell die maximal zulässige Transportlosgröße überschreiten können. Dieser Ansatz ließe sich prinzipiell ebenso auf die Lösungsverfahren zum ELSP übertragen und gegebenenfalls dahingehend erweitern, dass sich die Art der Teillosbildung auch für die einzelnen Produktsorten unterscheiden kann.
- Die in Kapitel 4 entwickelten Modelle zur Erweiterungen des Lossequenzproblems um die Berücksichtigung von Transportlosen zielen bewusst auf das klassische ELSP ab, auch um somit eine weitestgehend akzeptierte Basis für künftige Forschungsansätze, wie insbesondere die Ausdehnung auf ein erweitertes Planungsumfeld zu schaffen. Naheliegend sind hier bspw. Szenarien wie die Berücksichtigung einer mehrstufigen Produktion⁵⁴⁶ oder einer (zwischen Produzent und Abnehmern) integrierten Losgrößenplanung⁵⁴⁷ bis hin zu Betrachtungen im Kontext komplexer Wertschöpfungsketten bzw. -netzwerke⁵⁴⁸.

Die angeführten Punkte können somit als Indizien für den weiteren Forschungsbedarf auf dem Gebiet bzw. im Umfeld der simultanen Losgrößen- und Reihenfolgeplanung bei expliziter Einbeziehung von Teillosbildung im Sinne der Losüberlappung angesehen werden und zeigen exemplarisch konkrete Ansatzpunkte für weitere Untersuchungen auf.

⁵⁴⁵ Vgl. GOYAL, S. K.; SZENDROVITS, A. Z., 1986.

⁵⁴⁶ Die hierzu in Tabelle 5 aufgeführten Publikationen gehen bei einer mehrstufigen Fertigung im Rahmen eines BPA in der Regel von einer anderweitig determinierten Transporthäufigkeit aus und bestimmen diese nicht im Rahmen einer Simultanplanung.

⁵⁴⁷ Vgl. bspw. HO, W.-T.; LAI, S.-F.; HUANG, Y.-K., 2013.

⁵⁴⁸ Vgl. bspw. TORABI, S.; JENABI, M., 2009b oder HUANG, J.; YAO, M., 2012.

Anhang

Anlage A: Mathematische Umformungen und Herleitungen

Zu (2-13):
$$BP \geq \sum_{i=1}^I (t_{p,i} + t_{R,i}) \Rightarrow BP \geq \frac{\sum_{i=1}^I t_{R,i}}{1 - \sum_{i=1}^I m_i \cdot \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}}$$

$$\begin{aligned} BP &\geq \sum_{i=1}^I (t_{p,i} + t_{R,i}) \Rightarrow BP \geq \sum_{i=1}^I \left(t_{v,i} \cdot \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}} + t_{R,i} \right) \\ \Rightarrow BP &\geq BP \cdot \sum_{i=1}^I m_i \cdot \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}} + \sum_{i=1}^I t_{R,i} \Rightarrow BP \left(1 - \sum_{i=1}^I m_i \cdot \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}} \right) \geq \sum_{i=1}^I t_{R,i} \\ &\Rightarrow BP \geq \frac{\sum_{i=1}^I t_{R,i}}{1 - \sum_{i=1}^I m_i \cdot \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}} \end{aligned}$$

Zu (2-16):
$$\underbrace{\sum_{i=1}^I \frac{t_{p,i} + t_{R,i}}{t_{v,i}}}_{\text{Bruttoauslastung}} \leq 1 \Rightarrow BP \geq \frac{\sum_{i=1}^I \frac{t_{R,i}}{m_i}}{1 - \sum_{i=1}^I \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}}$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^I \frac{t_{p,i} + t_{R,i}}{t_{v,i}} \leq 1 &\Rightarrow \sum_{i=1}^I \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}} + \sum_{i=1}^I \frac{t_{R,i}}{t_{v,i}} \leq 1 \\ \Rightarrow \sum_{i=1}^I \frac{t_{R,i}}{m_i \cdot BP} \leq 1 - \sum_{i=1}^I \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}} &\Rightarrow \frac{1}{BP} \leq \frac{1 - \sum_{i=1}^I \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}}{\sum_{i=1}^I \frac{t_{R,i}}{m_i}} \\ \Rightarrow BP &\geq \frac{\sum_{i=1}^I \frac{t_{R,i}}{m_i}}{1 - \sum_{i=1}^I \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}} \end{aligned}$$

Zu (2-19):
$$K(T_{\text{zyk}}, t_{p,j}) = \frac{1}{T_{\text{zyk}}} \cdot \left[\sum_{j=1}^J \frac{1}{2} \cdot c_{L,j} \cdot (x_{p,j} - x_{v,j}) \cdot \frac{x_{p,j}}{x_{v,j}} \cdot t_{p,j}^2 + \sum_{j=1}^J k_{R,j} \right]$$

Den Ausgangspunkt bilden die über alle Produkte aufsummierten Kosten je Zeiteinheit nach (2-1):

$$(2-1) \quad K(t_{v,i}) = \sum_{i=1}^I \frac{1}{2} \cdot \underbrace{c_{L,i} \cdot x_{v,i} \cdot \left(1 - \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}\right)}_{h_i^0} \cdot t_{v,i} + \sum_{i=1}^I \frac{k_{R,i}}{t_{v,i}}$$

Bezogen auf eine Produktart i , ergeben sich die Kosten je Losauflage durch Multiplikation mit $t_{v,i}$:

$$K(t_{v,i}) = h_i^0 \cdot t_{v,i}^2 + k_{R,i}$$

Da beim TVL-Ansatz jede Position genau einer Losauflage eines Produkts i entspricht und sich der Gesamtzyklus aus den einzelnen Positionszeiten zusammensetzt, resultieren somit aus der Summe über alle Positionen j die Gesamtkosten bezogen auf die Zykluszeit T_{zyk} . Wird zudem $t_{v,j} = \frac{x_j}{x_{v,j}} = \frac{x_{p,j} \cdot t_{p,j}}{x_{v,j}}$ berücksichtigt, so folgt:

$$K(t_{p,j}) = \sum_{j=1}^J h_j^0 \cdot \underbrace{\frac{x_{p,j}^2}{x_{v,j}^2} \cdot t_{p,j}^2}_{t_{v,j}^2} + \sum_{i=1}^I k_{R,j}$$

Die Kosten je Zeiteinheit ergeben sich wiederum aus der Division durch T_{zyk} :

$$\begin{aligned} K(T_{\text{zyk}}, t_{p,j}) &= \frac{1}{T_{\text{zyk}}} \cdot \left[\sum_{j=1}^J \frac{1}{2} \cdot \underbrace{c_{L,j} \cdot x_{v,j} \cdot \left(1 - \frac{x_{v,j}}{x_{p,j}}\right)}_{h_j^0} \cdot \underbrace{\frac{x_{p,j}^2}{x_{v,j}^2} \cdot t_{p,j}^2}_{t_{v,j}^2} + \sum_{i=1}^I k_{R,j} \right] \\ &= \frac{1}{T_{\text{zyk}}} \cdot \left[\sum_{j=1}^J \frac{1}{2} \cdot c_{L,j} \cdot (x_{p,j} - x_{v,j}) \cdot \frac{x_{p,j}}{x_{v,j}} \cdot t_{p,j}^2 + \sum_{j=1}^J k_{R,j} \right] \end{aligned}$$

Zu (4-11):
$$K^{SZ}(\text{TH}) = 2 \cdot \sum_{i=1}^I \sqrt{h_i^{SZ}(\text{TH}) \cdot (k_{R,i} + \text{TH} \cdot k_{T,i})}$$

Den Ausgangspunkt bildet das Einsetzen von (4-9) in (4-8):

(4-8)
$$K^{SZ}(t_{v,i}, \text{TH}) = \sum_{i=1}^I h_i^{SZ}(\text{TH}) \cdot t_{v,i} + \sum_{i=1}^I \frac{k_{R,i} + \text{TH} \cdot k_{T,i}}{t_{v,i}}$$

(4-9)
$$t_{v,i,\text{opt}}(\text{TH}) = \sqrt{\frac{k_{R,i} + \text{TH} \cdot k_{T,i}}{h_i^{SZ}(\text{TH})}}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow K^{SZ}(\text{TH}) &= \sum_{i=1}^I h_i^{SZ}(\text{TH}) \cdot \underbrace{\sqrt{\frac{k_{R,i} + \text{TH} \cdot k_{T,i}}{h_i^{SZ}(\text{TH})}}}_{(4-9)} + \sum_{i=1}^I \underbrace{\frac{k_{R,i} + \text{TH} \cdot k_{T,i}}{\sqrt{\frac{k_{R,i} + \text{TH} \cdot k_{T,i}}{h_i^{SZ}(\text{TH})}}}}_{(4-9)} \\ &= \sum_{i=1}^I \sqrt{h_i^{SZ}(\text{TH}) \cdot (k_{R,i} + \text{TH} \cdot k_{T,i})} + \sum_{i=1}^I (k_{R,i} + \text{TH} \cdot k_{T,i}) \cdot \sqrt{\frac{h_i^{SZ}(\text{TH})}{k_{R,i} + \text{TH} \cdot k_{T,i}}} \\ &= \sum_{i=1}^I \sqrt{h_i^{SZ}(\text{TH}) \cdot (k_{R,i} + \text{TH} \cdot k_{T,i})} + \sum_{i=1}^I \sqrt{h_i^{SZ}(\text{TH}) \cdot (k_{R,i} + \text{TH} \cdot k_{T,i})} \\ &= 2 \cdot \sum_{i=1}^I \sqrt{h_i^{SZ}(\text{TH}) \cdot (k_{R,i} + \text{TH} \cdot k_{T,i})} \end{aligned}$$

Zu (4-28):
$$t_{v,\text{opt}}(\text{TH}_{\text{opt}}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^I k_{R,i}}{\sum_{i=1}^I h_i^o}}$$

Den Ausgangspunkt bildet (4-25):

(4-25)
$$t_{v,\text{opt}}(\text{TH}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^I (k_{R,i} + \text{TH} \cdot k_{T,i})}{\sum_{i=1}^I \left(h_i^o + \frac{c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2}{\text{TH} \cdot x_{p,i}} \right)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^I k_{R,i} + \text{TH} \cdot \sum_{i=1}^I k_{T,i}}{\sum_{i=1}^I h_i^o + \frac{1}{\text{TH}} \cdot \sum_{i=1}^I \frac{c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2}{x_{p,i}}}}$$

Wird TH in diesem Ausdruck durch die Bestimmungsgleichung für TH_{opt} ((4-26)) substituiert, so resultiert:⁵⁴⁹

$$\begin{aligned}
 t_v &= \frac{\sum_{i=1}^I k_{R,i} + t_v \cdot \underbrace{\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^I \frac{c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2}}{x_{p,i}}}}_{(4-26)} \cdot \sum_{i=1}^I k_{T,i}}{\sum_{i=1}^I h_i^o + \frac{1}{\underbrace{t_v \cdot \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^I \frac{c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2}}{x_{p,i}}}}_{(4-26)}} \cdot \sum_{i=1}^I \frac{c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2}}{x_{p,i}}} \\
 &= \frac{\sum_{i=1}^I k_{R,i} + t_v \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^I \frac{c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2}}{x_{p,i}} \cdot \sum_{i=1}^I k_{T,i}}{\sum_{i=1}^I h_i^o + \frac{1}{t_v} \cdot \frac{\sum_{i=1}^I k_{T,i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^I \frac{c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2}}{x_{p,i}}} \cdot \sum_{i=1}^I \frac{c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2}}{x_{p,i}}} \\
 &= \frac{\sum_{i=1}^I k_{R,i} + \sum_{i=1}^I t_v \cdot \underbrace{\sqrt{\sum_{i=1}^I \frac{c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2}}{x_{p,i}} \cdot \sum_{i=1}^I k_{T,i}}_{\gamma_i}}{\sum_{i=1}^I h_i^o + \sum_{i=1}^I \frac{1}{t_v} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^I k_{T,i}} \cdot \sum_{i=1}^I \frac{c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2}}{x_{p,i}}} \\
 &\Rightarrow t_v^2 = \frac{t_v \cdot \sum_{i=1}^I \gamma_i + \sum_{i=1}^I k_{R,i}}{\frac{1}{t_v} \cdot \sum_{i=1}^I \gamma_i + \sum_{i=1}^I h_i^o} \\
 &\Rightarrow t_v \cdot \sum_{i=1}^I \gamma_i + t_v^2 \cdot \sum_{i=1}^I h_i^o = t_v \cdot \sum_{i=1}^I \gamma_i + \sum_{i=1}^I k_{R,i} \\
 &\Rightarrow t_v^2 \cdot \sum_{i=1}^I h_i^o = \sum_{i=1}^I k_{R,i} \Rightarrow t_v = t_{v,opt}(TH_{opt}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^I k_{R,i}}{\sum_{i=1}^I h_i^o}}
 \end{aligned}$$

⁵⁴⁹ Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird dabei $t_{v,opt}(TH_{opt})$ als t_v geschrieben.

Anlage B: Konvexitätsnachweise

Der Nachweis der Konvexität folgender Kostenfunktionen bezüglich des jeweils betrachteten Planungsparameters wird primär dadurch geführt, dass gezeigt wird, dass deren zweite partielle Ableitung – für gegebene Werte aller weiteren Variablen – stets positiv ist.⁵⁵⁰ Aus Gründen der Vereinfachung und zur übersichtlicheren Darstellung wird dabei berücksichtigt, dass aus der Addition konvexer Funktionen wiederum eine konvexe Funktion resultiert,⁵⁵¹ so dass auf das Mitführen entsprechender Summenzeichen verzichtet werden kann.

Zu (4-1): $K^{SZ}(t_{v,i}, TH_i) =$

$$\sum_{i=1}^I \left[\underbrace{\frac{1}{2} \cdot c_{L,i} \cdot x_{v,i} \cdot \left(1 - \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}\right) + \frac{c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2}{TH_i \cdot x_{p,i}}}_{h_i^o} \right] \cdot t_{v,i} + \sum_{i=1}^I \frac{k_{R,i} + TH_i \cdot k_{T,i}}{t_{v,i}}$$

$h_i^{SZ}(TH_i)$

Für eine Produktsorte i (Entfall des Summenzeichens):

$$K_i^{SZ}(t_{v,i}, TH_i) = h_i^o \cdot t_{v,i} + \frac{c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2}{TH_i \cdot x_{p,i}} \cdot t_{v,i} + \frac{k_{R,i} + TH_i \cdot k_{T,i}}{t_{v,i}}$$

Partielle Ableitungen erster und zweiter Ordnung nach $t_{v,i}$:

$$\frac{\partial K_i^{SZ}(t_{v,i}, TH_i)}{\partial t_{v,i}} = h_i^o + \frac{c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2}{TH_i \cdot x_{p,i}} - \frac{k_{R,i} + TH_i \cdot k_{T,i}}{t_{v,i}^2}$$

$$\frac{\partial^2 K_i^{SZ}(t_{v,i}, TH_i)}{\partial t_{v,i}^2} = 2 \cdot \frac{k_{R,i} + TH_i \cdot k_{T,i}}{t_{v,i}^3} > 0 \quad \text{für alle } t_{v,i} > 0, TH_i > 0$$

Partielle Ableitungen erster und zweiter Ordnung nach TH_i :

$$\frac{\partial K_i^{SZ}(t_{v,i}, TH_i)}{\partial TH_i} = -\frac{c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2}{TH_i^2 \cdot x_{p,i}} \cdot t_{v,i} + \frac{k_{T,i}}{t_{v,i}}$$

$$\frac{\partial^2 K_i^{SZ}(t_{v,i}, TH_i)}{\partial TH_i^2} = 2 \cdot \frac{c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2}{TH_i^3 \cdot x_{p,i}} \cdot t_{v,i} > 0 \quad \text{für alle } t_{v,i} > 0, TH_i > 0$$

⁵⁵⁰ Vgl. HILLIER, F.; LIEBERMAN, G., 2010, S. 993.

⁵⁵¹ Vgl. HILLIER, F.; LIEBERMAN, G., 2010, S. 996.

Zu (4–8): $K^{SZ}(t_{v,i}, TH) =$

$$\sum_{i=1}^I \left[\underbrace{\frac{1}{2} \cdot c_{L,i} \cdot x_{v,i} \cdot \left(1 - \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}\right) + \frac{c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2}{TH \cdot x_{p,i}}}_{h_i^o} \right] \cdot t_{v,i} + \sum_{i=1}^I \frac{k_{R,i} + TH \cdot k_{T,i}}{t_{v,i}}$$

$h_i^{SZ}(TH)$

Der Konvexitätsnachweis erfolgt analog zu (4–1) unter Berücksichtigung von $TH_i = TH$.

Zu (4–14): $K^{GY}(t_{v,i}, TH_i) =$

$$\sum_{i=1}^I \left[\underbrace{\frac{1}{2} \cdot c_{L,i} \cdot x_{v,i} \cdot \left(1 - \frac{x_{v,i}}{x_{p,i}}\right) + \frac{c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2}{A(TH_i) \cdot x_{p,i}}}_{h_i^o} \right] \cdot t_{v,i} + \sum_{i=1}^I \frac{k_{R,i} + TH_i \cdot k_{T,i}}{t_{v,i}}$$

$h_i^{GY}(TH_i)$

Für eine Produktsorte i (Entfall des Summenzeichens):

$$K_i^{GY}(t_{v,i}, TH_i) = \left[h_i^o + \frac{c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2}{A(TH_i) \cdot x_{p,i}} \right] \cdot t_{v,i} + \frac{k_{R,i} + TH_i \cdot k_{T,i}}{t_{v,i}}$$

Partielle Ableitungen erster und zweiter Ordnung nach $t_{v,i}$:

$$\frac{\partial K_i^{GY}(t_{v,i}, TH_i)}{\partial t_{v,i}} = h_i^o + \frac{c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2}{A(TH_i) \cdot x_{p,i}} - \frac{k_{R,i} + TH_i \cdot k_{T,i}}{t_{v,i}^2}$$

$$\frac{\partial^2 K_i^{GY}(t_{v,i}, TH_i)}{\partial t_{v,i}^2} = 2 \cdot \frac{k_{R,i} + TH_i \cdot k_{T,i}}{t_{v,i}^3} > 0 \quad \text{für alle } t_{v,i} > 0, \quad TH_i > 0$$

Zum Nachweis der Konvexität von (4–14) bezüglich TH_i wird die entsprechende Kostenfunktion zunächst auf die relevanten, von TH_i abhängigen Bestandteile reduziert:

$$\frac{c_{L,i} \cdot x_{v,i}^2}{A(TH_i) \cdot x_{p,i}} \cdot t_{v,i} + \frac{TH_i \cdot k_{T,i}}{t_{v,i}}$$

Wird dieser Term ohne Beschränkung der Allgemeinheit mit dem Planungszeitraum T_i (> 0) multipliziert und $x_{v,i} \cdot T_i = B_i$ sowie $x_{v,i} \cdot t_{v,i} = x_i$ bzw. $\frac{T_i}{t_{v,i}} = \frac{B_i}{x_i}$ berücksichtigt so

ergibt sich:

$$\frac{c_{L,i} \cdot x_i \cdot B_i}{A(\text{TH}_i) \cdot x_{p,i}} + \frac{\text{TH}_i \cdot k_{T,i} \cdot B_i}{x_i}$$

Für diesen Ausdruck weisen BOGASCHEWSKY/BUSCHER/LINDNER die Konvexität bezüglich TH_i explizit nach.⁵⁵²

Zu (4–19):
$$K^{\text{GY}}(t_{v,i}, \text{TH}) = \sum_{i=1}^I h_i^{\text{GY}}(\text{TH}) \cdot t_{v,i} + \sum_{i=1}^I \frac{k_{R,i} + \text{TH} \cdot k_{T,i}}{t_{v,i}}$$

Der Konvexitätsnachweis erfolgt analog zu (4–14) unter Berücksichtigung von $\text{TH}_i = \text{TH}$.

Zu (4–24):
$$K^{\text{SZ}}(t_v, \text{TH}) = t_v \cdot \sum_{i=1}^I h_i^{\text{SZ}}(\text{TH}) + \frac{1}{t_v} \cdot \sum_{i=1}^I (k_{R,i} + \text{TH} \cdot k_{T,i})$$

Der Konvexitätsnachweis erfolgt analog zu (4–1) unter Berücksichtigung von $t_{v,i} = t_v$ und $\text{TH}_i = \text{TH}$.

Zu (4–32):
$$K^{\text{SZ}}(t_v, \text{TH}_i) = t_v \cdot \sum_{i=1}^I h_i^{\text{SZ}}(\text{TH}_i) + \frac{1}{t_v} \cdot \sum_{i=1}^I (k_{R,i} + \text{TH}_i \cdot k_{T,i})$$

Der Konvexitätsnachweis erfolgt analog zu (4–1) unter Berücksichtigung von $t_{v,i} = t_v$.

Zu (4–37):
$$K^{\text{GY}}(t_v, \text{TH}) = t_v \cdot \sum_{i=1}^I h_i^{\text{GY}}(\text{TH}) + \frac{1}{t_v} \cdot \sum_{i=1}^I (k_{R,i} + \text{TH} \cdot k_{T,i})$$

Der Konvexitätsnachweis erfolgt analog zu (4–14) unter Berücksichtigung von $t_{v,i} = t_v$ und $\text{TH}_i = \text{TH}$.

⁵⁵² Vgl. BOGASCHEWSKY, R.; BUSCHER, U.; LINDNER, G., 1999, S. 43 ff. (Anhang C 3).

$$\text{Zu (4-41):} \quad K^{\text{GY}}(t_v, \text{TH}_i) = t_v \cdot \sum_{i=1}^I h_i^{\text{GY}}(\text{TH}_i) + \frac{1}{t_v} \cdot \sum_{i=1}^I (k_{\text{R},i} + \text{TH}_i \cdot k_{\text{T},i})$$

Der Konvexitätsnachweis erfolgt analog zu (4-14) unter Berücksichtigung von $t_{v,i} = t_v$.

$$\text{Zu (4-43):} \quad K(\text{BP}, m_i, \text{TH}) = \text{BP} \cdot \sum_{i=1}^I h_i^{\text{SZ}}(\text{TH}) \cdot m_i + \frac{1}{\text{BP}} \cdot \sum_{i=1}^I \frac{k_{\text{R},i} + \text{TH} \cdot k_{\text{T},i}}{m_i}$$

Für eine Produktsorte i (Entfall des Summenzeichens):

$$K_i(\text{BP}, m_i, \text{TH}) = \text{BP} \cdot m_i \cdot h_i^0 + \text{BP} \cdot m_i \cdot \frac{c_{\text{L},i} \cdot x_{\text{V},i}^2}{\text{TH} \cdot x_{\text{p},i}} + \frac{k_{\text{R},i} + \text{TH} \cdot k_{\text{T},i}}{\text{BP} \cdot m_i}$$

Partielle Ableitungen erster und zweiter Ordnung nach BP:

$$\frac{\partial K_i(\text{BP}, m_i, \text{TH})}{\partial \text{BP}} = m_i \cdot h_i^0 + m_i \cdot \frac{c_{\text{L},i} \cdot x_{\text{V},i}^2}{\text{TH} \cdot x_{\text{p},i}} - \frac{k_{\text{R},i} + \text{TH} \cdot k_{\text{T},i}}{\text{BP}^2 \cdot m_i}$$

$$\frac{\partial^2 K_i(\text{BP}, m_i, \text{TH})}{\partial \text{BP}^2} = 2 \cdot \frac{k_{\text{R},i} + \text{TH} \cdot k_{\text{T},i}}{\text{BP}^3 \cdot m_i} > 0 \quad \text{für alle } \text{BP}, m_i, \text{TH} > 0$$

Partielle Ableitungen erster und zweiter Ordnung nach m_i :

$$\frac{\partial K_i(\text{BP}, m_i, \text{TH})}{\partial m_i} = \text{BP} \cdot h_i^0 + \text{BP} \cdot \frac{c_{\text{L},i} \cdot x_{\text{V},i}^2}{\text{TH} \cdot x_{\text{p},i}} - \frac{k_{\text{R},i} + \text{TH} \cdot k_{\text{T},i}}{\text{BP} \cdot m_i^2}$$

$$\frac{\partial^2 K_i(\text{BP}, m_i, \text{TH})}{\partial m_i^2} = 2 \cdot \frac{k_{\text{R},i} + \text{TH} \cdot k_{\text{T},i}}{\text{BP} \cdot m_i^3} > 0 \quad \text{für alle } \text{BP}, m_i, \text{TH} > 0$$

Partielle Ableitungen erster und zweiter Ordnung nach TH:

$$\frac{\partial K_i(\text{BP}, m_i, \text{TH})}{\partial \text{TH}} = -\text{BP} \cdot m_i \cdot \frac{c_{\text{L},i} \cdot x_{\text{V},i}^2}{\text{TH}^2 \cdot x_{\text{p},i}} + \frac{k_{\text{T},i}}{\text{BP} \cdot m_i}$$

$$\frac{\partial^2 K_i(\text{BP}, m_i, \text{TH})}{\partial \text{TH}^2} = 2 \cdot \text{BP} \cdot m_i \cdot \frac{c_{\text{L},i} \cdot x_{\text{V},i}^2}{\text{TH}^3 \cdot x_{\text{p},i}} > 0 \quad \text{für alle } \text{BP}, m_i, \text{TH} > 0$$

$$\text{Zu (4-43)\alpha: } K(\text{BP}, m_i, \text{TH}_i) = \text{BP} \cdot \sum_{i=1}^I h_i^{\text{SZ}}(\text{TH}_i) \cdot m_i + \frac{1}{\text{BP}} \cdot \sum_{i=1}^I \frac{k_{\text{R},i} + \text{TH}_i \cdot k_{\text{T},i}}{m_i}$$

Der Konvexitätsnachweis erfolgt analog zu (4-43) unter Berücksichtigung von $\text{TH} = \text{TH}_i$.

$$\text{Zu (4-49): } K(\text{BP}, m_i, \text{TH}) = \text{BP} \cdot \sum_{i=1}^I h_i^{\text{GY}}(\text{TH}) \cdot m_i + \frac{1}{\text{BP}} \cdot \sum_{i=1}^I \frac{k_{\text{R},i} + \text{TH} \cdot k_{\text{T},i}}{m_i}$$

Für eine Produktsorte i (Entfall des Summenzeichens):

$$K_i(\text{BP}, m_i, \text{TH}) = \text{BP} \cdot m_i \cdot h_i^0 + \text{BP} \cdot m_i \cdot \frac{c_{\text{L},i} \cdot x_{\text{V},i}^2}{A(\text{TH}) \cdot x_{\text{p},i}} + \frac{k_{\text{R},i} + \text{TH} \cdot k_{\text{T},i}}{\text{BP} \cdot m_i}$$

Partielle Ableitungen erster und zweiter Ordnung nach BP:

$$\frac{\partial K_i(\text{BP}, m_i, \text{TH})}{\partial \text{BP}} = m_i \cdot h_i^0 + m_i \cdot \frac{c_{\text{L},i} \cdot x_{\text{V},i}^2}{A(\text{TH}) \cdot x_{\text{p},i}} - \frac{k_{\text{R},i} + \text{TH} \cdot k_{\text{T},i}}{\text{BP}^2 \cdot m_i}$$

$$\frac{\partial^2 K_i(\text{BP}, m_i, \text{TH})}{\partial \text{BP}^2} = 2 \cdot \frac{k_{\text{R},i} + \text{TH} \cdot k_{\text{T},i}}{\text{BP}^3 \cdot m_i} > 0 \quad \text{für alle } \text{BP}, m_i, \text{TH} > 0$$

Partielle Ableitungen erster und zweiter Ordnung nach m_i :

$$\frac{\partial K_i(\text{BP}, m_i, \text{TH})}{\partial m_i} = \text{BP} \cdot h_i^0 + \text{BP} \cdot \frac{c_{\text{L},i} \cdot x_{\text{V},i}^2}{A(\text{TH}) \cdot x_{\text{p},i}} - \frac{k_{\text{R},i} + \text{TH} \cdot k_{\text{T},i}}{\text{BP} \cdot m_i^2}$$

$$\frac{\partial^2 K_i(\text{BP}, m_i, \text{TH})}{\partial m_i^2} = 2 \cdot \frac{k_{\text{R},i} + \text{TH} \cdot k_{\text{T},i}}{\text{BP} \cdot m_i^3} > 0 \quad \text{für alle } \text{BP}, m_i, \text{TH} > 0$$

Zum Nachweis der Konvexität von (4-49) bezüglich TH wird die entsprechende Kostenfunktion zunächst auf die relevanten, von TH abhängigen Bestandteile reduziert:

$$\text{BP} \cdot m_i \cdot \frac{c_{\text{L},i} \cdot x_{\text{V},i}^2}{A(\text{TH}) \cdot x_{\text{p},i}} + \frac{\text{TH} \cdot k_{\text{T},i}}{\text{BP} \cdot m_i}$$

Wird dieser Term ohne Beschränkung der Allgemeinheit mit dem Planungszeitraum T_i (> 0) multipliziert und $x_{\text{V},i} \cdot T_i = B_i$ sowie $x_{\text{V},i} \cdot \text{BP} \cdot m_i = x_i$ bzw. $\frac{T_i}{\text{BP} \cdot m_i} = \frac{B_i}{x_i}$ berücksichtigt so ergibt sich:

$$\frac{c_{L,i} \cdot x_i \cdot B_i}{A(\text{TH}) \cdot x_{p,i}} + \frac{\text{TH} \cdot k_{T,i} \cdot B_i}{x_i}$$

Für diesen Ausdruck weisen BOGASCHEWSKY/BUSCHER/LINDNER die Konvexität bezüglich TH explizit nach.⁵⁵³

Zu (4-49) α :
$$K(\text{BP}, m_i, \text{TH}_i) = \text{BP} \cdot \sum_{i=1}^I h_i^{\text{GY}}(\text{TH}_i) \cdot m_i + \frac{1}{\text{BP}} \cdot \sum_{i=1}^I \frac{k_{R,i} + \text{TH}_i \cdot k_{T,i}}{m_i}$$

Der Konvexitätsnachweis erfolgt analog zu (4-49) unter Berücksichtigung von $\text{TH} = \text{TH}_i$.

Zu (4-54):
$$K^{\text{SZ}}(\text{T}_{\text{zyk}}, n_i, \text{TH}_i) =$$

$$\text{T}_{\text{zyk}} \cdot \sum_{i=1}^I \frac{h_i^{\text{SZ}}(\text{TH}_i)}{n_i} + \frac{1}{\text{T}_{\text{zyk}}} \cdot \sum_{i=1}^I (k_{R,i} + \text{TH}_i \cdot k_{T,i}) \cdot n_i$$

Für eine Produktsorte i (Entfall des Summenzeichens):

$$K_i(\text{T}_{\text{zyk}}, n_i, \text{TH}_i) = \frac{\text{T}_{\text{zyk}}}{n_i} \cdot h_i^0 + \frac{\text{T}_{\text{zyk}}}{n_i} \cdot \frac{c_{L,i} \cdot x_{V,i}^2}{\text{TH}_i \cdot x_{p,i}} + \frac{n_i}{\text{T}_{\text{zyk}}} \cdot (k_{R,i} + \text{TH}_i \cdot k_{T,i})$$

Partielle Ableitungen erster und zweiter Ordnung nach T_{zyk} :

$$\frac{\partial K_i(\text{T}_{\text{zyk}}, n_i, \text{TH}_i)}{\partial \text{T}_{\text{zyk}}} = \frac{1}{n_i} \cdot h_i^0 + \frac{1}{n_i} \cdot \frac{c_{L,i} \cdot x_{V,i}^2}{\text{TH}_i \cdot x_{p,i}} - \frac{n_i}{\text{T}_{\text{zyk}}^2} \cdot (k_{R,i} + \text{TH}_i \cdot k_{T,i})$$

$$\frac{\partial^2 K_i(\text{T}_{\text{zyk}}, n_i, \text{TH}_i)}{\partial \text{T}_{\text{zyk}}^2} = 2 \cdot \frac{n_i}{\text{T}_{\text{zyk}}^3} \cdot (k_{R,i} + \text{TH}_i \cdot k_{T,i}) > 0 \quad \text{für alle } \text{T}_{\text{zyk}}, n_i, \text{TH}_i > 0$$

Partielle Ableitungen erster und zweiter Ordnung nach TH_i :

$$\frac{\partial K_i(\text{T}_{\text{zyk}}, n_i, \text{TH}_i)}{\partial \text{TH}_i} = -\frac{\text{T}_{\text{zyk}}}{n_i} \cdot \frac{c_{L,i} \cdot x_{V,i}^2}{\text{TH}_i^2 \cdot x_{p,i}} + \frac{n_i}{\text{T}_{\text{zyk}}} \cdot k_{T,i}$$

$$\frac{\partial^2 K_i(\text{T}_{\text{zyk}}, n_i, \text{TH}_i)}{\partial \text{TH}_i^2} = 2 \cdot \frac{\text{T}_{\text{zyk}}}{n_i} \cdot \frac{c_{L,i} \cdot x_{V,i}^2}{\text{TH}_i^3 \cdot x_{p,i}} > 0 \quad \text{für alle } \text{T}_{\text{zyk}}, n_i, \text{TH}_i > 0$$

⁵⁵³ Vgl. BOGASCHEWSKY, R.; BUSCHER, U.; LINDNER, G., 1999, S. 43 ff. (Anhang C 3).

Zu (4–59): $K^{GY}(T_{zyk}, n_i, TH_i) =$

$$T_{zyk} \cdot \sum_{i=1}^I \frac{h_i^{GY}(TH_i)}{n_i} + \frac{1}{T_{zyk}} \cdot \sum_{i=1}^I (k_{R,i} + TH_i \cdot k_{T,i}) \cdot n_i$$

Für eine Produktsorte i (Entfall des Summenzeichens):

$$K_i(T_{zyk}, n_i, TH_i) = \frac{T_{zyk}}{n_i} \cdot h_i^o + \frac{T_{zyk}}{n_i} \cdot \frac{c_{L,i} \cdot x_{V,i}^2}{A(TH_i) \cdot x_{p,i}} + \frac{n_i}{T_{zyk}} \cdot (k_{R,i} + TH_i \cdot k_{T,i})$$

Partielle Ableitungen erster und zweiter Ordnung nach T_{zyk} :

$$\frac{\partial K_i(T_{zyk}, n_i, TH_i)}{\partial T_{zyk}} = \frac{1}{n_i} \cdot h_i^o + \frac{1}{n_i} \cdot \frac{c_{L,i} \cdot x_{V,i}^2}{A(TH_i) \cdot x_{p,i}} - \frac{n_i}{T_{zyk}^2} \cdot (k_{R,i} + TH_i \cdot k_{T,i})$$

$$\frac{\partial^2 K_i(T_{zyk}, n_i, TH_i)}{\partial T_{zyk}^2} = 2 \cdot \frac{n_i}{T_{zyk}^3} \cdot (k_{R,i} + TH_i \cdot k_{T,i}) > 0 \quad \text{für alle } T_{zyk}, n_i, TH_i > 0$$

Zum Nachweis der Konvexität von (4–59) bezüglich TH_i wird die entsprechende Kostenfunktion zunächst auf die relevanten, von TH_i abhängigen Bestandteile reduziert:

$$\frac{T_{zyk}}{n_i} \cdot \frac{c_{L,i} \cdot x_{V,i}^2}{A(TH_i) \cdot x_{p,i}} + \frac{n_i}{T_{zyk}} \cdot TH_i \cdot k_{T,i}$$

Wird dieser Term ohne Beschränkung der Allgemeinheit mit der Gesamtzykluszeit T_{zyk} (> 0) multipliziert und $x_{v,i} \cdot T_{zyk} = B_i$ sowie $x_{v,i} \cdot \frac{T_{zyk}}{n_i} = x_i$ bzw. $n_i = \frac{B_i}{x_i}$ berücksichtigt so ergibt sich:

$$\frac{c_{L,i} \cdot x_i \cdot B_i}{A(TH_i) \cdot x_{p,i}} + \frac{TH_i \cdot k_{T,i} \cdot B_i}{x_i}$$

Für diesen Ausdruck weisen BOGASCHEWSKY/BUSCHER/LINDNER die Konvexität bezüglich TH_i explizit nach.⁵⁵⁴

⁵⁵⁴ Vgl. BOGASCHEWSKY, R.; BUSCHER, U.; LINDNER, G., 1999, S. 43 ff. (Anhang C 3).

Anlage C: Liste der für Abbildung 6 ausgewerteten Publikationen

Die Aufstellung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern soll lediglich die relative Verbreitung der unterschiedlichen Lösungsansätze in der fachspezifischen Literatur verdeutlichen.

Autor(en) und Publikationsjahr (vgl. Literaturverzeichnis)	CCM	BPA	TVL
AKRAMI, B.; KARIMI, B.; MOATTAR HOSSEINI, S. M., 2006	X		
ALIABADI, M. et al., 2011		X	
ALLE, A.; PINTO, J. M.; PAPAGEORGIOU, L. G., 2004	X		
ALLEN, S. J., 1990			X
ANDERSON, E. J., 1990			X
ARCADE, S. H., 1993	X	X	
AXSÄTER, S., 1987		X	
BANERJEE, A., 2009	X		
BANERJEE, A.; PYREDDY, V. R.; KIM, S. L., 1996	X		
BEN-DAYA, M.; HARIGA, M. A., 2000	X		
BOCTOR, F. F., 1982	X	X	
BOCTOR, F. F., 1987	X	X	
BOCTOR, F. F., 1988		X	
BOLLAPRAGADA, R.; RAO, U., 1999	X		
BOMBERGER, E. E., 1966	X	X	
BOURLAND, K. E.; BROWN, M. J.; YANO, C. A., 1997	X		
BOURLAND, K. E.; YANO, C. A., 1997	X	X	X
BRANDER, P.; FORSBERG, R., 2005		X	
BRANDER, P.; FORSBERG, R., 2006		X	
BRANDER, P.; LEVÉN, E.; SEGERSTEDT, A., 2005		X	
BRANDER, P.; SEGERSTEDT, A., 2009		X	
BULUT, O.; TASGETIREN, M. F.; FADILOGLU, M. M., 2012		X	
BUSCHER, U., 2000	X		
BUSCHER, U.; LINDNER, G., 2000a	X		
BUSCHER, U.; LINDNER, G., 2001	X		
CARRENO, J. J., 1990	X		
CARSTENSEN, P., 1999	X	X	X
CARSTENSEN, P., 2002	X	X	X
CASAS-LIZA, J.; PINTO, J. M.; PAPAGEORGIOU, L. G., 2005	X		
CHAN, G. H.; SONG, Y., 2001	X		
CHANDRASEKARAN, C. et al., 2007			X
CHANDRASEKARAN, C. et al., 2009			X
CHANG, P. T. et al., 2006		X	
CHANG, Y. J.; YAO, M. J., 2008		X	
CHANG, Y. J.; YAO, M. J., 2009	X		

Autor(en) und Publikationsjahr (vgl. Literaturverzeichnis)	CCM	BPA	TVL
CHATFIELD, D. C., 2007		X	
CHENG, F.; YAN, H.; YANG, J., 1998			X
CHOI, S.; NOBLE, J. S., 2000	X		
CHOWDHURY, M. R.; SARKER, B. R., 2001	X		
CHUNG, S. H.; CHAN, H. K., 2012			X
CLAUSEN, J.; JU, S., 2006	X		
COOKE, D. L.; ROHLEDER, T. R.; SILVER, E. A., 2004		X	
DAVIS, S. G., 1990		X	
DAVIS, S. G., 1995		X	
DELPORTE, C. M.; THOMAS, L. J., 1977			X
DOBSON, G., 1987			X
DOBSON, G., 1992		X	
DOLL, C. L.; WHYBARK, D. C., 1973		X	
EILON, S., 1985	X	X	
ELHAFSI, M.; BAI, S. X., 1997	X		
ELMAGHRABY, S. E., 1978a		X	
ELMAGHRABY, S. E., 1978b	X	X	
EL-NAJDAWI, M. K., 1994		X	
EL-NAJDAWI, M. K.; KLEINDORFER, P. R., 1993	X		
EYNAN, A., 2003	X		
FAALAND, B. H.; SCHMITT, T. G.; AREOLA-RISA, A., 2004	X		
FEDERGRUEN, A.; KATALAN, Z., 1998			X
FUJITA, S., 1978		X	
GALLEGO, G., 1990	X		
GALLEGO, G., 1993			X
GALLEGO, G.; MOON, I., 1992			X
GALLEGO, G.; ROUNDY, R., 1992			X
GALVIN, T. M., 1987	X	X	
GALVIN, T. M., 1988	X	X	
GENG, P. C.; VICKSON, R. G., 1988		X	
GIRI, B. C.; MOON, I., 2004a	X		X
GIRI, B. C.; MOON, I., 2004b	X		
GIRI, B. C.; MOON, I.; YUN, W. Y., 2003	X		X
GONÇALVES, J. F.; LEACHMAN, R. C., 1998			X
GONÇALVES, J. F.; SOUSA, P. S. A., 2011			X
GOYAL, S. K., 1973		X	
GOYAL, S. K., 1975a		X	
GOYAL, S. K., 1975b		X	
GOYAL, S. K., 1977			X
GRAVES, S. C., 1979		X	
GRZNAR, J.; RIGGLE, C., 1997		X	
HAESSLER, R. W., 1971	X	X	

Autor(en) und Publikationsjahr (vgl. Literaturverzeichnis)	CCM	BPA	TVL
HAESSLER, R. W., 1979		X	
HAESSLER, R. W.; HOGUE, S. L., 1976		X	
HAHM, J.; YANO, C. A., 1995a	X		
HAHM, J.; YANO, C. A., 1995b	X		
HAHM, J.; YANO, C. A., 1995c		X	X
HAI, R. et al., 2008	X		
HAKSÖZ, Ç.; PINEDO, M., 2011	X		X
HAUTH, M.; SCHNEEWEIß, C., 1997			X
HENNET, J. C., 2001	X		
HEYDARI, M.; KARIMI, B.; TORABI, S. A., 2009	X		
HO, W.-T.; LAI, S.-F.; HUANG, Y.-K., 2013	X		
HOCKSTRA, D. J., 1997	X	X	
HOQUE, M.; KINGSMAN, B. G., 1995	X		
HUANG, J. Y.; YAO, M. J., 2006		X	
HUANG, J. Y.; YAO, M. J., 2007		X	
HUANG, J. Y.; YAO, M. J., 2008		X	
HUANG, J. Y.; YAO, M. J., 2012			X
HWANG, H.; KIM, D. B.; KIM, Y. D., 1993	X		
JENABI, M. et al., 2007	X		
JENSEN, M. T.; KHOUJA, M., 2004	X		
JODLBAUER, H.; REITNER, S., 2012	X		
JONES, P. C.; INMAN, R. R., 1989	X		
KARALLI, S. M.; FLOWERS, A. D., 2006		X	
KAYVANFAR, V.; ZANDIEH, M., 2012		X	
KHOUJA, M., 1997	X		
KHOUJA, M., 1999	X		
KHOUJA, M., 2000	X		
KHOUJA, M.; MICHALEWICZ, Z.; WILMOT, M., 1998		X	
KHOURY, B. N.; ABOUD, N. E.; TANNOUS, M. M., 2001	X		
KUHN, H.; LISKE, T., 2011	X		
LARRAÑETA, J.; ONIEVA, L., 1988		X	
LEVÉN, E.; SEGERSTEDT, A., 2007		X	
LIN, G. C.; KROLL, D. E.; LIN, C. J., 2006	X		
LINDNER, G., 2001	X		
LISKE, T.; KUHN, H., 2009		X	
LIU, J.; WU, L.; ZHOU, Z., 2008			X
MADIGAN, J. G., 1968		X	
MALLYA, R., 1992	X		
MARKOWITZ, D. M.; REIMAN, M. I.; WEIN, L. M., 2000	X		
MATTHEWS, J. P., 1988		X	
MAXWELL, W. L., 1964	X	X	
MAXWELL, W. L.; SINGH, H., 1983		X	

Autor(en) und Publikationsjahr (vgl. Literaturverzeichnis)	CCM	BPA	TVL
MAYR, M., 1996	X	X	X
MOKHLESIAN, M.; FATEMI GHOMI, S. M. T.; JOLAI, F., 2010	X		
MOON, D. H.; CHRISTY, D. P., 1998	X		
MOON, I., 1994	X		
MOON, I.; CHA, B. C.; BAE, H. C., 2006	X		X
MOON, I.; GALLEGRO, G.; SIMCHI-LEVI, D., 1991	X		
MOON, I.; GIRI, B. C.; CHOI, K., 2002	X		X
MOON, I.; HAHM, J.; LEE, C., 1998	X		X
MOON, I.; SILVER, E. A.; CHOI, S., 2002			X
MÜLLER-MERBACH, H., 1962	X	X	
NARRO LOPEZ, M. A.; KINGSMAN, B. G., 1991	X	X	
NILSSON, K.; SEGERSTEDT, A., 2008		X	
OH, H. C.; KARIMI, I. A., 2001			X
ÖNER, S.; BILGIÇ, T., 2008	X		
OSMAN, H.; DEMIRLI, K., 2012	X	X	
OUENNICHE, J.; BOCTOR, F. F., 2001a		X	
OUENNICHE, J.; BOCTOR, F. F., 2001b		X	
PARK, K. S.; YUN, D. K., 1984	X	X	
PESENTI, R.; UKOVICH, W., 2003	X	X	
PHILIPOOM, P. R.; REES, L. P.; TAYLOR, B. W., 1989		X	
RAJARAM, K.; KARMARKAR, U. S., 2004		X	X
RAO, V. D. P.; SUBBAIAH, K. V.; RAJU, V. R., 2009		X	
RAZA, A. S.; AKGUNDUZ, A., 2008			X
RAZA, A. S.; AKGUNDUZ, A.; CHEN, M. Y., 2006			X
RUIZ-TORRES, A. J.; SANTIAGO, P. I.; CHUNG, W., 2010	X	X	
SALVIETTI, L.; SMITH, N. R., 2008		X	
SCHMIDT, C., 1998		X	X
SEGERSTEDT, A., 1999		X	X
SHARMA, S., 2004	X		
SHIRODKAR, V. A.; MADHUSUDANAN PILLAI, V.; SRIDHARAN, R., 2011			X
SHIRODKAR, V. A.; SRIDHARAN, R.; MADHUSUDANAN PILLAI, V., 2011			X
SILVER, E. A., 1990	X		
SILVER, E. A., 1995	X		
SOMAN, C. A.; VAN DONK, D. P.; GAALMAN, G. J. C., 2004		X	
SOMAN, C. A.; VAN DONK, D. P.; GAALMAN, G. J. C., 2006		X	
SPANNAGEL, A.; HAUTH, M., 2007	X	X	X
STANKARD, M. F.; GUPTA, S. K., 1969		X	
SUN, H.; HUANG, H. C.; JARUPHONGSA, W., 2009	X	X	
SUN, H.; HUANG, H. C.; JARUPHONGSA, W., 2010		X	
TALEIZADEH, A. A. et al., 2011	X		

Autor(en) und Publikationsjahr (vgl. Literaturverzeichnis)	CCM	BPA	TVL
TANG, L. C.; LEE, L. H., 2005			X
TANG, O.; TEUNTER, R., 2006	X		
TEUNTER, R.; KAPARIS, K.; TANG, O., 2008	X		
TEUNTER, R.; TANG, O.; KAPARIS, K., 2009	X		
TORABI, S. A.; FATEMI GHOMI, S. M. T.; KARIMI, B., 2006	X		
TORABI, S. A.; JENABI, M., 2009a		X	
TORABI, S. A.; JENABI, M., 2009b		X	
TORABI, S. A.; JENABI, M.; MANSOURI, S. A., 2008		X	
TORABI, S. A.; KARIMI, B.; FATEMI GHOMI, S. M. T., 2005	X		
TORRES, J. F.; ROJAS, G. S., 2007		X	
VAN DEN BROECKE, F.; VAN LANDEGHEM, H.; AGHEZZAF, E. H., 2005		X	
VAN DEN BROECKE, F.; VAN LANDEGHEM, H.; AGHEZZAF, E. H., 2008		X	
VEMUGANTI, R. R., 1978	X	X	
VIDAL-CARRERAS, P. I.; GARCIA-SABATER, J. P., 2009		X	
VIDAL-CARRERAS, P. I.; GARCIA-SABATER, J. P.; CORONADO-HERNANDEZ, J. R., 2012	X	X	
VISWANATHAN, S.; GOYAL, S. K., 1997	X		
VISWANATHAN, S.; GOYAL, S. K., 2002	X		
WAGNER, B. J.; DAVIS, D. J., 2002			X
WAGNER, M.; SMITS, S. R., 2004		X	
YANG, J.; YAN, H.; TAKSAR, M. I., 2000	X		
YAO, M. J., 2001		X	
YAO, M. J., 2005		X	
YAO, M. J.; CHANG, P. T.; HUANG, S. F., 2005	X		
YAO, M. J.; ELMAGHRABY, S. E., 2001		X	
YAO, M. J.; ELMAGHRABY, S. E.; CHEN, I. C., 2003		X	
YAO, M. J.; HUANG, J. X., 2005		X	
ZANONI, S. et al., 2012		X	
ZIPKIN, P. H., 1991			X
Summe	93	92	42
Anteil [%]	40,97	40,53	18,50

Anlage D: Parameter der Referenzdatensätze

Die Parameter der Referenzdatensätze sind auf eine Zeiteinheit normiert und um den Transportkostensatz $k_{T,i}$ ergänzt.

		B1	B2	B3				
i	$x_{p,i}$	$x_{v,i}$	$3 \cdot x_{v,i}$	$4 \cdot x_{v,i}$	$c_{L,i}$	$k_{R,i}$	$t_{R,i}$	$k_{T,i}$
1	30.000	100	300	400	$\frac{13}{4.800.000}$	15	0,125	$\frac{13}{10.000}$
2	8.000	100	300	400	$\frac{71}{960.000}$	20	0,125	$\frac{71}{2.000}$
3	9.500	200	600	800	$\frac{17}{320.000}$	30	0,250	$\frac{51}{2.000}$
4	7.500	400	1.200	1.600	$\frac{1}{24.000}$	10	0,125	$\frac{1}{50}$
5	2.000	20	60	80	$\frac{557}{480.000}$	110	0,500	$\frac{557}{1.000}$
6	6.000	20	60	80	$\frac{107}{960.000}$	50	0,250	$\frac{107}{2.000}$
7	2.400	6	18	24	$\frac{1}{1.600}$	310	1,000	$\frac{3}{10}$
8	1.300	85	255	340	$\frac{59}{24.000}$	130	0,500	$\frac{59}{50}$
9	2.000	85	255	340	$\frac{3}{8.000}$	200	0,750	$\frac{9}{50}$
10	15.000	100	300	400	$\frac{1}{60.000}$	5	0,125	$\frac{1}{125}$

Tabelle 25: Parameter der Datensätze von BOMBERGER (B1 bis B3)

i	$x_{p,i}$	$x_{v,i}$	$c_{L,i}$	$k_{R,i}$	$t_{R,i}$	$k_{T,i}$
1	11.000	750	$\frac{73}{12.000.000}$	50	0,250	$\frac{73}{25.000} \cdot 3$
2	2.000	40	$\frac{661}{6.000.000}$	50	0,375	$\frac{661}{12.500}$
3	1.400	500	$\frac{2.869}{24.000.000}$	10	1,000	$\frac{2.869}{50.000}$
4	7.000	160	$\frac{3}{32.000}$	260	0,500	$\frac{9}{200}$
5	700	50	$\frac{62.663}{24.000.000}$	70	0,125	$\frac{62.663}{50.000}$
6	2.500	100	$\frac{6.187}{24.000.000}$	160	0,250	$\frac{6.187}{50.000}$
7	5.500	150	$\frac{1}{6.400}$	30	0,125	$\frac{3}{40}$
8	3.000	45	$\frac{2.333}{24.000.000}$	40	0,125	$\frac{2.333}{50.000}$
9	6.000	210	$\frac{27}{32.000}$	30	0,750	$\frac{81}{200}$
10	540.216	4.500	$\frac{3}{80.000}$	20	0,250	$\frac{9}{500}$

Tabelle 26: Parameter des zweiten Datensatzes von FUJITA (F2)

i	x_{p,i}	x_{v,i}	c_{L,i}	k_{R,i}	t_{R,i}	k_{T,i}
1	25.189	1.500	$\frac{1}{150.000}$	70	0,750	$\frac{2}{625} \cdot 3$
2	3.770	200	$\frac{87}{400.000}$	15	0,500	$\frac{261}{2.500}$
3	3.900	130	$\frac{171}{4.800.000}$	30	0,250	$\frac{171}{10.000}$
4	1.950	240	$\frac{3}{8.000}$	30	0,375	$\frac{9}{50}$
5	5.000	600	$\frac{3.697}{2.400.000}$	50	0,750	$\frac{3.697}{5.000}$
6	15.000	3.000	$\frac{9}{800.000}$	10	1,000	$\frac{27}{5.000}$
7	20.000	750	$\frac{407}{600.000}$	100	0,250	$\frac{407}{1.250}$
8	2.000	95	$\frac{61}{24.000}$	200	0,125	$\frac{61}{50}$
9	6.100	100	$\frac{1}{12.000}$	20	0,5	$\frac{1}{25}$
10	15.000	300	$\frac{1}{32.000}$	150	0,125	$\frac{3}{200}$

Tabelle 27: Parameter des dritten Datensatzes von FUJITA (F3)

i	x_{p,i}	x_{v,i}	c_{L,i}	k_{R,i}	t_{R,i}	k_{T,i}
1	20.000	200	$\frac{2723}{24.000.000}$	185	0,750	$\frac{2723}{50.000}$
2	37.333	5.600	$\frac{269}{2.400.000}$	300	1,00	$\frac{269}{5.000} \cdot 3$
3	4.333	130	$\frac{183}{2.400.000}$	85	0,875	$\frac{183}{5.000}$
4	7.496	425	$\frac{1.263}{1.200.000}$	150	0,125	$\frac{1.263}{2.500}$
5	5.498	320	$\frac{2.631}{12.000.000}$	140	0,375	$\frac{2.631}{25.000}$
6	4.245	270	$\frac{1.707}{1.200.000}$	360	0,250	$\frac{1.707}{2.500}$
7	2.961	90	$\frac{1.941}{24.000.000}$	170	0,500	$\frac{1.941}{50.000}$
8	4.752	335	$\frac{3093}{12.000.000}$	50	0,625	$\frac{3093}{25.000}$
9	35.503	2.400	$\frac{1.603}{2.400.000}$	200	0,125	$\frac{1.603}{5.000}$
10	20.000	950	$\frac{199}{2.400.000}$	300	0,250	$\frac{199}{5.000}$

Tabelle 28: Parameter des vierten Datensatzes von FUJITA (F4)

i	x_{p,i}	x_{v,i}	c_{L,i}	k_{R,i}	t_{R,i}	k_{T,i}
1	4.500	90	$\frac{121}{1.500.000}$	50	0,625	$\frac{121}{3.125}$
2	1.539	50	$\frac{77}{1.500.000}$	20	0,125	$\frac{77}{3.125}$
3	2.401	40	$\frac{517}{6.000.000}$	60	0,750	$\frac{517}{12.500}$
4	1.200	30	$\frac{139}{1.500.000}$	45	1,000	$\frac{139}{3.125}$
5	2.100	70	$\frac{187}{600.000}$	5	0,875	$\frac{187}{1.250}$
6	18.000	900	$\frac{11}{250.000}$	110	0,500	$\frac{66}{3.125}$
7	13.714	2.400	$\frac{417}{2.400.000}$	60	0,375	$\frac{417}{5.000}$
8	5.600	70	$\frac{261}{2.400.000}$	70	0,250	$\frac{261}{5.000}$
9	6.500	65	$\frac{167}{2.400.000}$	90	0,125	$\frac{167}{5.000}$
10	5.200	195	$\frac{739}{6.000.000}$	250	0,125	$\frac{739}{12.500}$

Tabelle 29: Parameter des fünften Datensatzes von FUJITA (F5)

i	x_{p,i}	x_{v,i}	c_{L,i}	k_{R,i}	t_{R,i}	k_{T,i}
1	25.000	900	$\frac{19}{48.000}$	140	0,375	$\frac{19}{100}$
2	6.000	720	$\frac{47}{480.000}$	70	0,375	$\frac{47}{1.000}$
3	24.000	420	$\frac{13}{480.000}$	20	0,625	$\frac{13}{1.000}$
4	600	30	$\frac{11}{120.000}$	30	1,000	$\frac{11}{250}$
5	7.000	210	$\frac{23}{240.000}$	60	0,750	$\frac{23}{500}$
6	3.000	210	$\frac{1}{3.200}$	100	0,875	$\frac{3}{20}$
7	90.000	4.500	$\frac{211}{480.000}$	300	0,125	$\frac{211}{1.000}$
8	21.000	2.100	$\frac{7}{120.000}$	60	0,125	$\frac{7}{250}$
9	9.000	900	$\frac{1}{3.840}$	55	0,250	$\frac{1}{8}$
10	40.000	900	$\frac{197}{160.000}$	350	0,500	$\frac{591}{1.000}$

Tabelle 30: Parameter des sechsten Datensatzes von FUJITA (F6)

i	$x_{p,i}$	$x_{v,i}$	$c_{L,i}$	$k_{R,i}$	original	M	M	M	$k_{T,i}$
					$t_{R,i}$	(Mod. 1)	(Mod. 2)	(Mod. 3)	
						$\frac{t_{R,i}}{10}$	$\frac{t_{R,i}}{11}$	$\frac{t_{R,i}}{12}$	
1	1.800	431	0,2975	80	0,20	0,020	$\frac{1}{55}$	$\frac{1}{60}$	30,60
2	2.500	375	0,2380	140	0,35	0,035	$\frac{7}{220}$	$\frac{7}{240}$	24,48
3	4.000	480	0,3920	60	0,15	0,015	$\frac{3}{220}$	$\frac{1}{80}$	40,32
4	3.200	895	0,2030	100	0,25	0,025	$\frac{1}{44}$	$\frac{1}{48}$	20,88
5	1.500	151	0,1120	60	0,15	0,015	$\frac{3}{220}$	$\frac{1}{80}$	11,52

Tabelle 31: Parameter des Datensatzes von MALLYA im Original sowie unter Berücksichtigung der modifizierten Rüstzeiten

Produkt i	$x_{p,i}$	$x_{v,i}$	$c_{L,i}$	$k_{R,i}$	$t_{R,i}$	$k_{T,i}$
1	400	50	20	2.000	0,5	60
2	400	50	20	2.500	0,2	60
3	500	60	30	800	0,1	90
4	400	60	70	0	0,2	210

Tabelle 32: Parameter des Datensatzes von PINEDO

Produkt i	$x_{p,i}$	$x_{v,i}$	$c_{L,i}$	$k_{R,i}$	$t_{R,i}$	$k_{T,i}$
1	15	4	3	3.960	2	150
2	10	3	1	2.625	5	50
3	6	1	1	9.375	5	50

Tabelle 33: Parameter des Datensatzes von CARSTENSEN

Anlage E: Ergebnistabellen der Referenzdatensätze

Die Multiplikatorwerte der IS wurden wie folgt ermittelt: $m_i = \frac{t_{v,i}^*}{\min\{t_{v,i}^*\}}$. Farblich markierte Werte von Transporthäufigkeiten, Multiplikatoren, Zykluszeiten und Kosten dienen der Hervorhebung der Unterschiede zwischen differierenden Lösungen im CCM, BPA und TVL-Ansatz.

An-satz	Trans- port	Transporthäufigkeit(en)	Multiplikatoren												BP	zyk	Kosten
			9,36	2,08	2,13	1,00	2,75	5,96	11,43	1,02	3,22	2,18	3,22	2,18			
IS	offen	-	2	2	3	2	2	2	2	3	2	2	2	2	35,603	-	16,9732
	TH _i														35,705	-	17,0910
	TH	2													35,573	-	17,0965
	GY	9	4	7	8	2	3	2	4	10	3				35,637	-	17,3034
	SZ	9,45	2,10	2,15	1,00	2,80	6,03	11,56	1,04	3,22	2,21	3,22	2,21	35,253	-	17,3259	
	geschl.	1											33,786	-	17,7351		
TVL	offen																
	TH _j																
	TH _i																
	TH																
	TH _j																
	GY																
	SZ																
	TH _i																
	TH																
	geschl.																
BPA	offen	-	8	2	2	2	1	4	8	16	1	4	2	31,665	506,640	17,2117	
	TH _i													31,784	508,544	17,3324	
	TH	2	2	2	2	2	1	4	8	16	1	4	2	31,766	508,256	17,3385	
	GY	7	3	6	7	3	3	3	11	2				31,613	505,808	17,5440	
	SZ	8	2	2	2	1	4	8	16	1	4	2	31,683	506,928	17,5665		
	geschl.	1											30,548	488,768	17,9351		
CCM	offen	-												77,882		22,5984	
	TH _i													78,115		22,6786	
	TH	2	2	3	3	2	1	1	3	3	2			78,179		22,6938	
	GY	2	4	7	16	2	1	1	8	7	3	1		77,873		22,9305	
	SZ	7												77,979		22,9939	
	geschl.	1											73,901		23,8796		

- Keine (signifikante) Verbesserung der Kostensituation gegenüber BPA.

- Die Multiplikatorkombinationen sind identisch zum BPA, bei dem die BP-Länge aufgrund der Maschinenauslastung nicht voll ausgenutzt wird.

- Letzteres gilt im übertragenen Sinne auch für die Lösung nach dem TVL-Ansatz, da dort ebenso in allen Positionen freie Zeiten größer null auftreten.

Tabelle 34: Ergebnisse des Referenzdatensatzes BOMBERGER 1 (B1)

An-satz	Trans- port	Transporthäufigkeit(en)										Multiplikatoren										BP	zyk	Kosten
		offen		TH _i		TH		SZ		geschl.		8,85	1,98	2,05	1,00	2,62	5,63	10,80	1,04	3,17	2,07			
IS	offen	3	3	3	4	2	2	2	4	4	2	8,82	1,98	2,05	1,00	2,62	5,62	10,77	1,05	3,17	2,07	21,895	-	28,3496
		4										8,82	1,98	2,05	1,00	2,63	5,63	10,78	1,05	3,17	2,07	21,895	-	28,3700
	SZ	15	7	13	14	4	4	4	7	18	5	8,85	1,98	2,05	1,00	2,62	5,63	10,79	1,04	3,17	2,07	21,830	-	29,0701
		8										8,98	2,02	2,08	1,00	2,70	5,74	11,00	1,06	3,18	2,11	21,490	-	29,1366
	geschl.	1										10,29	2,24	2,26	1,00	2,99	6,55	12,59	1,01	3,28	2,38	18,588	-	31,9006
	TVL	offen											- Keine (signifikante) Verbesserung der Kostensituation gegenüber BPA.											
TH _i												- Die Multiplikatorkombinationen sind identisch zum BPA, bei dem die BP-Länge aufgrund der Maschinenauslastung nicht voll ausgenutzt wird.												
TH												- Letzteres gilt im übertragenen Sinne auch für die Lösung nach dem TVL-Ansatz, da dort ebenso in allen Positionen freie Zeiten größer null auftreten.												
SZ																								
TH _i																								
TH																								
BPA	offen											8	2	2	1	2	4	8	1	2	2	26,346	210,768	28,5149
	TH _i	3	3	3	4	2	2	2	4	4	2	8	2	2	1	2	4	8	1	2	2	26,529	212,232	28,7644
	TH	4										8	2	2	1	2	4	8	1	2	2	26,557	212,456	28,7867
	TH _i	17	8	15	17	3	4	4	9	14	6	8	2	2	1	2	4	8	1	2	2	26,384	211,072	29,5064
	TH	8										8	2	2	1	2	4	8	1	2	2	26,305	210,440	29,5652
	geschl.	1										8	2	2	1	4	8	16	1	4	2	17,017	272,272	32,1957
CCM	offen																					47,760		36,8510
	TH _i	2	3	3	5	2	2	1	5	4	2	1										47,968		37,0431
	TH	4																				47,966		37,0864
	TH _i	4	7	13	30	3	2	1	15	12	5											47,734		37,8418
	TH	12																				47,763		38,0346
	geschl.	1																				40,644		43,4192

Tabelle 35: Ergebnisse des Referenzdatensatzes BOMBERGER 2 (B2)

An-satz	Trans- port	Transporthäufigkeit(en)										Multiplikatoren										BP	zyk	Kosten	
		offen		TH _i		TH		TH _i		TH		SZ		TH _i		TH		SZ		TH _i					TH
IS	offen	-										8,58	1,93	2,01	1,00	2,54	5,46	10,46	1,05	3,15	2,01	19,528	-	31,6208	
	GY	TH _i	3	3	4	5	2	2	2	4	5	2	8,54	1,93	2,00	1,00	2,54	5,44	10,43	1,06	3,14	2,00	19,617	-	31,9704
		TH	4										8,56	1,94	2,01	1,00	2,56	5,46	10,46	1,06	3,15	2,01	19,566	-	31,9923
	SZ	TH _i	18	8	15	16	4	5	5	9	21	6	8,59	1,93	2,01	1,00	2,55	5,46	10,48	1,05	3,15	2,01	19,510	-	32,9412
		TH	9										8,75	1,98	2,04	1,00	2,64	5,59	10,71	1,07	3,15	2,06	19,135	-	33,0321
	geschl.	1										10,50	2,28	2,29	1,00	3,04	6,69	12,86	1,00	3,29	2,43	15,740	-	37,4940	
TVL	offen	Folgende Aussagen gelten an dieser Stelle mit Ausnahme der „geschlossenen Fertigung“:																							
	TH _i	- Keine (signifikante) Verbesserung der Kostensituation gegenüber BPA.																							
	GY	TH _i	- Die Multiplikatorkombinationen sind identisch zum BPA, bei dem die BP-Länge aufgrund der Maschinenauslastung nicht voll ausgenutzt wird.																						
		TH	- Letzteres gilt im übertragenen Sinne auch für die Lösung nach dem TVL-Ansatz, da dort ebenso in allen Positionen freie Zeiten größer null auftreten.																						
	SZ	TH _i																							
		TH																							
geschl.	1										16	2	2	2	1	4	8	16	1	4	2	-	230,048	38,3749	
BPA	offen	-										8	2	2	1	2	4	8	1	2	2	23,424	187,392	32,0712	
	GY	TH _i	3	3	4	5	2	2	2	5	4	3	8	2	2	1	2	4	8	1	2	2	23,624	188,992	32,4045
		TH	4										8	2	2	1	2	4	8	1	2	2	23,575	188,600	32,4278
	SZ	TH _i	20	10	18	20	4	4	4	10	16	7	8	2	2	1	2	4	8	1	2	2	23,420	187,360	33,3915
		TH	10										8	2	2	1	2	4	8	1	2	2	23,434	187,472	33,4704
	geschl.	1										4	2	2	1	2	4	8	1	2	1	23,569	188,552	39,2625	
CCM	offen	-																				42,754		41,1657	
	GY	TH _i	2	3	4	6	2	2	1	5	4	3	1										42,909		41,4133
		TH	5																				43,004		41,4751
	SZ	TH _i	5	9	16	36	4	2	1	18	15	6	1										42,746		42,4870
		TH	14																				42,722		42,7442
	geschl.	1																				34,411		51,2835	

Tabelle 36: Ergebnisse des Referenzdatensatzes BOMBERGER 3 (B3)

An-satz	Trans- port	Transporthäufigkeit(en)										Multiplikatoren										BP	zyk	Kosten	
IS	offen	-										9,92	9,84	1,48	12,18	2,20	7,35	3,32	8,81	1,21	1,00	15,461	-	19,4272	
	GY	TH _i	4	2	6	3	2	3	2	2	2	2	9,91	9,84	1,50	12,18	2,22	7,36	3,32	8,81	1,23	1,00	15,473	-	19,5980
		TH	3										9,91	9,84	1,42	12,17	2,25	7,35	3,33	8,82	1,23	1,00	15,481	-	19,6656
	SZ	TH _i	29	6	14	16	3	10	5	5	2	4	9,92	9,84	1,48	12,19	2,20	7,35	3,32	8,81	1,21	1,00	15,456	-	19,8803
		TH	4										9,75	9,82	1,32	12,12	2,23	7,29	3,31	8,80	1,23	1,00	15,456	-	19,9892
	geschl.		1										9,34	9,73	1,03	12,00	2,08	7,13	3,26	8,76	1,19	1,00	15,339	-	20,6152
TVL	offen	Keine zulässige, (signifikant) kostengünstigere Lösung im Vergleich zum BPA gefunden.																							
	TH _i																								
	TH _j																								
	GY	TH	3	8	8	1	8	2	8	4	8	1	8	8	1	8	2	8	4	8	1	1	-	141,058	19,9673
BPA	offen	Keine zulässige, (signifikant) kostengünstigere Lösung im Vergleich zum BPA gefunden.																							
	TH _i																								
	TH _j																								
	GY	TH	1	8	8	1	16	2	8	4	8	1	8	8	1	8	2	8	4	8	1	1	-	241,668	20,8557
	SZ	TH _i	4	2	6	3	2	3	2	2	2	2	8	8	2	16	2	8	4	8	1	1	15,347	245,552	19,7108
		TH	3										8	8	2	16	2	8	4	8	1	1	15,447	247,152	19,8928
geschl.	TH _i	23	5	19	21	3	11	6	5	2	4	4	4	1	8	2	4	2	4	1	1	21,821	174,568	20,3507	
	TH	5										4	8	1	8	2	4	2	4	1	1	15,372	245,952	20,1646	
offen		1										4	8	1	8	2	4	2	4	1	1	21,132	169,056	20,5619	
TH _i		-										4	8	1	8	2	4	2	4	1	1	19,967	159,736	21,2801	
CCM	offen	-										1										50,128		28,7264	
	TH _i	3	2	7	2	3	2	2	2	2	3	3											50,329		28,8562
	TH	4																				50,362		28,9245	
	SZ	TH _i	9	2	31	4	4	5	5	2	6	14											50,099		29,1792
		TH	7																				50,127		29,3095
	geschl.		1																				46,971		30,7460

Tabelle 37: Ergebnisse des Referenzdatensatzes FUJITA 2 (F2)

An-satz	Trans- port	Transporthäufigkeit(en)										Multiplikatoren										BP	zyk	Kosten
IS	offen	-										11,00	2,43	10,44	2,49	1,00	2,45	1,82	3,76	6,30	16,30	11,088	-	36,4273
	TH _i	4	2	3	3	3	5	2	2	2	3	10,79	2,40	10,24	2,45	1,00	2,41	1,79	3,70	6,19	15,98	11,312	-	36,8054
	TH	3										10,79	2,41	10,24	2,45	1,00	2,39	1,80	3,72	6,19	15,98	11,321	-	36,8230
	TH _i	30	4	11	7	4	30	5	4	4	20	11,05	2,44	10,49	2,50	1,00	2,46	1,83	3,78	6,33	16,37	11,041	-	37,5441
	TH	5										10,77	2,43	10,29	2,43	1,00	2,32	1,81	3,75	6,25	16,09	11,190	-	37,5990
	geschl.	1										11,61	2,59	11,31	2,47	1,00	2,25	1,97	4,03	6,95	17,89	9,901	-	39,2066
TVL	offen																							
	TH _j																							
	TH _i																							
	TH																							
	TH _j																							
BPA	offen	-										8	2	8	2	1	2	2	4	8	16	11,010	176,160	36,6700
	TH _i	4	2	3	3	3	5	3	2	2	3	8	2	8	2	1	2	2	4	8	16	11,098	177,568	37,0527
	TH	3										8	2	8	2	1	2	2	4	8	16	11,113	177,808	37,0648
	TH _i	22	3	8	5	4	25	5	4	5	20	8	2	8	2	1	2	2	4	8	16	10,989	175,824	37,7878
	TH	5										8	2	8	2	1	2	2	4	8	16	11,033	176,528	37,8283
	geschl.	1										8	2	8	2	1	2	2	4	8	16	10,314	165,024	39,4103
CCM	offen	-																				28,086		48,0663
	TH _i	3	2	2	3	4	6	3	2	2	2											28,222		48,3546
	TH	3																				28,221		48,4009
	TH _i	7	4	3	7	11	31	7	3	2	3											28,106		49,1830
	TH	7																				28,092		49,3810
	geschl.	1																				25,796		52,5394

Tabelle 38: Ergebnisse des Referenzdatensatzes FUJITA 3 (F3)

An-satz	Trans- port	Transporthäufigkeit(en)										Multiplikatoren										BP	zyk	Kosten	
		offen		TH _i	TH	SZ		geschl.	7,84	2,05	8,13	1,63	3,98	2,74	13,42	2,16	1,00	5,47	16,359	89,2399					
IS	offen	2	5	3	3	3	3	3	3	3	4	7,83	2,05	8,12	1,63	3,97	2,74	13,39	2,16	1,00	5,46	16,393	-	89,4618	
		4										7,82	2,04	8,11	1,64	3,97	2,74	13,38	2,16	1,00	5,45	16,411	-	89,5097	
	SZ	8	26	12	6	13	8	17	8	10	27	7,84	2,05	8,12	1,63	3,98	2,73	13,41	2,16	1,00	5,46	16,371	-	90,4851	
		11										7,83	2,02	8,11	1,65	3,96	2,74	13,37	2,17	1,00	5,43	16,395	-	90,6466	
geschl.		1										8,31	1,88	8,44	1,65	4,02	2,75	13,92	2,15	1,00	5,57	15,301	-	96,5646	
TVL	offen	Folgende Aussagen gelten an dieser Stelle mit Ausnahme der „geschlossenen Fertigung“:																							
	GY	TH _i	- Keine (signifikante) Verbesserung der Kostensituation gegenüber BPA.																						
		TH _i	- Die Multiplikatorkombinationen sind identisch zum BPA, bei dem die BP-Länge aufgrund der Maschinenauslastung nicht voll ausgenutzt wird.																						
		TH	- Letzteres gilt im übertragenen Sinne auch für die Lösung nach dem TVL-Ansatz, da dort ebenso in allen Positionen freie Zeiten größer null auftreten.																						
SZ	TH _i																								
TH																									
geschl.	1										8	2	8	2	4	4	16	2	1	8	-	215,365	97,7400		
BPA	offen	-										8	2	8	2	4	2	16	2	1	4	17,337	277,392	90,4869	
	GY	TH _i	2	5	3	3	3	3	3	3	3	3	8	2	8	2	4	2	16	2	1	4	17,372	277,952	90,7053
		TH	4										8	2	8	2	4	2	16	2	1	4	17,384	278,144	90,7524
	SZ	TH _i	9	26	13	8	14	7	21	8	10	21	8	2	8	2	4	2	16	2	1	4	17,340	277,440	91,7319
TH	11										8	2	8	2	4	2	16	2	1	4	17,336	277,376	91,8946		
geschl.	1										8	2	8	2	4	2	16	2	1	4	16,029	256,464	98,0066		
CCM	offen	-																				35,549	109,145		
	GY	TH _i	2	5	2	3	3	3	2	3	4	3	1										35,607	109,345	
		TH	4																				35,621	109,389	
	SZ	TH _i	2	27	3	8	7	7	3	8	21	11											35,554	110,389	
TH		13																				35,558	110,631		
geschl.	1																				32,828	118,318			

Tabelle 39: Ergebnisse des Referenzdatensatzes FUJITA 4 (F4)

An-satz	Trans- port	Transporthäufigkeit(en)										Multiplikatoren										BP	zyk	Kosten																																													
												6,35	6,80	10,07	9,76	1,17	4,09	1,00	7,31	10,74	7,87				6,35	6,79	10,05	9,74	1,20	4,08	1,00	7,29	10,70	7,85	6,35	6,80	10,07	9,76	1,23	4,09	1,00	7,30	10,72	7,86	6,35	6,80	10,08	9,76	1,18	4,10	1,00	7,31	10,74	7,88	6,42	6,89	10,19	9,88	1,37	4,12	1,00	7,40	10,84	7,93	7,42	7,85	11,82	11,35	1,36
IS	offen	-																				18,677	-	17,3750																																													
	TH _i	3	3	2	2	4	5	2	2	3	4										18,738	-	17,4192																																														
	TH																					18,711	-	17,4345																																													
	GY	7	7	7	7	2	23	17	6	7	18	12										18,665	-	17,6014																																													
TVL	TH _i	1																				18,507	-	17,6758																																													
	TH																					15,661	-	18,9982																																													
	GY																																																																				
	SZ																																																																				
BPA	offen	-																				18,954	151,632	17,4767																																													
	TH _i	3	3	2	2	2	4	5	2	2	3	4										18,998	151,984	17,5226																																													
	TH																					19,010	152,080	17,5408																																													
	GY	9	9	6	6	1	23	18	6	6	19	11										18,950	151,600	17,7031																																													
CCM	TH _i	1																				18,954	151,632	17,7962																																													
	TH																					16,738	267,808	19,1513																																													
	GY																					57,891			26,2561																																												
	SZ																					57,942			26,2850																																												
CCM	offen	-																				57,988			26,3067																																												
	TH _i	2	2	2	2	2	3	6	2	2	3	5										57,890			26,4819																																												
	TH																					57,903			26,6672																																												
	GY	4	3	2	2	4	18	54	3	2	7	22										50,030			30,4035																																												
CCM	TH _i	1																																																																			
	TH																																																																				
	GY																																																																				
	SZ																																																																				

Tabelle 40: Ergebnisse des Referenzdatensatzes FUJITA 5 (F5)

An-satz	Trans- port	Transporthäufigkeit(en)										Multiplikatoren										BP	zyk	Kosten	
IS	offen	-										1,60	2,66	3,35	8,48	4,39	3,20	1,00	1,85	1,28	1,42	17,869	-	88,4111	
	GY	TH _i	3	4	2	3	3	3	3	4	3	2	1,60	2,66	3,35	8,49	4,39	3,21	1,00	1,85	1,28	1,42	17,885	-	88,5735
		TH	3										1,60	2,65	3,35	8,49	4,39	3,21	1,00	1,84	1,28	1,42	17,885	-	88,5890
	SZ	TH _i	7	20	7	8	9	10	12	22	10	5	1,60	2,66	3,35	8,48	4,39	13,20	1,00	1,85	1,28	1,42	17,866	-	89,2983
		TH	9										1,61	2,63	3,36	8,51	4,40	3,21	1,00	1,83	1,28	1,43	17,821	-	89,3794
	geschl.		1										1,62	2,48	3,46	8,48	4,48	3,14	1,00	1,76	1,22	1,46	17,002	-	92,7780
TVL	offen																								
	GY	TH _j																							
		TH _i																							
	TH																								
	TH _j																								
	SZ	TH _i																							
TH																									
geschl.																									
BPA	offen	-										2	4	4	8	4	4	1	2	2	2	14,917	119,336	89,6630	
	GY	TH _i	3	4	2	3	3	3	3	4	4	2	2	4	4	8	4	4	1	2	2	2	14,936	119,488	89,8227
		TH	3										2	4	4	8	4	4	1	2	2	2	14,938	119,504	89,8349
	SZ	TH _i	8	25	7	7	7	10	10	20	13	6	2	4	4	8	4	4	1	2	2	2	14,915	119,320	90,5500
		TH	9										2	4	4	8	4	4	1	2	2	2	14,909	119,272	90,6150
	geschl.		1										2	2	4	8	4	4	1	2	1	2	15,183	121,464	94,1291
offen																					25,028		94,6925		
GY	TH _i	3	4	2	2	2	3	3	4	3	2	1										25,060		94,8680	
	TH	3																				25,069		94,8834	
SZ	TH _i	7	11	3	1	3	4	17	17	11	5											25,027		95,5802	
	TH	9																				25,029		95,7303	
geschl.		1																				23,894		99,3074	

Tabelle 41: Ergebnisse des Referenzdatensatzes FUJITA 6 (F6)

An-satz	Trans- port	Transporthäufigkeit(en)					Multiplikatoren					BP	zyk	Kosten	
		offen	TH _i	TH	SZ	geschl.	1,50	2,26	1,00	1,45	3,30				5,949
IS	offen	4	3	3	5	5	1,49	2,22	1,00	1,44	3,27	6,000	2.261,39		
	GY			4			1,48	2,21	1,00	1,42	3,24	6,043	2.267,50		
	TH _i	9	7	5	13	6	1,49	2,21	1,00	1,44	3,26	6,003	2.431,68		
	TH			8			1,44	2,16	1,00	1,36	3,19	6,182	2.448,63		
	geschl.			1			1,33	2,18	1,00	1,23	3,35	6,442	3.256,78		
TVL und BPA															
nur CC-Lösung realisierbar bzw. kosteneffizient															
CCM	offen			-									9,982	2.464,86	
	TH _i	4	3	3	5	3							9,982	2.521,55	
	TH			4									9,982	2.528,07	
	TH _i	10	7	7	16	4			1				9,982	2.696,93	
	TH			10									9,982	2.711,87	
	geschl.			1									9,982	3.667,35	

Tabelle 42: Ergebnisse des Referenzdatensatzes MALLYA (original)

Ansatz	Transport	Transporthäufigkeit(en)	Multiplikatoren				BP	zyk	Kosten					
IS	offen	-	1,50	2,26	1,00	1,45	3,30	0,851	616,123					
	TH _i	2	2	1	2	2	1,65	2,24	1,39	3,35	813,660			
	TH	2					1,25	1,70	1,06	2,55	826,974			
	TH _i	1	1	1	2	1	1,21	1,83	1,28	2,84	855,432			
	TH	1					1,21	1,83	1,05	2,84	865,556			
	geschl.	1	1	1,21	1,83	1,00	1,05	2,84	0,976	865,556				
TVL	offen	-	1	2	1	1	2	1	2	2,176	626,082			
	TH _i	keine (signifikante) Verbesserung der Kostensituation gegenüber sortenspezifischen Transporthäufigkeiten												
	TH _i	2	2	1	3	2	2	2	1	2	4	2,480	829,080	
	TH	2					1	2	1	1	2	2,683	834,813	
	TH _i	keine (signifikante) Verbesserung der Kostensituation gegenüber sortenspezifischen Transporthäufigkeiten												
	TH _i	1	2	1	2	1	1	2	1	1	2	2,231	860,916	
BPA	offen	nur CC-Lösung realisierbar bzw. kosteneffizient												
	TH _i	2	2	1	2	1	2	2	1	1	2	1,067	2,134	830,451
	TH	2					1	2	1	1	2	1,561	3,122	844,435
	TH _i	nur CC-Lösung realisierbar bzw. kosteneffizient												
	TH	1	1	1	2	1	1	2	1	1	2	2,066	871,868	
	geschl.	1					1	2	1	1	2	2,066	871,868	
CCM	offen	-									1,347	653,328		
	TH _i	2	2	2	2	1	2	2	1	1	1,605	852,228		
	TH	2					1	2	1	1	1,624	856,866		
	TH _i	1	1	1	1	2	1	2	1	1	1,323	889,884		
	TH	1					1	2	1	1	1,253	906,372		
	geschl.	1					1	2	1	1	1,253	906,372		

Tabelle 43: Ergebnisse des Referenzdatensatzes MALLYA (M Mod. 1)

Ansatz	Transport	Transporthäufigkeit(en)	Multiplikatoren						BP	zyk	Kosten				
IS	offen	-	1,50	2,26	1,00	1,45	3,30	0,851	-	616,123					
	GY	TH _i	2	2	1	2	2	1,65	2,24	1,00	1,39	3,35	0,976	813,660	
		TH	2					1,25	1,70	1,00	1,06	2,55	1,285	826,974	
	SZ	TH _i	1	1	1	2	1	1,21	1,83	1,00	1,28	2,84	0,976	855,432	
		TH	1					1,21	1,83	1,00	1,05	2,84	0,976	865,556	
	geschl.	1		1,21	1,83	1,00	1,05	2,84	0,976	-	865,556				
offen	-		1	2	1	1	2	1	2,175	625,992					
TVL	TH _i	keine (signifikante) Verbesserung der Kostensituation gegenüber sortenspezifischen Transporthäufigkeiten													
	GY	TH _i	2	2	1	3	2	2	2	1	2	4	-	3,577	826,165
		TH	2					1	2	1	1	2	-	2,682	834,782
	SZ	TH _i	keine (signifikante) Verbesserung der Kostensituation gegenüber sortenspezifischen Transporthäufigkeiten												
		TH _i	1	2	1	2	1	1	2	1	1	2	-	2,231	860,933
		TH	1					1	2	1	1	2	-	2,284	876,290
geschl.		1					1	2	1	1	2	-	2,065	871,790	
BPA	offen	-	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1,419	2,838	648,343	
	GY	TH _i	2	2	1	2	1	2	2	1	1	2	1,067	2,134	830,451
		TH	2					1	2	1	1	2	1,419	2,838	836,118
	SZ	TH _i	2	2	1	2	1	1	2	1	1	2	1,419	2,838	884,332
		TH	2					1	2	1	1	2	1,419	2,838	898,375
	geschl.	2					1	2	2	1	1	2	1,419	2,838	898,375
CCM	offen	nur CC-Lösung realisierbar bzw. kosteneffizient													
	GY	TH _i	2	2	2	2	1						1,347	653,328	
		TH	2										1,605	852,228	
	SZ	TH _i	1	1	1	2	1	1		1			1,624	856,866	
		TH	1										1,323	889,884	
	geschl.	1										1,253	906,372		
geschl.	1										1,253	906,372			

Tabelle 44: Ergebnisse des Referenzdatensatzes MALLYA (M Mod. 2)

An-satz	Trans- port	Transporthäufigkeit(en)			Multiplikatoren					BP	zyk	Kosten				
IS	offen	2	2	1	2	2	2	1,50	2,26	1,00	1,45	3,30	0,851	616,123		
	GY	TH _i	2	2	1	2	2	1,65	2,24	1,00	1,39	3,35	0,976	813,660		
		TH	2					1,25	1,70	1,00	1,06	2,55	1,285	826,974		
	SZ	TH _i	1	1	1	2	1	1,21	1,83	1,00	1,28	2,84	0,976	855,432		
		TH	1					1,21	1,83	1,00	1,05	2,84	0,976	865,556		
	geschl.		1	1	1	1	1	1,21	1,83	1,00	1,05	2,84	0,976	865,556		
offen		-					1	2	1	1	2	-	2,174	625,942		
TVL	TH _j	keine (signifikante) Verbesserung der Kostensituation gegenüber sortenspezifischen Transporthäufigkeiten														
	GY	TH _i	2	2	1	3	2	2	2	2	1	2	4	-	3,575	825,823
		TH	Keine zulässige, (signifikant) kostengünstigere Lösung im Vergleich zum BPA gefunden.													
	SZ	TH _j	keine (signifikante) Verbesserung der Kostensituation gegenüber sortenspezifischen Transporthäufigkeiten													
		TH _i	1	2	1	2	1	1	1	2	2	1	2	-	2,267	860,987
	geschl.		1					1	2	2	1	2	-	2,044	871,810	
offen		-					1	2	2	1	2	-	2,065	871,744		
555 BPA	GY	TH _i	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1,301	636,068	
		TH	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1,301	829,978	
	GY	TH _i	2	2	1	2	1	2	2	2	1	1	2	1,067	830,451	
		TH	2					1	2	2	1	1	2	1,341	834,778	
	SZ	TH _i	1	2	1	2	1	1	1	2	1	1	2	1,301	870,139	
		TH	2					1	2	2	1	1	2	1,301	892,231	
geschl.		1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	2	1,301	895,132		
offen		-					1	2	2	1	1	2	1,301	895,132		
CCM	GY	TH _i	2	2	2	2	1						1,347	653,328		
		TH	2										1,605	852,228		
	SZ	TH _i	1	1	1	2	1				1		1,624	856,866		
		TH	1										1,323	889,884		
	geschl.	TH _i	1	1	1	1	1						1,253	906,372		
		TH	1										1,253	906,372		

Tabelle 45: Ergebnisse des Referenzdatensatzes MALLYA (M Mod. 3)

⁵⁵⁵ Geringfügig verbessertes Ergebnis bei Anwendung des erweiterten Lösungsansatzes aus Kapitel 5.2.4.3.

Ansatz	Transport	Transporthäufigkeit(en)						Multiplikatoren			BP	zyk	Kosten	
IS	offen	-						3,90	3,22	1,50	1,00	0,952	-	7.710,41
	GY	TH _i	3	3	2	2	2	3,65	3,10	1,46	1,00	0,979	-	8.503,81
		TH	2						3,57	3,02	1,45	1,00	0,990	-
	SZ	TH _i	5	4	2	2	2	3,77	3,12	1,44	1,00	0,971	-	9.077,57
		TH	2						3,56	2,94	1,42	1,00	0,998	-
	geschl.	1						3,68	2,93	1,41	1,00	0,990	-	9.774,91
offen	-						4	4	2	1	-	3,542	8.014,45	
TVL	TH _j	keine (signifikante) Verbesserung der Kostensituation gegenüber sortenspezifischen Transporthäufigkeiten												
	GY	TH _i	3	3	2	2	2	4	4	2	1	-	3,542	8.827,36
		TH	2						4	4	2	1	-	3,542
	SZ	TH _j	2	2	1	5	2	3	1	6	1	-	3,542	9.376,04
		TH _i	4	5	4	4	1	4	4	2	1	-	3,542	9.414,12
	TH	1						4	4	2	1	-	3,542	10.113,7
geschl.	1						4	4	2	1	-	3,542	10.113,7	
BPA	offen	-						2	2	1	1	1,667	3,334	9.041,67
	GY	TH _i	3	3	2	2	2	2	2	1	1	1,667	3,334	9.696,61
		TH	3						2	2	1	1	1,667	3,334
	SZ	TH _i	5	5	3	3	3	2	2	1	1	1,667	3,334	10.398,3
		TH	3						2	2	1	1	1,667	3,334
	geschl.	1						2	2	1	1	1,667	3,334	11.501,0
CCM	offen	-						1			2,083	9.735,67		
	GY	TH _i	2	2	2	2	3	1			2,083	10.370,9		
		TH	3						1			2,083	10.378,5	
	SZ	TH _i	3	3	3	3	4	1			2,083	11.093,0		
		TH	3						1			2,083	11.101,6	
	geschl.	1						1			2,083	12.220,6		

Tabelle 46: Ergebnisse des Referenzdatensatzes PINEDO

An-satz	Trans- port	Transporthäufigkeit(en)				Multiplikatoren			BP	zyk	Kosten
		offen	TH _i	TH	TH _j	1,00	1,67	5,00			
IS	offen	-				1,00	1,67	5,00	30,000	-	494,000
	TH _i	3	4	4		1,00	1,66	4,88	31,060	-	520,167
	TH	4				1,00	1,61	4,73	32,080	-	520,967
	TH _j	4	7	9		1,00	1,69	5,07	29,613	-	557,179
	TH	5				1,00	1,58	4,78	30,570	-	558,703
	geschl.	1				1,00	1,59	5,47	23,255	-	646,217
TVL	offen	-				1	2	4	-	131,828	512,970
	TH _i	3	4	3	6	1	2	4	-	134,145	536,797
	TH _j	3	4	3	6	1	2	4	-	134,145	536,797
	GY	3			3	1	2	4	-	134,836	538,266
	TH	4				1	2	4	-	136,478	538,205
	TH _j	keine (signifikante) Verbesserung der Kostensituation gegenüber sortenspezifischen Transporthäufigkeiten									
	SZ	4	8	6		1	2	4	-	128,635	575,645
	TH	3				1	2	4	-	121,477	588,338
	geschl.	1				1	2	4	-	100,579	675,029
BPA	offen	-				1	2	2	52,5	105	574,714
	TH _i	4	5	3		1	2	2	52,5	105	593,245
	TH	4				1	2	2	52,5	105	594,169
	TH _j	8	14	6		1	2	2	52,5	105	637,762
	TH	9				1	2	2	52,5	105	640,111
	geschl.	1				1	1	45,0	45,0	816,222	
CCM	offen	-							52,158		611,987
	TH _i	4	4	3					53,390		633,458
	TH	4							53,483		634,221
	TH _j	8	7	3			1		52,158		675,044
	TH	7							52,294		677,328
	geschl.	1						45,000		816,222	

Tabelle 47: Ergebnisse des Referenzdatensatzes CARSTENSEN

Anlage F: Erläuterungen zur Funktion „NMinimize“

Die in WOLFRAM MATHEMATICA bereitgestellte Funktion „NMinimize“ ist ein für die numerische Ermittlung des globalen Minimums einer nicht-linearen Zielfunktion konzipierter Universal-Solver. Dabei können entsprechend der konkreten Problemstellung verschiedene (eventuell ebenfalls nicht-lineare) Nebenbedingungen integriert werden, deren Einhaltung im Allgemeinen durch die Berücksichtigung eines Malus bei Überschreiten der Restriktion sichergestellt werden soll. Die Anwendung von „NMinimize“ setzt die Definition eines Startintervalls (mit einer oberen und unteren Bereichsgrenze) für jede Variable voraus. Zur eigentlichen Lösungsfindung stehen der Funktion generell folgende Optimierungsmethoden zur Verfügung, die in Abhängigkeit von der konkreten Problemlassifikation zum Einsatz kommen können:⁵⁵⁶ „Differential Evolution“, „Nelder-Mead“, „Random Search“ und „Simulated Annealing“. Je nach Umfang und Komplexität der Problemstellung repräsentiert das auf Basis dieser heuristischen Methoden ermittelte Ergebnis nicht zwangsläufig das gesuchte, globale Minimum der Zielfunktion unter exakter Einhaltung aller Nebenbedingungen. Insbesondere bei unzureichender Lösungsqualität ist es daher empfehlenswert, die Funktion „NMinimize“ mit unterschiedlichen Startbedingungen sowie gegebenenfalls einem konkret spezifizierten Präzisionsgrad mehrfach auszuführen und die beste Lösung als Ergebnis festzuhalten.⁵⁵⁷ Diesem Umstand wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit bei der Implementierung zur Lösungsfindung nach dem TVL-Ansatz bspw. dadurch Rechnung getragen, dass mindestens drei (maximal vier) alternative Gesamtzykluslängen und Auflagehäufigkeitstupel berücksichtigt werden (vgl. Algorithmus 6), von denen letztendlich die Kombination mit den geringsten Gesamtkosten ausgewählt wird. Somit kann beim Einsatz der Funktion „NMinimize“ in diesem Kontext eine gute (in der Regel optimale) Lösungsqualität weitestgehend sichergestellt werden. Bezüglich des Potentials zur Verkürzung der Rechenzeiten beim Einsatz speziell adaptierter Lösungsmethoden sei auf die perspektivischen Anregungen in Kapitel 6.2 verwiesen.

⁵⁵⁶ Zu näheren Erläuterungen der Methoden vgl. CHAMPION, B.; STRZEBONSKI, A., 2008, S. 45 ff.

⁵⁵⁷ Vgl. CHAMPION, B.; STRZEBONSKI, A., 2008, S. 41 ff.

Literaturverzeichnis

- ADAM, D. (1969): Produktionsplanung bei Sortenfertigung – Ein Beitrag zur Theorie der Mehrproduktunternehmung, Wiesbaden 1969.
- AKRAMI, B.; KARIMI, B.; MOATTAR HOSSEINI, S. M. (2006): Two metaheuristic methods for the common cycle economic lot sizing and scheduling in flexible flow shops with limited intermediate buffers: The finite horizon case, in: *Applied Mathematics and Computation*, 183. Jg., 2006, Nr. 1, S. 634-645.
- ALIABADI, M.; JOLAI, F.; MEHDIZADEH, E.; JENABI, M. (2011): A Flow shop Production Planning Problem with basic period policy and Sequence Dependent set up times, in: *Journal of Industrial and Systems Engineering*, 5. Jg., 2011, Nr. 1, S. 1-19.
- ALLE, A.; PINTO, J. M.; PAPAGEORGIOU, L. G. (2004): The Economic Lot Scheduling Problem under Performance Decay, in: *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 43. Jg., 2004, Nr. 20, S. 6463-6475.
- ALLEN, S. J. (1990): Production Rate Planning for Two Products Sharing a Single Process Facility: A Real-World Case Study, in: *Production and Inventory Management Journal*, 31. Jg., 1990, Nr. 3, S. 24-29.
- ALMADA-LOBO, B.; KLABJAN, D.; ANTÓNIA CARRAVILLA, M.; OLIVEIRA, J. F. (2007): Single machine multi-product capacitated lot sizing with sequence-dependent setups, in: *International Journal of Production Research*, 45. Jg., 2007, Nr. 20, S. 4873-4894.
- ANDERSON, E. J. (1990): Testing Feasibility in a Lot Scheduling Problem, in: *Operations Research*, 38. Jg., 1990, Nr. 6, S. 1079-1088.
- ANDLER, K. (1929): Rationalisierung der Fabrikation und optimale Losgröße, München 1929.
- ARCADE, S. H. (1993): Single machine multi-product batch scheduling: Testing several solution methods, in: *Omega*, 21. Jg., 1993, Nr. 6, S. 709-711.
- AXSÄTER, S. (1987): An extension of the extended basic period approach for economic lot scheduling problems, in: *Journal of Optimization Theory and Applications*, 52. Jg., 1987, Nr. 2, S. 179-189.

- BAKER, K. R.; PYKE, D. F. (1990): Solution Procedures for the Lot-Streaming Problem, in: *Decision Sciences*, 21. Jg., 1990, Nr. 3, S. 475-491.
- BANERJEE, A. (2009): Simultaneous determination of multiproduct batch and full truckload shipment schedules, in: *International Journal of Production Economics*, 118. Jg., 2009, Nr. 1, S. 111-117.
- BANERJEE, A.; PYREDDY, V. R.; KIM, S. L. (1996): Investment policy for multiple product setup reduction under budgetary and capacity constraints, in: *International Journal of Production Economics*, 45. Jg., 1996, Nr. 1-3, S. 321-327.
- BEN-DAYA, M.; HARIGA, M. A. (2000): Economic lot scheduling problem with imperfect production processes, in: *Journal of the Operational Research Society*, 51. Jg., 2000, Nr. 7, S. 875-881.
- BLOECH, J.; BOGASCHEWSKY, R.; BUSCHER, U.; DAUB, A.; GÖTZE, U.; ROLAND, F. (2008): Einführung in die Produktion, 6. Auflage, Berlin, Heidelberg 2008.
- BOCTOR, F. F. (1982): The Two-Product, Single-Machine, Static Demand, Infinite Horizon Lot Scheduling Problem, in: *Management Science*, 28. Jg., 1982, Nr. 7, S. 798-807.
- BOCTOR, F. F. (1987): The G -group heuristic for single machine lot scheduling, in: *International Journal of Production Research*, 25. Jg., 1987, Nr. 3, S. 363-379.
- BOCTOR, F. F. (1988): A more efficient formulation of the single machine, static demand, lot scheduling problem, in: *Engineering Costs and Production Economics*, 14. Jg., 1988, Nr. 1, S. 3-10.
- BOGASCHEWSKY, R. (1996): Losgröße, in: KERN, W.; SCHRÖDER, H.-H.; WEBER, J. (Hrsg.), 1996, Sp. 1141-1158.
- BOGASCHEWSKY, R. (1998): Zentrale versus dezentrale Planung der Fertigungs- und Transportlosgröße, in: BOGASCHEWSKY, R.; GÖTZE, U. (Hrsg.), 1998, S. 287-306.
- BOGASCHEWSKY, R.; BUSCHER, U. (1999): Simultane Fertigungs- und Transportlosgrößenplanung – Ein statischer Ansatz für die Sortenfertigung, in: *WiSt – Wirtschaftswissenschaftliches Studium*, 28. Jg., 1999, Nr. 7, S. 335-341.

- BOGASCHEWSKY, R.; BUSCHER, U.; LINDNER, G. (1999): Simultanplanung von Fertigungslosgröße und Transportlosgrößen in einstufigen Fertigungssystemen – Zwei statisch deterministische Ansätze bei unrestringierten Kapazitäten, Arbeitsbericht des Lehrstuhls für Betriebswirtschaftslehre, insbesondere Produktionswirtschaft, Dresdner Beiträge zur Betriebswirtschaftslehre, Nr. 8/97, Dresden 1999.
- BOGASCHEWSKY, R.; BUSCHER, U.; LINDNER, G. (2000): Optimizing multi-stage production with constant lot size and varying number of unequal sized batches – Proof of convexity of total cost function, Arbeitsbericht des Lehrstuhls für Betriebswirtschaftslehre, insbesondere Produktionswirtschaft, Dresdner Beiträge zur Betriebswirtschaftslehre, Nr. 42/00, Dresden 2000.
- BOGASCHEWSKY, R.; GÖTZE, U. (1998): Unternehmensplanung und Controlling – Festschrift zum 60. Geburtstag von Jürgen Bloech, Heidelberg 1998.
- BOLLAPRAGADA, R.; RAO, U. (1999): Single-Stage Resource Allocation and Economic Lot Scheduling on Multiple, Nonidentical Production Lines, in: *Management Science*, 45. Jg., 1999, Nr. 6, S. 889-904.
- BOMBERGER, E. E. (1966): A Dynamic Programming Approach to a Lot Size Scheduling Problem, in: *Management Science*, 12. Jg., 1966, Nr. 11, S. 778-784.
- BOURLAND, K. E.; BROWN, M. J.; YANO, C. A. (1997): The product cycling problem under increasing yield rates, in: *IIE Transactions*, 29. Jg., 1997, Nr. 5, S. 417-422.
- BOURLAND, K. E.; YANO, C. A. (1997): A comparison of solution approaches for the fixed-sequence economic lot scheduling problem, in: *IIE Transactions*, 29. Jg., 1997, Nr. 2, S. 103-108.
- BRANDER, P.; FORSBERG, R. (2005): Cyclic lot scheduling with sequence-dependent setups: a heuristic for disassembly processes, in: *International Journal of Production Research*, 43. Jg., 2005, Nr. 2, S. 295-310.
- BRANDER, P.; FORSBERG, R. (2006): Determination of safety stocks for cyclic schedules with stochastic demands, in: *International Journal of Production Economics*, 104. Jg., 2006, Nr. 2, S. 271-295.
- BRANDER, P.; LEVÉN, E.; SEGERSTEDT, A. (2005): Lot sizes in a capacity constrained facility – a simulation study of stationary stochastic demand, in: *International Journal of Production Economics*, 93-94. Jg., 2005, S. 375-386.

- BRANDER, P.; SEGERSTEDT, A. (2009): Economic lot scheduling problems incorporating a cost of using the production facility, in: *International Journal of Production Research*, 47. Jg., 2009, Nr. 13, S. 3611-3624.
- BULUT, O.; TASGETIREN, M. F.; FADILUOLU, M. M. (2012): A Genetic Algorithm for the Economic Lot Scheduling Problem under Extended Basic Period Approach and Power-of-Two Policy, in: HUANG, D. S.; GAN, Y.; GUPTA, P.; GROMIHA, M. M. (Hrsg.), 2012, S. 57-65.
- BUSCHER, U. (2000): Losssplitting in der Lossequenzplanung, in: *WISU – Das Wirtschaftsstudium*, 29. Jg., 2000, Nr. 2, S. 197-204.
- BUSCHER, U.; LINDNER, G. (2000a): Berücksichtigung von Transportvorgängen im Common-Cycle-Modell, Faculty of Economics and Management Magdeburg (FEMM) Working Paper, Nr. 18/2000, Magdeburg 2000.
- BUSCHER, U.; LINDNER, G. (2000b): Planung der Fertigungslosgröße bei Berücksichtigung unterschiedlich großer Transportlose, in: *WiSt – Wirtschaftswissenschaftliches Studium*, 29. Jg., 2000, Nr. 11, S. 610-615.
- BUSCHER, U.; LINDNER, G. (2001): Berücksichtigung von Transportvorgängen im Common-Cycle-Modell, in: FLEISCHMANN, B.; LASCH, R.; DERIGS, U.; DOMSCHKE, W.; RIEDER, U. (Hrsg.), 2001, S. 290-294.
- BUSCHER, U.; SHEN, L. (2009): Überlappende Fertigung in der Maschinenbelegungsplanung, in: MIEKE, C.; BEHRENS, S. (Hrsg.), 2009, S. 27-48.
- CARRENO, J. J. (1990): Economic Lot Scheduling for Multiple Products on Parallel Identical Processors, in: *Management Science*, 36. Jg., 1990, Nr. 3, S. 348-358.
- CARSTENSEN, P. (1999): Das Economic Lot Scheduling Problem - Überblick und LP-basiertes Verfahren, in: *OR Spectrum*, 21. Jg., 1999, Nr. 4, S. 429-460.
- CARSTENSEN, P. (2002): Simultane Losgrößen- und Reihenfolgeplanung bei konstantem Nachfrageverlauf, 1. Auflage, Wiesbaden 2002.
- CASAS-LIZA, J.; PINTO, J. M.; PAPAGEORGIOU, L. G. (2005): Mixed Integer Optimization for Cyclic Scheduling of Multiproduct Plants Under Exponential Performance Decay, in: *Chemical Engineering Research and Design*, 83. Jg., 2005, Nr. 10, S. 1208-1217.

- CHAMPION, B.; STRZEBONSKI, A. (2008): Wolfram Mathematica tutorial collection – Constrained Optimization, Champaign (Illinois) 2008.
- CHAN, G. H.; SONG, Y. (2001): Rotation cycle schedulings for multi-item production systems, in: *European Journal of Operational Research*, 135. Jg., 2001, Nr. 2, S. 361-372.
- CHAN, H. K.; CHUNG, S. H.; LIM, M. K. (2013): Recent research trend of economic-lot scheduling problems, in: *Journal of Manufacturing Technology Management*, 24. Jg., 2013, Nr. 3, S. 465-482.
- CHANDRASEKARAN, C.; RAJENDRAN, C.; KRISHNAIAH CHETTY, O. V.; HANUMANNA, D. (2007): Metaheuristics for solving economic lot scheduling problems (ELSP) using time-varying lot-sizes approach, in: *European Journal of Industrial Engineering*, 1. Jg., 2007, Nr. 2, S. 152-181.
- CHANDRASEKARAN, C.; RAJENDRAN, C.; KRISHNAIAH CHETTY, O. V.; HANUMANNA, D. (2009): A two-phase metaheuristic approach for solving Economic Lot Scheduling Problems, in: *International Journal of Operational Research*, 4. Jg., 2009, Nr. 3, S. 296-322.
- CHANG, J. H.; CHIU, H. N. (2005): A comprehensive review of lot streaming, in: *International Journal of Production Research*, 43. Jg., 2005, Nr. 8, S. 1515-1536.
- CHANG, P. T.; YAO, M. J.; HUANG, S. F.; CHEN, C. T. (2006): A genetic algorithm for solving a fuzzy economic lot-size scheduling problem, in: *International Journal of Production Economics*, 102. Jg., 2006, Nr. 2, S. 265-288.
- CHANG, Y. J.; YAO, M. J. (2008): Solving the economic lot scheduling problem with identical facilities in parallel using genetic algorithms, in: *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, 25. Jg., 2008, Nr. 2, S. 91-104.
- CHANG, Y. J.; YAO, M. J. (2009): A genetic algorithm for solving the economic lot scheduling problem with reworks, in: *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, 26. Jg., 2009, Nr. 5, S. 411-425.
- CHATFIELD, D. C. (2007): The economic lot scheduling problem: A pure genetic search approach, in: *Computers & Operations Research*, 34. Jg., 2007, Nr. 10, S. 2865-2881.

- CHENG, F.; YAN, H.; YANG, J. (1998): Production Scheduling of continuous Flow Lines: multiple Products with Setup Times and Costs, in: *Production and Operations Management*, 7. Jg., 1998, Nr. 4, S. 387-401.
- CHOI, S.; NOBLE, J. S. (2000): An integrated material flow system approach for determining the economic production quantity (EPQ), in: *International Journal of Production Research*, 38. Jg., 2000, Nr. 15, S. 3485-3511.
- CHOWDHURY, M. R.; SARKER, B. R. (2001): Manufacturing batch size and ordering policy for products with shelf lives, in: *International Journal of Production Research*, 39. Jg., 2001, Nr. 7, S. 1405-1426.
- CHUNG, S. H.; CHAN, H. K. (2012): A Two-Level Genetic Algorithm to Determine Production Frequencies for Economic Lot Scheduling Problem, in: *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59. Jg., 2012, Nr. 1, S. 611-619.
- CLARK, A.; ALMADA-LOBO, B.; ALMEDER, C. (2011): Lot sizing and scheduling: industrial extensions and research opportunities, in: *International Journal of Production Research*, 49. Jg., 2011, Nr. 9, S. 2457-2461.
- CLAUSEN, J.; JU, S. (2006): A hybrid algorithm for solving the economic lot and delivery scheduling problem in the common cycle case, in: *European Journal of Operational Research*, 175. Jg., 2006, Nr. 2, S. 1141-1150.
- COOKE, D. L.; ROHLEDER, T. R.; SILVER, E. A. (2004): Finding effective schedules for the economic lot scheduling problem: A simple mixed integer programming approach, in: *International Journal of Production Research*, 42. Jg., 2004, Nr. 1, S. 21-36.
- DANGELMAIER, W. (2009): Theorie der Produktionsplanung und -steuerung – Im Sommer keine Kirschpralinen?, Dordrecht, New York 2009.
- DARWISH, M. A. (2008): Joint determination of order quantity and reorder point of continuous review model under quantity and freight rate discounts, in: *Computers & Operations Research*, 35. Jg., 2008, Nr. 12, S. 3902-3917.
- DAVIS, S. G. (1990): Scheduling economic lot size production runs, in: *Management Science*, 36. Jg., 1990, Nr. 8, S. 985-998.
- DAVIS, S. G. (1995): An improved algorithm for solving the economic lot size problem (ELSP), in: *International Journal of Production Research*, 33. Jg., 1995, Nr. 4, S. 1007-1026.

- DELPORTE, C. M.; THOMAS, L. J. (1977): Lot Sizing and Sequencing for N Products on One Facility, in: *Management Science*, 23. Jg., 1977, Nr. 10, S. 1070-1079.
- DICKERSBACH, J. T. (2006): Supply chain management with APO – Structures, modelling approaches, and implementation of mySAP SCM 4.1, 2. Auflage, Berlin, New York 2006.
- DOBSON, G. (1987): The Economic Lot-Scheduling Problem: Achieving Feasibility Using Time-Varying Lot Sizes, in: *Operations Research*, 35. Jg., 1987, Nr. 5, S. 764-771.
- DOBSON, G. (1992): The Cyclic Lot Scheduling Problem with Sequence-Dependent Setups, in: *Operations Research*, 40. Jg., 1992, Nr. 4, S. 736-749.
- DOLL, C. L.; WHYBARK, D. C. (1973): An Iterative Procedure for the Single-Machine Multi-Product Lot Scheduling Problem, in: *Management Science*, 20. Jg., 1973, Nr. 1, S. 50-55.
- DOMSCHKE, W.; SCHOLL, A. (2005): Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre – Eine Einführung aus entscheidungsorientierter Sicht, 3. Auflage, Berlin, Heidelberg 2005.
- DOMSCHKE, W.; SCHOLL, A.; VOB, S. (1997): Produktionsplanung – Ablauforganisatorische Aspekte, 2. Auflage, Berlin, Heidelberg 1997.
- DREXL, A. (1994): Konzeptionelle Grundlagen kapazitätsorientierter PPS-Systeme, in: *zfbf – Schmalenbachs Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung*, 46. Jg., 1994, Nr. 12, S. 1022-1045.
- DREXL, A.; HAASE, K. (1995): Proportional lotsizing and scheduling, in: *International Journal of Production Economics*, 40. Jg., 1995, Nr. 1, S. 73-87.
- DREXL, A.; KIMMS, A. (1997): Lot sizing and scheduling – Survey and extensions, in: *European Journal of Operational Research*, 99. Jg., 1997, Nr. 2, S. 221-235.
- EILON, S. (1957): Scheduling for batch production, in: *Institution of Production Engineers Journal*, 36. Jg., 1957, Nr. 9, S. 549-570.
- EILON, S. (1962): Elements of production planning and control, New York 1962.
- EILON, S. (1985): Multi-product batch production on a single machine – A problem revisited, in: *Omega*, 13. Jg., 1985, Nr. 5, S. 453-468.

- ELHAFSI, M.; BAI, S. X. (1997): The Common Cycle Economic Lot Scheduling Problem with Backorders: Benefits of Controllable Production Rates, in: *Journal of Global Optimization*, 10. Jg., 1997, Nr. 3, S. 283-303.
- ELMAGHRABY, S. E. (1978a): An Extended Basic Period Approach to the Economic Lot Scheduling Problem (ELSP), in: MURAMATSU, R.; DUDLEY, N. A. (Hrsg.), 1978, S. 649-662.
- ELMAGHRABY, S. E. (1978b): The Economic Lot Scheduling Problem (ELSP): Review and Extensions, in: *Management Science*, 24. Jg., 1978, Nr. 6, S. 587-598.
- EL-NAJDAMI, M. K. (1994): A job-splitting heuristic for lot-size scheduling in multi-stage, multi-product production processes, in: *European Journal of Operational Research*, 75. Jg., 1994, Nr. 2, S. 365-377.
- EL-NAJDAMI, M. K.; KLEINDORFER, P. R. (1993): Common Cycle Lot-size Scheduling for Multi-product, Multi-stage Production, in: *Management Science*, 39. Jg., 1993, Nr. 7, S. 872-885.
- EPPEN, G. D.; MARTIN, R. K. (1987): Solving multi-item capacitated lot-sizing problems using variable redefinition, in: *Operations research: the journal of the Operations Research Society of America*, 35. Jg., 1987, Nr. 6, S. 832-848.
- EYNAN, A. (2003): The Benefits of Flexible Production Rates in the Economic Lot Scheduling Problem, in: *IIE Transactions*, 35. Jg., 2003, Nr. 11, S. 1057-1064.
- FAALAND, B. H.; SCHMITT, T. G.; AREOLA-RISA, A. (2004): Economic lot scheduling with lost sales and setup times, in: *IIE Transactions*, 36. Jg., 2004, Nr. 7, S. 629-640.
- FEDERGRUEN, A.; KATALAN, Z. (1998): Determining Production Schedules Under Base-Stock Policies in Single Facility Multi-Item Production Systems, in: *Operations Research*, 46. Jg., 1998, Nr. 6, S. 883-898.
- FEIGE, D.; KLAUS, P. (2008): Modellbasierte Entscheidungsunterstützung in der Logistik, Hamburg 2008.
- FELDMANN, M. (2005): „Losüberlappung“ – Verfahren zur Effektivitätssteigerung in der operativen Produktionsplanung, Berlin 2005.
- FINK, A.; ROTHLAUF, F. (2008): Advances in computational intelligence in transport, logistics, and supply chain management, Berlin, Heidelberg 2008.

- FLEISCHMANN, B. (1990): The discrete lot-sizing and scheduling problem, in: *European Journal of Operational Research*, 44. Jg., 1990, Nr. 3, S. 337-348.
- FLEISCHMANN, B.; BORGWARDT, K. H.; KLEIN, R.; TUMA, A. (2009): Operations Research Proceedings 2008 – Selected papers of the annual international conference of the German Operations Research Society (GOR), Berlin, Heidelberg 2009.
- FLEISCHMANN, B.; LASCH, R.; DERIGS, U.; DOMSCHKE, W.; RIEDER, U. (2001): Operations Research Proceedings 2000 – Selected papers of the Symposium on Operations Research, Dresden, September 9-12, 2000, Berlin, Heidelberg, New York 2001.
- FLEISCHMANN, B.; MEYR, H. (1997): The general lotsizing and scheduling problem, in: *OR Spectrum*, 19. Jg., 1997, Nr. 1, S. 11-21.
- FORSTER, O. (2011): Analysis 2, 9. Auflage, Wiesbaden 2011.
- FUJITA, S. (1978): The Application of Marginal Analysis to the Economic Lot Scheduling Problem, in: *AIIE Transactions*, 10. Jg., 1978, Nr. 4, S. 354-361.
- GALLEGO, G. (1990): An Extension to the Class of Easy Economic Lot Scheduling Problems, in: *IIE Transactions*, 22. Jg., 1990, Nr. 2, S. 189-190.
- GALLEGO, G. (1993): Reduced production rates in the economic lot scheduling problem, in: *International Journal of Production Research*, 31. Jg., 1993, Nr. 5, S. 1035-1046.
- GALLEGO, G.; MOON, I. (1992): The Effect of Externalizing Setups in the Economic Lot Scheduling Problem, in: *Operations Research*, 40. Jg., 1992, Nr. 3, S. 614-619.
- GALLEGO, G.; ROUNDY, R. (1992): The economic lot scheduling problem with finite backorder costs, in: *Naval Research Logistics*, 39. Jg., 1992, Nr. 5, S. 729-739.
- GALLEGO, G.; SHAW, D. X. (1997): Complexity of the ELSP with general cyclic schedules, in: *IIE Transactions*, 29. Jg., 1997, Nr. 2, S. 109-113.
- GALVIN, T. M. (1987): Simulating The Economic Lot Scheduling Problem: Part I. Model Description, in: *Production and Inventory Management Journal*, 28. Jg., 1987, Nr. 4, S. 32-38.
- GALVIN, T. M. (1988): Simulating The Economic Lot Scheduling Problem: Part II. Experimental Results, in: *Production and Inventory Management Journal*, 29. Jg., 1988, Nr. 1, S. 11-15.

- GENG, P. C.; VICKSON, R. G. (1988): Two heuristics for the economic lot scheduling problem: An experimental study, in: *Naval Research Logistics*, 35. Jg., 1988, Nr. 4, S. 605-617.
- GICQUEL, C.; MIÈGEVILLE, N.; MINOUX, M.; DALLERY, Y. (2009): Discrete lot sizing and scheduling using product decomposition into attributes, in: *Computers & Operations Research*, 36. Jg., 2009, Nr. 9, S. 2690-2698.
- GIRI, B. C.; MOON, I. (2004a): Accounting for idle capacity cost in the scheduling of economic lot sizes, in: *International Journal of Production Research*, 42. Jg., 2004, Nr. 4, S. 677-691.
- GIRI, B. C.; MOON, I. (2004b): Note on an economic lot scheduling problem under budgetary and capacity constraints, in: *International Journal of Production Economics*, 91. Jg., 2004, Nr. 3, S. 229-234.
- GIRI, B. C.; MOON, I.; YUN, W. Y. (2003): Scheduling economic lot sizes in deteriorating production systems, in: *Naval Research Logistics*, 50. Jg., 2003, Nr. 6, S. 650-661.
- GLASER, H.; GEIGER, W.; ROHDE, V. (1992): PPS - Produktionsplanung und -steuerung – Grundlagen, Konzepte, Anwendungen, 2. Auflage, Wiesbaden 1992.
- GLOCK, C. H. (2014): Produktion und Supply Chain Management – Eine Einführung, Würzburg 2014.
- GLOCK, C. H.; GROSSE, E. H.; RIES, J. M. (2014): The lotsizing problem: A tertiary study, in: *International Journal of Production Economics*, 155. Jg., 2014, S. 39-51.
- GONÇALVES, J. F.; LEACHMAN, R. C. (1998): A hybrid heuristic and linear programming approach to multi-product machine scheduling, in: *European Journal of Operational Research*, 110. Jg., 1998, Nr. 3, S. 548-563.
- GONÇALVES, J. F.; SOUSA, P. S. A. (2011): A genetic algorithm for lot sizing and scheduling under capacity constraints and allowing backorders, in: *International Journal of Production Research*, 49. Jg., 2011, Nr. 9, S. 2683-2703.
- GOYAL, S. K. (1973): Scheduling a Multi-Product Single Machine System, in: *Operational Research Quarterly*, 24. Jg., 1973, Nr. 2, S. 261-269.

- GOYAL, S. K. (1975a): Scheduling a multi-product single machine system – A new approach, in: *International Journal of Production Research*, 13. Jg., 1975, Nr. 5, S. 487-493.
- GOYAL, S. K. (1975b): Scheduling a Single Machine System: A Multi-Product Multi-Item Case, in: *Operational Research Quarterly*, 26. Jg., 1975, Nr. 3 (2), S. 619-625.
- GOYAL, S. K. (1976): Note on "Manufacturing Cycle Time Determination for a Multi-Stage Economic Production Quantity Model", in: *Management Science*, 23. Jg., 1976, Nr. 3, S. 332-333.
- GOYAL, S. K. (1977): Determination of Optimum Production Quantity for a Two-Stage Production System, in: *Journal of the Operational Research Society*, 28. Jg., 1977, Nr. 4, S. 865-870.
- GOYAL, S. K. (1978): Economic batch quantity in a multi-stage production system, in: *International Journal of Production Research*, 16. Jg., 1978, Nr. 4, S. 267.
- GOYAL, S. K. (1979): An Alternative Approach for Determining Economic Production Quantity in a Two-Stage Production System – A Rejoinder, in: *Journal of the Operational Research Society*, 30. Jg., 1979, Nr. 2, S. 177-179.
- GOYAL, S. K. (1997): Observation on the economic lot scheduling problem: Theory and practice, in: *International Journal of Production Economics*, 50. Jg., 1997, Nr. 1, S. 61.
- GOYAL, S. K. (2007): Observation on: A genetic algorithm for solving a fuzzy economic lot-size scheduling problem, in: *International Journal of Production Economics*, 105. Jg., 2007, Nr. 2, S. 608.
- GOYAL, S. K.; SZENDROVITS, A. Z. (1986): A constant lot size model with equal and unequal sized batch shipments between production stages, in: *Engineering Costs and Production Economics*, 10. Jg., 1986, Nr. 3, S. 203-210.
- GRAVES, S. C. (1979): On the Deterministic Demand Multi-Product Single-Machine Lot Scheduling Problem, in: *Management Science*, 25. Jg., 1979, Nr. 3, S. 276-280.
- GRZGAR, J.; RIGGLE, C. (1997): An optimal algorithm for the basic period approach to the economic lot scheduling problem, in: *Omega*, 25. Jg., 1997, Nr. 3, S. 355-364.

- HAASE, K. (1994): Lotsizing and scheduling for production planning, Berlin, Heidelberg 1994.
- HAESSLER, R. W. (1971): A Note on Scheduling a Multi-Product Single Machine System for an Infinite Planning Period, in: *Management Science*, 18. Jg., 1971, Nr. 4 (1), S. 240-241.
- HAESSLER, R. W. (1979): An Improved Extended Basic Period Procedure for Solving the Economic Lot Scheduling Problem, in: *A I I E Transactions*, 11. Jg., 1979, Nr. 4, S. 336-340.
- HAESSLER, R. W.; HOGUE, S. L. (1976): A Note on the Single-Machine Multi-Product Lot Scheduling Problem, in: *Management Science*, 22. Jg., 1976, Nr. 8, S. 909-912.
- HAHM, J.; YANO, C. A. (1995a): The economic lot and delivery scheduling problem: the common cycle case, in: *IIE Transactions*, 27. Jg., 1995, Nr. 2, S. 113-125.
- HAHM, J.; YANO, C. A. (1995b): The economic lot and delivery scheduling problem: models for nested schedules, in: *IIE Transactions*, 27. Jg., 1995, Nr. 2, S. 126-139.
- HAHM, J.; YANO, C. A. (1995c): The economic lot and delivery scheduling problem: powers of two policies, in: *Transportation Science*, 29. Jg., 1995, Nr. 3, S. 222-241.
- HAJI, R.; HAJI, A.; SAJADIFAR, M.; ZOLFAGHARI, S. (2008): Lot sizing with non-zero setup times for rework, in: *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 17. Jg., 2008, Nr. 2, S. 230-240.
- HAKSÖZ, Ç.; PINEDO, M. (2011): Economic lot scheduling with resources in parallel, in: *International Journal of Production Research*, 49. Jg., 2011, Nr. 9, S. 2625-2641.
- HANSSMANN, F. (1962): Operations research in production and inventory control, New York, London 1962.
- HAUTH, M.; SCHNEEWEIB, C. (1997): Kapazitätsanpassung bei simultaner Losgrößen- und Reihenfolgeplanung, in: *OR Spectrum*, 19. Jg., 1997, Nr. 4, S. 251-260.
- HENNET, J. C. (2001): A common cycle approach to lot-scheduling in multistage manufacturing systems, in: *Production Planning & Control*, 12. Jg., 2001, Nr. 4, S. 362-371.

- HEYDARI, M.; KARIMI, B.; TORABI, S. A. (2009): The Economic Lot Scheduling Problem in Flow Lines with Sequence-Dependent Setups, in: *International Journal of Industrial Engineering and Production Research*, 20. Jg., 2009, Nr. 1 & 2, S. 1-10.
- HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. (2010): Introduction to operations research, 9. Auflage, New York 2010.
- HO, W.-T.; LAI, S.-F.; HUANG, Y.-K. (2013): An Optimal Mixed Batch Shipment Policy for Multiple Items in a Single-Supplier Multiple-Retailer Integrated System, in: *Journal of Optimization Theory and Applications*, 160. Jg., 2013, Nr. 2, S. 636-658.
- HO, W.-T.; TSENG, Y.-C.; HSIAO, Y.-C. (2015): The economic lot-size scheduling problem with equally sized batch shipment policy and stochastic demands, in: *European Journal of Industrial Engineering*, 9. Jg., 2015, Nr. 2, S. 195-221.
- HOCKSTRA, D. J. (1997): Simple policies in the economic lot scheduling problem with zero setup costs, in: *Production Planning & Control*, 8. Jg., 1997, Nr. 1, S. 25-30.
- HOQUE, M. A.; KINGSMAN, B. G. (1995): An optimal solution algorithm for the constant lot-size model with equal and unequal sized batch shipments for the single product multi-stage production system, in: *International Journal of Production Economics*, 42. Jg., 1995, Nr. 2, S. 161-174.
- HOQUE, M. A.; KINGSMAN, B. G. (2006): Synchronization in common cycle lot size scheduling for a multi-product serial supply chain, in: *International Journal of Production Economics*, 103. Jg., 2006, Nr. 1, S. 316-331.
- HSU, W. L. (1983): On the General Feasibility Test of Scheduling Lot Sizes for Several Products on One Machine, in: *Management Science*, 29. Jg., 1983, Nr. 1, S. 93-105.
- HUANG, D. S.; GAN, Y.; GUPTA, P.; GROMIHA, M. M. (2012): Advanced Intelligent Computing Theories and Applications – With Aspects of Artificial Intelligence, Berlin, Heidelberg 2012.
- HUANG, J. Y.; YAO, M. J. (2006): An improved heuristic for solving the economic lot scheduling problem in flow shops under power-of-two policy, in: *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, 23. Jg., 2006, Nr. 2, S. 127-140.

- HUANG, J. Y.; YAO, M. J. (2007): A new algorithm for determining production schedules when solving the multi-product economic lot sizing problem in flow shops, in: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 33. Jg., 2007, Nr. 5-6, S. 560-578.
- HUANG, J. Y.; YAO, M. J. (2008): A genetic algorithm for solving the economic lot scheduling problem in flow shops, in: *International Journal of Production Research*, 46. Jg., 2008, Nr. 14, S. 3737-3761.
- HUANG, J. Y.; YAO, M. J. (2012): On the optimal lot-sizing and scheduling problem in serial-type supply chain system using a time-varying lot-sizing policy, in: *International Journal of Production Research*, 2012, S. 1-16.
- HWANG, H.; KIM, D. B.; KIM, Y. D. (1993): Multiproduct economic lot size models with investment costs for setup reduction and quality improvement, in: *International Journal of Production Research*, 31. Jg., 1993, Nr. 3, S. 691-703.
- JENABI, M.; FATEMI GHOMI, S. M. T.; TORABI, S. A.; KARIMI, B. (2007): Two hybrid meta-heuristics for the finite horizon ELSP in flexible flow lines with unrelated parallel machines, in: *Applied Mathematics and Computation*, 186. Jg., 2007, Nr. 1, S. 230-245.
- JENSEN, M. T.; KHOUJA, M. (2004): An optimal polynomial time algorithm for the common cycle economic lot and delivery scheduling problem, in: *European Journal of Operational Research*, 156. Jg., 2004, Nr. 2, S. 305-311.
- JODLBAUER, H.; REITNER, S. (2011): Was macht eine gute Planung aus? – Ergebnisse einer empirischen Umfrage in Produktionsunternehmen, in: *Productivity Management*, 16. Jg., 2011, Nr.4, S. 23-25.
- JODLBAUER, H.; REITNER, S. (2012): Optimizing service-level and relevant cost for a stochastic multi-item cyclic production system, in: *International Journal of Production Economics*, 136. Jg., 2012, Nr. 2, S. 306-317.
- JONES, P. C.; INMAN, R. R. (1989): When Is The Economic Lot Scheduling Problem Easy?, in: *IIE Transactions*, 21. Jg., 1989, Nr. 1, S. 11-20.
- KARALLI, S. M.; FLOWERS, A. D. (2006): The Multiple-Family ELSP with Safety Stocks, in: *Operations Research*, 54. Jg., 2006, Nr. 3, S. 523-531.

- KARMAKAR, U. S.; SCHRAGE, L. (1985): The Deterministic Dynamic Product Cycling Problem, in: *Operations Research*, 33. Jg., 1985, Nr. 2, S. 326-345.
- KAYVANFAR, V.; ZANDIEH, M. (2012): The economic lot scheduling problem with deteriorating items and shortage: an imperialist competitive algorithm, in: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 62. Jg., 2012, Nr. 5, S. 759-773.
- KERN, W.; SCHRÖDER, H.-H.; WEBER, J. (1996): Handwörterbuch der Produktionswirtschaft, 2. Auflage, Stuttgart 1996.
- KHOUJA, M. (1997): The scheduling of economic lot sizes on volume flexible production systems, in: *International Journal of Production Economics*, 48. Jg., 1997, Nr. 1, S. 73-86.
- KHOUJA, M. (1999): A note on 'deliberately slowing down output in a family production context', in: *International Journal of Production Research*, 37. Jg., 1999, Nr. 17, S. 4067-4077.
- KHOUJA, M. (2000): The economic lot and delivery scheduling problem: common cycle, rework, and variable production rate, in: *IIE Transactions*, 32. Jg., 2000, Nr. 8, S. 715-725.
- KHOUJA, M.; MICHALEWICZ, Z.; WILMOT, M. (1998): The use of genetic algorithms to solve the economic lot size scheduling problem, in: *European Journal of Operational Research*, 110. Jg., 1998, Nr. 3, S. 509-524.
- KHOURY, B. N.; ABOUD, N. E.; TANNOUS, M. M. (2001): The common cycle approach to the ELSP problem with insufficient capacity, in: *International Journal of Production Economics*, 73. Jg., 2001, Nr. 2, S. 189-199.
- KUHN, H.; LISKE, T. (2011): Simultaneous supply and production planning, in: *International Journal of Production Research*, 49. Jg., 2011, Nr. 13, S. 3795-3813.
- LARRAÑETA, J.; ONIEVA, L. (1988): The Economic Lot-Scheduling Problem: A Simple Approach, in: *Journal of the Operational Research Society*, 39. Jg., 1988, Nr. 4, S. 373-379.
- LASDON, L. S.; TERJUNG, R. C. (1971): An efficient algorithm for multi-item scheduling, in: *Operations research: the journal of the Operations Research Society of America*, 19. Jg., 1971, Nr. 4, S. 946-969.

- LEVÉN, E.; SEGERSTEDT, A. (2007): A scheduling policy for adjusting economic lot quantities to a feasible solution, in: *European Journal of Operational Research*, 179. Jg., 2007, Nr. 2, S. 414-423.
- LIN, G. C.; KROLL, D. E.; LIN, C. J. (2006): Determining a common production cycle time for an economic lot scheduling problem with deteriorating items, in: *European Journal of Operational Research*, 173. Jg., 2006, Nr. 2, S. 669-682.
- LINDNER, G. (2001): Simultanplanung von Fertigungs- und Transportlosgrößen – Ein Common Cycle Ansatz bei unterschiedlichen Transportlosgrößen, Faculty of Economics and Management Magdeburg (FEMM) Working Paper, Nr. 18/2000, Magdeburg 2001.
- LISKE, T.; KUHN, H. (2009): The Economic Lot and Supply Scheduling Problem Under a Power-of-Two Policy, in: FLEISCHMANN, B.; BORGWARDT, K. H.; KLEIN, R.; TUMA, A. (Hrsg.), 2009, S. 215-220.
- LIU, J.; WU, L.; ZHOU, Z. (2008): A time-varying lot size method for the economic lot scheduling problem with shelf life considerations, in: *European Journal of Industrial Engineering*, 2. Jg., 2008, Nr. 3, S. 337-355.
- MADIGAN, J. G. (1968): Scheduling a Multi-Product Single Machine System for an Infinite Planning Period, in: *Management Science*, 14. Jg., 1968, Nr. 11, S. 713-719.
- MAGEE, J. F. (1958): *Production Planning and Inventory Control*, New York 1958.
- MALLYA, R. (1992): Multi-product scheduling on a single machine: A case study, in: *Omega*, 20. Jg., 1992, Nr. 4, S. 529-534.
- MARKOWITZ, D. M.; REIMAN, M. I.; WEIN, L. M. (2000): The Stochastic Economic Lot Scheduling Problem: Heavy Traffic Analysis of Dynamic Cyclic Policies, in: *Operations Research*, 48. Jg., 2000, Nr. 1, S. 136-154.
- MATTHEWS, J. P. (1988): The Optimality of the 'Zero-Switch' Rule for a Class of Economic Lot-Scheduling Problems, in: *Journal of the Operational Research Society*, 39. Jg., 1988, Nr. 12, S. 1155-1161.
- MAXWELL, W. L. (1964): The scheduling of economic lot sizes, in: *Naval Research Logistics Quarterly*, 11. Jg., 1964, Nr. 2, S. 89-124.

- MAXWELL, W. L.; SINGH, H. (1983): The Effect of Restricting Cycle Times in the Economic Lot Scheduling Problem, in: *IIE Transactions*, 15. Jg., 1983, Nr. 3, S. 235-241.
- MAYR, M. (1996): Hierarchische Produktionsplanung mit zyklischen Auflagemustern, Regensburg 1996.
- MIEKE, C.; BEHRENS, S. (2009): Entwicklungen in Produktionswissenschaft und Technologieforschung – Festschrift für Professor Dieter Specht, Berlin 2009.
- MOKHLESIAN, M.; FATEMI GHOMI, S. M. T.; JOLAI, F. (2010): Economic lot scheduling problem with consideration of money time value, in: *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 1. Jg., 2010, Nr. 2, S. 121-138.
- MOON, D. H.; CHRISTY, D. P. (1998): Determination of optimal production rates on a single facility with dependent mold lifespan, in: *International Journal of Production Economics*, 54. Jg., 1998, Nr. 1, S. 29-40.
- MOON, I. (1994): Multiproduct economic lot size models with investment costs for setup reduction and quality improvement: review and extensions, in: *International Journal of Production Research*, 32. Jg., 1994, Nr. 12, S. 2795-2801.
- MOON, I.; CHA, B. C.; BAE, H. C. (2006): Hybrid genetic algorithm for group technology economic lot scheduling problem, in: *International Journal of Production Research*, 44. Jg., 2006, Nr. 21, S. 4551-4568.
- MOON, I.; GALLEGO, G.; SIMCHI-LEVI, D. (1991): Controllable production rates in a family production context, in: *International Journal of Production Research*, 29. Jg., 1991, Nr. 12, S. 2459-2470.
- MOON, I.; GIRI, B. C.; CHOI, K. (2002): Economic lot scheduling problem with imperfect production processes and setup times, in: *Journal of the Operational Research Society*, 53. Jg., 2002, Nr. 6, S. 620-629.
- MOON, I.; HAHM, J.; LEE, C. (1998): The effect of the stabilization period on the economic lot scheduling problem, in: *IIE Transactions*, 30. Jg., 1998, Nr. 11, S. 1009-1017.
- MOON, I.; SILVER, E. A.; CHOI, S. (2002): Hybrid genetic algorithm for the economic lot-scheduling problem, in: *International Journal of Production Research*, 40. Jg., 2002, Nr. 4, S. 809-824.

- MÜLLER-MERBACH, H. (1962): Die Bestimmung optimaler Losgrößen bei Mehrproduktfertigung – Die Modifizierung optimaler Einzellosgrößen in Mehrproduktbetrieben mit Hilfe operationsanalytischer Methoden, Darmstadt 1962.
- MÜLLER-MERBACH, H. (1981): Heuristics and their design: a survey, in: *European Journal of Operational Research*, 8. Jg., 1981, Nr. 1, S. 1-23.
- MURAMATSU, R.; DUDLEY, N. A. (1978): Production and industrial systems – Future development and the role of industrial and production engineering: Proceedings of the Fourth International Conference on Production Research held at Tokyo, Japan, 22-30 August, 1977, London 1978.
- NARRO LOPEZ, M. A.; KINGSMAN, B. G. (1991): The economic lot scheduling problem: theory and practice, in: *International Journal of Production Economics*, 23. Jg., 1991, Nr. 1-3, S. 147-164.
- NILSSON, K.; SEGERSTEDT, A. (2008): Corrections of costs to feasible solutions of economic lot scheduling problems, in: *Computers & Industrial Engineering*, 54. Jg., 2008, Nr. 1, S. 155-168.
- OBERMAIER, R. (2012): German inventory to sales ratios 1971-2005 – An empirical analysis of business practice, in: *International Journal of Production Economics*, 135. Jg., 2012, Nr. 2, S. 964-976.
- OH, H. C.; KARIMI, I. A. (2001): Planning production on a single processor with sequence-dependent setups. Part 2: campaign sequencing and scheduling, in: *Computers & Chemical Engineering*, 25. Jg., 2001, Nr. 7-8, S. 1031-1043.
- ÖNER, S.; BILGIÇ, T. (2008): Economic lot scheduling with uncontrolled co-production, in: *European Journal of Operational Research*, 188. Jg., 2008, Nr. 3, S. 793-810.
- OSMAN, H.; DEMIRLI, K. (2012): Economic lot and delivery scheduling problem for multi-stage supply chains, in: *International Journal of Production Economics*, 136. Jg., 2012, Nr. 2, S. 275-286.
- OUENNICHE, J.; BOCTOR, F. F. (2001a): The multi-product, economic lot-sizing problem in flow shops: the powers-of-two heuristic, in: *Computers & Operations Research*, 28. Jg., 2001, Nr. 12, S. 1165-1182.

- OUENNICHE, J.; BOCTOR, F. F. (2001b): The two-group heuristic to solve the multi-product, economic lot sizing and scheduling problem in flow shops, in: *European Journal of Operational Research*, 129. Jg., 2001, Nr. 3, S. 539-554.
- PARK, K. S.; YUN, D. K. (1984): A Stepwise partial enumeration algorithm for the economic lot scheduling problem, in: *IIE Transactions*, 16. Jg., 1984, Nr. 4, S. 363-370.
- PATTLOCH, M. (1999): Simultane Losgrößen- und Ablaufplanung auf parallelen Maschinen – Theoretische Ansätze und experimentelle Ergebnisse, Saarbrücken 1999.
- PESENTI, R.; UKOVICH, W. (2003): Economic lot scheduling on multiple production lines with resource constraints, in: *International Journal of Production Economics*, 81-82. Jg., 2003, S. 469-481.
- PHILIPOOM, P. R.; REES, L. P.; TAYLOR, B. W. (1989): Solving the Economic Lot-Scheduling Problem Using the Method of Prime Subperiods, in: *Decision Sciences*, 20. Jg., 1989, Nr. 4, S. 794-809.
- PINEDO, M. (2009): Planning and scheduling in manufacturing and services, 2. Auflage, New York 2009.
- PIÑEYRO, P.; VIERA, O. (2010): The economic lot-sizing problem with remanufacturing and one-way substitution, in: *International Journal of Production Economics*, 124. Jg., 2010, Nr. 2, S. 482-488.
- RAJARAM, K.; KARMARKAR, U. S. (2004): Campaign Planning and Scheduling for Multi-product Batch Operations with Applications to the Food-Processing Industry, in: *Manufacturing & Service Operations Management*, 6. Jg., 2004, Nr. 3, S. 253-269.
- RAO, V. D. P.; SUBBAIAH, K. V.; RAJU, V. R. (2009): Fuzzy genetic approach to economic lot-size scheduling problem, in: *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 3. Jg., 2009, Nr. 1, S. 9-16.
- RAZA, A. S.; AKGUNDUZ, A. (2008): A comparative study of heuristic algorithms on Economic Lot Scheduling Problem, in: *Computers & Industrial Engineering*, 55. Jg., 2008, Nr. 1, S. 94-109.
- RAZA, A. S.; AKGUNDUZ, A.; CHEN, M. Y. (2006): A tabu search algorithm for solving economic lot scheduling problem, in: *Journal of Heuristics*, 12. Jg., 2006, Nr. 6, S. 413-426.

- REITNER, S. (2007): *Optimale Steuerung von Rüst- und Produktionsprozessen*, Linz 2007.
- RIZK, N.; MARTEL, A. (2001): *Supply chain flow planning methods: a review of the lot-sizing literature*, Centre de recherche sur les technologies de l'organisation réseau (CENTOR) Working Paper, Nr. DT-2001-AM-1, Laval, Québec, Canada 2001.
- RODRIGUE, J.-P.; COMTOIS, C.; SLACK, B. (2006): *The geography of transport systems*, 1. Auflage, London, New York 2006.
- RODRIGUE, J.-P.; COMTOIS, C.; SLACK, B. (2013): *The geography of transport systems*, 3. Auflage, London, New York 2013.
- ROGERS, J. (1958): *A Computational Approach to the Economic Lot Scheduling Problem*, in: *Management Science*, 4. Jg., 1958, Nr. 3, S. 264-291.
- ROUNDY, R. (1989): *Rounding Off to Powers of Two in Continuous Relaxations of Capacitated Lot Sizing Problems*, in: *Management Science*, 35. Jg., 1989, Nr. 12, S. 1433-1442.
- RUIZ-TORRES, A. J.; SANTIAGO, P. I.; CHUNG, W. (2010): *The campaign and lot size scheduling problem: a modification of the Economic Lot Scheduling Problem for the pharmaceutical industry*, in: *International Journal of Logistics Systems and Management*, 7. Jg., 2010, Nr. 2, S. 184.
- SALOMON, M.; KROON, L. G.; KUIK, R.; VAN WASSENHOVE, L. N. (1991): *Some Extensions of the Discrete Lotsizing and Scheduling Problem*, in: *Management Science*, 37. Jg., 1991, Nr. 7, S. 801-812.
- SALOMON, M.; SOLOMON, M. M.; VAN WASSENHOVE, L. N.; DUMAS, Y.; DAUZÈRE-PÉRÈS, S. (1997): *Solving the discrete lotsizing and scheduling problem with sequence dependent set-up costs and set-up times using the Travelling Salesman Problem with time windows*, in: *European Journal of Operational Research*, 100. Jg., 1997, Nr. 3, S. 494-513.
- SALVESON, M. E. (1956): *A Problem in Optimal Machine Loading*, in: *Management Science*, 2. Jg., 1956, Nr. 3, S. 232-260.
- SALVIETTI, L.; SMITH, N. R. (2008): *A profit-maximizing economic lot scheduling problem with price optimization*, in: *European Journal of Operational Research*, 184. Jg., 2008, Nr. 3, S. 900-914.

- SANTANDER-MERCADO, A.; JUBIZ-DIAZ, M. (2016): The economic lot scheduling problem - A survey, in: *International Journal of Production Research*, 54. Jg., 2016, Nr. 16, S. 4973-4992.
- SAUER, M. (2009): Operations Research kompakt, München 2009.
- SCHMIDT, C. (1998): Produktionsprozessplanung mit genetischen Algorithmen, Justus-Liebig-Universität Gießen, Fachbereich Wirtschaftswissenschaften, BWL/Wirtschaftsinformatik, Discussion paper, Gießen 1998.
- SCHNEEWEIß, C. (2002): Einführung in die Produktionswirtschaft, 8. Auflage, Berlin, Heidelberg 2002.
- SEGERSTEDT, A. (1999): Lot sizes in a capacity constrained facility with available initial inventories, in: *International Journal of Production Economics*, 59. Jg., 1999, Nr. 1-3, S. 469-475.
- SHAOXIANG, C. (1993): Comments on the Two-Product, Single-Machine, Static Demand, Infinite Horizon Lot Scheduling Problem, in: *Management Science*, 39. Jg., 1993, Nr. 3, S. 387-388.
- SHARMA, S. (2004): Optimal production policy with shelf life including shortages, in: *Journal of the Operational Research Society*, 55. Jg., 2004, Nr. 8, S. 902-909.
- SHIRODKAR, V. A.; MADHUSUDANAN PILLAI, V.; SRIDHARAN, R. (2011): On the feasibility of sequence-dependent economic lot scheduling problem, in: *International Journal of Production Research*, 49. Jg., 2011, Nr. 10, S. 2925-2939.
- SHIRODKAR, V. A.; SRIDHARAN, R.; MADHUSUDANAN PILLAI, V. (2011): Effective allocation of idle time in the group technology economic lot scheduling problem, in: *International Journal of Production Research*, 49. Jg., 2011, Nr. 24, S. 7493-7513.
- SILVER, E. A. (1990): Deliberately slowing down output in a family production context, in: *International Journal of Production Research*, 28. Jg., 1990, Nr. 1, S. 17-27.
- SILVER, E. A. (1995): Dealing with a shelf life constraint in cyclic scheduling by adjusting both cycle time and production rate, in: *International Journal of Production Research*, 33. Jg., 1995, Nr. 3, S. 623-629.
- SILVER, E. A. (2004): An overview of heuristic solution methods, in: *Journal of the Operational Research Society*, 55. Jg., 2004, Nr. 9, S. 936-956.

- SOMAN, C. A.; VAN DONK, D. P.; GAALMAN, G. J. C. (2004): A basic period approach to the economic lot scheduling problem with shelf life considerations, in: *International Journal of Production Research*, 42. Jg., 2004, Nr. 8, S. 1677-1689.
- SOMAN, C. A.; VAN DONK, D. P.; GAALMAN, G. J. C. (2006): Comparison of dynamic scheduling policies for hybrid make-to-order and make-to-stock production systems with stochastic demand, in: *International Journal of Production Economics*, 104. Jg., 2006, Nr. 2, S. 441-453.
- SPANNAGEL, A.; HAUTH, M. (2007): Das Problem der simultanen Losgrößen- und Reihenfolgeplanung – Lösungsverfahren für das Economic Lot Scheduling Problem, Hochschule Mannheim, Arbeitspapier aus der Fakultät für Wirtschaftsingenieurwesen, Nr. 3, Mannheim 2007.
- STANKARD, M. F.; GUPTA, S. K. (1969): A Note on Bomberger's Approach to Lot Size Scheduling: Heuristic Proposed, in: *Management Science*, 15. Jg., 1969, Nr. 7, S. 449-452.
- SUN, H.; HUANG, H. C.; JARUPHONGSA, W. (2009): Genetic algorithms for the multiple-machine economic lot scheduling problem, in: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 43. Jg., 2009, Nr. 11-12, S. 1251-1260.
- SUN, H.; HUANG, H. C.; JARUPHONGSA, W. (2010): The economic lot scheduling problem under extended basic period and power-of-two policy, in: *Optimization Letters*, 4. Jg., 2010, Nr. 2, S. 157-172.
- SZENDROVITS, A. Z. (1975): Manufacturing Cycle Time Determination for a Multi-Stage Economic Production Quantity Model, in: *Management Science*, 22. Jg., 1975, Nr. 3, S. 298-308.
- SZENDROVITS, A. Z. (1976): On the Optimality of Sub-Batch Sizes for a Multi-Stage EPQ Model – A Rejoinder, in: *Management Science*, 23. Jg., 1976, Nr. 3, S. 334-338.
- SZENDROVITS, A. Z. (1978): A Comment on Determination of Optimum Production Quantity for a Two-stage Production System, in: *Journal of the Operational Research Society*, 29. Jg., 1978, Nr. 10, S. 1017-1020.

- TALEIZADEH, A. A.; WIDYADANA, G. A.; WEE, H. M.; BIABANI, J. (2011): Multi products single machine economic production quantity model with multiple batch size, in: *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 2. Jg., 2011, Nr. 2, S. 213-224.
- TANG, L. C.; LEE, L. H. (2005): A simple recovery strategy for economic lot scheduling problem: A two-product case, in: *International Journal of Production Economics*, 98. Jg., 2005, Nr. 1, S. 97-107.
- TANG, O.; TEUNTER, R. (2006): Economic Lot Scheduling Problem with Returns, in: *Production and Operations Management*, 15. Jg., 2006, Nr. 4, S. 488-497.
- TEUNTER, R.; KAPARIS, K.; TANG, O. (2008): Multi-product economic lot scheduling problem with separate production lines for manufacturing and remanufacturing, in: *European Journal of Operational Research*, 191. Jg., 2008, Nr. 3, S. 1241-1253.
- TEUNTER, R.; TANG, O.; KAPARIS, K. (2009): Heuristics for the economic lot scheduling problem with returns, in: *International Journal of Production Economics*, 118. Jg., 2009, Nr. 1, S. 323-330.
- TORABI, S. A.; FATEMI GHOMI, S. M. T.; KARIMI, B. (2006): A hybrid genetic algorithm for the finite horizon economic lot and delivery scheduling in supply chains, in: *European Journal of Operational Research*, 173. Jg., 2006, Nr. 1, S. 173-189.
- TORABI, S. A.; JENABI, M. (2009a): A meta-heuristic approach for the ELDSP in flexible flow lines: the power-of-two policy, in: *Journal of Industrial Engineering, University of Tehran*, 43. Jg., 2009, Nr. 1, S. 1-13.
- TORABI, S. A.; JENABI, M. (2009b): Multiple cycle economic lot and delivery-scheduling problem in a two-echelon supply chain, in: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 43. Jg., 2009, Nr. 7-8, S. 785-798.
- TORABI, S. A.; JENABI, M.; MANSOURI, S. A. (2008): Hybrid Genetic Algorithms for the Lot Production and Delivery Scheduling Problem in a Two-Echelon Supply Chain, in: FINK, A.; ROTHLAUF, F. (Hrsg.), 2008, S. 253-275.
- TORABI, S. A.; KARIMI, B.; FATEMI GHOMI, S. M. T. (2005): The common cycle economic lot scheduling in flexible job shops: The finite horizon case, in: *International Journal of Production Economics*, 97. Jg., 2005, Nr. 1, S. 52-65.

- TORRES, J. F.; ROJAS, G. S. (2007): A new genetic Algorithm for the Economic Lot Scheduling Problem, 19th International Conference on Production Research, Valparaiso, Chile 2007.
- TRANSCHEL, S.; MINNER, S.; KALLRATH, J.; LÖHNDORF, N.; EBERHARD, U. (2011): A hybrid general lot-sizing and scheduling formulation for a production process with a two-stage product structure, in: *International Journal of Production Research*, 49. Jg., 2011, Nr. 9, S. 2463-2480.
- TRUSCOTT, W. G. (1985): Scheduling production activities in multi-stage batch manufacturing systems, in: *International Journal of Production Research*, 23. Jg., 1985, Nr. 2, S. 315-328.
- TRUSCOTT, W. G. (1986): Production scheduling with capacity-constrained transportation activities, in: *Journal of Operations Management*, 6. Jg., 1986, Nr. 3-4, S. 333-348.
- VAN DEN BROECKE, F.; VAN LANDEGHEM, H.; AGHEZZAF, E. H. (2005): An application of cyclical master production scheduling in a multi-stage, multi-product environment, in: *Production Planning & Control*, 16. Jg., 2005, Nr. 8, S. 796-809.
- VAN DEN BROECKE, F.; VAN LANDEGHEM, H.; AGHEZZAF, E. H. (2008): Implementing a near-optimal solution for the multi-stage, multi-product capacitated lot-sizing problem by rolling out a cyclical production plan, in: *International Journal of Production Economics*, 112. Jg., 2008, Nr. 1, S. 121-137.
- VEMUGANTI, R. R. (1978): On the Feasibility of Scheduling Lot Sizes for Two Products on One Machine, in: *Management Science*, 24. Jg., 1978, Nr. 15, S. 1668-1673.
- VIDAL-CARRERAS, P. I.; GARCIA-SABATER, J. P. (2009): Comparison of heuristics for an economic lot scheduling problem with deliberated coproduction, in: *Journal of Industrial Engineering and Management*, 2. Jg., 2009, Nr. 3., S. 437-463.
- VIDAL-CARRERAS, P. I.; GARCIA-SABATER, J. P.; CORONADO-HERNANDEZ, J. R. (2012): Economic lot scheduling with deliberated and controlled coproduction, in: *European Journal of Operational Research*, 219. Jg., 2012, Nr. 2, S. 396-404.
- VISWANATHAN, S.; GOYAL, S. K. (1997): Optimal cycle time and production rate in a family production context with shelf life considerations, in: *International Journal of Production Research*, 35. Jg., 1997, Nr. 6, S. 1703-1712.

- VISWANATHAN, S.; GOYAL, S. K. (2002): On 'Manufacturing batch size and ordering policy for products with shelf lives', in: *International Journal of Production Research*, 40. Jg., 2002, Nr. 8, S. 1965-1970.
- WAGNER, B. J.; DAVIS, D. J. (2002): A search heuristic for the sequence-dependent economic lot scheduling problem, in: *European Journal of Operational Research*, 141. Jg., 2002, Nr. 1, S. 133-146.
- WAGNER, M.; SMITS, S. R. (2004): A local search algorithm for the optimization of the stochastic economic lot scheduling problem, in: *International Journal of Production Economics*, 90. Jg., 2004, Nr. 3, S. 391-402.
- WICHER, H. (2003): Betriebliche Lagerhaltung, in: *WISU – Das Wirtschaftsstudium*, 32. Jg., 2003, Nr. 4, S. 450-452.
- YANG, J.; YAN, H.; TAKSAR, M. I. (2000): Optimal Production and Setup Scheduling: A One-Machine, Two-Product System, in: *Annals of Operations Research*, 98. Jg., 2000, Nr. 1, S. 291-311.
- YAO, M. J. (2001): The peak load minimization problem in cyclic production, in: *Computers & Operations Research*, 28. Jg., 2001, Nr. 14, S. 1441-1460.
- YAO, M. J. (2005): The Economic Lot Scheduling Problem without Capacity Constraints, in: *Annals of Operations Research*, 133. Jg., 2005, Nr. 1, S. 193-205.
- YAO, M. J.; CHANG, P. T.; HUANG, S. F. (2005): On the Economic Lot Scheduling Problem with Fuzzy Demands, in: *International Journal of Operations Research*, 2. Jg., 2005, Nr. 2, S. 58-71.
- YAO, M. J.; ELMAGHRABY, S. E. (2001): The economic lot scheduling problem under power-of-two policy, in: *Computers & Mathematics with Applications*, 41. Jg., 2001, Nr. 10-11, S. 1379-1393.
- YAO, M. J.; ELMAGHRABY, S. E.; CHEN, I. C. (2003): On the feasibility testing of the economic lot scheduling problem using the extended basic period approach, in: *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, 20. Jg., 2003, Nr. 5, S. 435-448.
- YAO, M. J.; HUANG, J. X. (2005): Solving the economic lot scheduling problem with deteriorating items using genetic algorithms, in: *Journal of Food Engineering*, 70. Jg., 2005, Nr. 3, S. 309-322.

- ZANONI, S.; SEGERSTEDT, A.; TANG, O.; MAZZOLDI, L. (2012): Multi-product economic lot scheduling problem with manufacturing and remanufacturing using a basic period policy, in: *Computers & Industrial Engineering*, 62. Jg., 2012, Nr. 4, S. 1025-1033.
- ZIPKIN, P. H. (1991): Computing Optimal Lot Sizes in the Economic Lot Scheduling Problem, in: *Operations Research*, 39. Jg., 1991, Nr. 1, S. 56-63.
- ZIPKIN, P. H. (2000): Foundations of inventory management, Boston 2000.