

Jonas Ostmeyer

Zeit-flexible Losgrößen- und Reihenfolgeplanung

Modelle und Algorithmen zur
Integration von Liefer- und
Produktionszeitfenstern



Springer Gabler

Zeit-flexible Losgrößen- und Reihenfolgeplanung

Jonas Ostmeyer

Zeit-flexible Losgrößen- und Reihenfolgeplanung

Modelle und Algorithmen zur
Integration von Liefer- und
Produktionszeitfenstern

Mit einem Geleitwort von
Univ.-Prof. Dr. Andreas Kleine

 Springer Gabler

Jonas Ostmeyer
FernUniversität in Hagen
Hagen, Deutschland

Dissertation, FernUniversität in Hagen, 2019

Erstgutachter: Prof. Dr. Andreas Kleine
Zweitgutachter: Prof. Dr. Thomas Volling

Datum der Disputation: 24.04.2019

ISBN 978-3-658-27530-3 ISBN 978-3-658-27531-0 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-27531-0>

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

Springer Gabler

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2019

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Gabler ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Geleitwort

Die Bestimmung einer optimalen Losgröße gehört zu einer der klassischen Problemstellungen der Betriebswirtschaftslehre. Die ersten Überlegungen zu Beginn des vergangenen Jahrhunderts gehen unter anderem auf F. W. Harris und K. Andler zurück. Sie untersuchten, welche Menge von einem Produkt in einem Los herzustellen ist, wenn einerseits zu berücksichtigen ist, dass mit wenigen großen Losen die Lagerkosten steigen, aber andererseits bei vielen kleinen Losen sich die Rüstkosten erhöhen. Zur Lösung dieses Dilemma entwickelte Andler die nach ihm benannte Formel für eine optimale Losgröße, die heute noch zu den klassischen Grundlagen der Produktionswirtschaft zählt.

Diese ersten analytischen Untersuchungen zur optimalen Losgröße basierten auf aus heutiger Sicht sehr restriktiven Annahmen, die die Rahmenbedingungen einer industriellen Produktion mit den vielschichtigen Strukturen nicht adäquat widerspiegeln. So überrascht es nicht, dass zur Abbildung von praxisrelevanten Problemstellungen zahlreiche Erweiterungen entwickelt wurden, wie etwa die Berücksichtigung von mehreren Produkten, Perioden, Produktionsstufen, Kapazitätsengpässen, möglichen Fehlmengen oder Maschinenausfällen. Unter diesen und vielen weiteren Aspekten wurden die Modelle und Lösungsansätze zur Bestimmung einer optimalen Losgröße in den vergangenen Jahrzehnten sukzessive erweitert.

Dies ist auch der Ausgangspunkt für die vorliegende Schrift von Herrn Jonas Ostmeier, in der unter dem Aspekt der Flexibilität sogenannte Zeitfenster berücksichtigt werden. Dabei handelt es sich einerseits um Lieferzeitfenster, die eine Belieferung nicht nur zu einem festgelegten Zeitpunkt, sondern in einem bestimmten Zeitraum erlauben. Dies hat beispielsweise für Zulieferer-Abnehmer-Kooperationen mit langfristigen, volumenbasierten Vereinbarungen eine große Bedeutung. Andererseits kann es notwendig sein, dass die Produktion – wie etwa in der Lebensmittel- oder Chemieindustrie – in bestimmten Zeiträumen, den sogenannten Produktionszeitfenstern, durchzuführen ist. Derartige Zeitfenster erlauben eine Planung von Erzeugnissen mit einer begrenzten Verweildauer im Produktionsprozess. Die Berücksichtigung von diesen Lieferzeit- und Produktionszeitfenstern stellt eine besondere Herausforderung dar, wenn bei der Losgrößenplanung auch die Reihenfolge

der herzustellenden Lose zu berücksichtigen ist, da mit einem Produktwechsel unterschiedliche Rüstzeiten und Rüstkosten verbunden sind. Genau diese Problemstellung, d.h. die simultane Losgrößen- und Reihenfolgeplanung unter Berücksichtigung von Lieferzeit- bzw. Produktionszeitfenstern ist Gegenstand der vorliegenden Schrift.

Dazu wird zunächst auf der Basis von grundlegenden Aspekten der Produktionsplanung ein Überblick von Modellen der Losgrößen- und Reihenfolgeplanung gegeben. Durch die Verwendung einer einheitlichen Notation und die Illustration an einem kleinen numerischen Beispiel geben diese Ausführungen einen informativen und zugleich gut nachvollziehbaren Literaturüberblick von gemischt-ganzzahligen Modellierungen in der Losgrößen- und Reihenfolgeplanung. Auf Grundlage dieser Ansätze zeigt Herr Ostmeier unmittelbar auf, wie sich einerseits Lieferzeitfenster und andererseits Produktionszeitfenster in die Modelle der simultanen Losgrößen- und Reihenfolgeplanung integrieren lassen. Da sich für derartig komplexe Problemstellungen optimale Lösungen nur für kleine Probleminstanzen bestimmen lassen, erweitert der Autor die aus der Literatur bekannten Dekompositionsstrategien um eine Standort-Orientierung und entwickelt zur Bestimmung der jeweils auszuwählenden Reihenfolge individuell angepasste Kostenfunktionen. Die resultierenden heuristischen Lösungsverfahren werden an Testinstanzen evaluiert und abschließend für eine Erweiterung des eingeführten Fallbeispiels vergleichend diskutiert.

Die vorliegende Schrift gibt somit für Leserinnen und Leser, die an der Modellierung von Losgrößen- und Reihenfolgeplanung interessiert sind, einen systematischen Überblick und zeigt auf, wie sich diese um praxisrelevante Lieferzeit- bzw. Produktionszeitfenster erweitern und effizient lösen lassen.

Hagen

Andreas Kleine

Vorwort

Meine Ihnen nunmehr vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre, insbes. Quantitative Methoden und Wirtschaftsmathematik an der FernUniversität in Hagen. Mit ihr bekommen Sie einen erweiterten Einblick in den Kontext von Flexibilität im Rahmen der Losgrößen- und Reihenfolgeplanung. Hierbei stehen insbesondere Aspekte einer zeitlich flexiblen Planung im Fokus. Die Modellerweiterungen und Algorithmen beziehen letztendlich zwei Varianten von Zeitfenstern mit in die simultane Losgrößen- und Reihenfolgeplanung ein. Die Zielgruppe für diese Thematik ist hierbei nicht ausschließlich auf den akademisch geprägten Sektor ausgelegt, sondern für die Praxis in einem unternehmerischen Umfeld gleichermaßen geeignet. Die vorliegende Schrift ist damit ein Abbild meiner jahrelangen intensiven Arbeit auf diesem Themengebiet.

Zu allererst gilt mein Dank meinem Doktorvater, Herrn Univ.-Prof. Dr. Andreas Kleine, der stets ein offenes Ohr hatte und mich im Rahmen von ausgiebigen Diskussionen immer wieder auf den wirtschaftswissenschaftlichen Pfad gebracht hat. Herrn Univ.-Prof. Dr. Thomas Volling bin ich für unsere inspirierenden Fachgespräche sowie für die Übernahme der Zweitbegutachtung meiner Dissertation zu Dank verpflichtet. Nicht zuletzt danke ich Herrn Univ.-Prof. Dr. Wilhelm Rödder herzlich für das Mitwirken in der Prüfungskommission sowie für unsere bereichernden Gespräche – auch abseits der Wissenschaft.

Bei meinen Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhls, insbesondere Dr. Andreas Dellnitz, möchte ich mich für alle fachlichen und anderweitig gearteten Gesprächsrunden bedanken. Diese haben nicht nur einen wesentlichen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet, sondern auch das Miteinander stets gefördert.

Mein ganz besonderer Dank gilt an dieser Stelle meiner Familie und insbesondere meiner Ehefrau, die mir in dieser Zeit immer den Rücken gestärkt und den nötigen Halt gegeben hat.

Abschließend möchte ich mich bei allen anderen Personen bedanken, die mich auf diesem Wege begleitet haben.

Für H.O. & W.O. sowie K.O. & L.O.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XIII
Tabellenverzeichnis	XV
Algorithmenverzeichnis	XIX
Abkürzungsverzeichnis	XXI
Symbolverzeichnis	XXIII
1 Einleitung	1
1.1 Hinführung zum Thema	1
1.2 Geschichtliches zur Planung von Produktionsgrößen	2
1.3 Ziel und Aufbau der Arbeit	6
2 Grundlegende Aspekte der Produktionsplanung	9
2.1 Einordnung in das Supply Chain Management	9
2.1.1 Bezugsrahmen	9
2.1.2 Verortung innerhalb der drei Planungsebenen	11
2.1.3 Relevanz in Advanced Planing and Scheduling Systemen .	15
2.2 Flexible Strukturen in der Produktion	21
2.2.1 Begriffliches und Abgrenzung	21
2.2.2 Flexibilität innerhalb der Produktionsplanung	26
2.2.3 Zeit-flexible Planungsaspekte	31
2.3 Zur Rolle der simultanen Losgrößen- und Reihenfolgeplanung ..	34
2.3.1 Kritische Einflussgrößen und das Dilemma der Losgrößenplanung	34
2.3.2 Merkmale zur Klassifizierung	37
3 Ausgewählte Losgrößen- und Reihenfolgeprobleme	43
3.1 Losgrößenplanungsmodelle bei ein- und mehrstufiger Fertigung .	43
3.1.1 Grundlegende Planungsansätze	43
3.1.1.1 Problemformulierungen bei einstufiger Fertigung .	43

3.1.1.2	Problemformulierungen bei mehrstufiger Fertigung	60
3.1.2	Weiterführende Planungsansätze	69
3.1.2.1	Spezifische Erweiterungen um Zeitfensterrestriktionen	69
3.1.2.2	Spezifische Erweiterungen um die Übertragung eines Rüstzustands auf Folgeperioden	76
3.1.3	Unvollkommenheit isolierter Planungsansätze	81
3.2	Simultane Losgrößen- und Reihenfolgeplanungsmodelle bei ein- und mehrstufiger Fertigung	83
3.2.1	Zeitstrukturen: Small- und Big-Time-Buckets	83
3.2.2	CLSD-basierte Problemformulierungen	86
3.2.3	GLSP-basierte Problemformulierungen	102
3.3	Strukturelle Schwächen bestehender Planungsansätze	110
4	MLCLSD-basierte Modellvarianten zur simultanen Losgrößen- und Reihenfolgeplanung mit Zeitfensterrestriktionen	117
4.1	Rahmenbedingungen und Präliminarien	117
4.2	Entwicklung eines mathematischen Grundmodells	119
4.2.1	Anpassung problemspezifischer Nebenbedingungen	119
4.2.1.1	Lagerhaltung, Transporte und Kapazitätsbeschränkungen	119
4.2.1.2	Rüstvorgänge und Umrüstungen mit Reihenfolgen	122
4.2.2	Zielfunktion und Modellzusammenfassung	124
4.3	Erweiterung des Grundmodells um Zeitfensterrestriktionen	129
4.3.1	Zur ökonomischen Relevanz von Zeitfenstern	129
4.3.2	Modellvariante mit Lieferzeitfenstern	134
4.3.3	Modellvariante mit Produktionszeitfenstern	137
4.4	Übertragbarkeit auf GLSP-basierte Problemformulierungen	141
4.5	Kritische Würdigung – insbesondere unter praktischen Aspekten	144
5	Problemspezifische Lösungsfindung	149
5.1	Komplexitätsdiskussion zu Modellvarianten mit Zeitfensterrestriktionen	149
5.2	Anwendbare Lösungsansätze aus der Literatur	155
5.2.1	Exakte vs. heuristische Verfahren	155
5.2.2	Eine Auswahl von Lösungsverfahren für dynamische Losgrößen- und Reihenfolgeprobleme	158
5.3	Heuristische Lösungsansätze unter Berücksichtigung modellspezifischer Charakteristika	170
5.3.1	Dekompositionsphilosophie und Verfahrensüberblick	170

5.3.2	Bestimmung einer ersten Anfangslösung	172
5.3.3	Verbesserung einer Lösung mittels Ressourcen-basierter Dekomposition	181
5.3.3.1	Grundprinzip der Heuristik	181
5.3.3.2	Ein Fix-Relax-and-Optimize-Ansatz zur Berechnung der Sub-Modelle	183
5.3.3.3	Verfahrensvariante mit Ressourcen-Orientierung .	193
5.3.3.4	Verfahrensvariante mit Standorten-Orientierung .	197
5.3.3.5	Verfahrensvariante mit Produkten-Orientierung .	200
5.3.3.6	Verfahrensvariante mit Prozess-Orientierung	205
5.4	Numerische Untersuchungen	207
5.4.1	Verhalten bei großen Testinstanzen	208
5.4.2	Anwendungen auf ein Planungsszenario	218
5.4.2.1	Problemskizze	218
5.4.2.2	Berechnete Lösungen mittels erarbeiteter Verfahren	221
5.4.2.3	Auswertung der Ergebnisse	224
5.5	Abschließende Diskussion zur Lösungsbestimmung	231
6	Schlussbetrachtungen und Forschungsperspektiven	235
	Literaturverzeichnis	241
	Anhang	257
A	Vollständige Modelldarstellung <i>MLCLSD-PM-ML-DTW</i>	257
B	Vollständige Modelldarstellung <i>MLCLSD-PM-ML-PTW</i>	258
C	Testinstanzen – Konstruktionsvorschriften und Kennzahlen . .	260
D	Vollständige Eingabedaten des Planungsszenarios	268

Abbildungsverzeichnis

1.1	Abstrahierte Struktur eines Produktionssystems	3
1.2	Aufbau der Arbeit	7
2.1	Supply Chain als Unternehmensnetzwerk	10
2.2	Planungsebenen im Supply Chain Management	13
2.3	Grundlegende Struktur eines Advanced Planning and Scheduling (APS)-Systems auf Basis der Supply-Chain-Planungsmatrix	17
2.4	Simultane Losgrößen- und Reihenfolgeplanung innerhalb eines APS-Systems	20
2.5	Repräsentation von Flexibilitätskonfiguration in der Produktion mittels bipartiter Graphen	29
2.6	Dilemma der Losgrößenplanung	36
2.7	Grundformen von Erzeugnisstrukturen	40
3.1	Optimale Losgröße für Produkt E_1 im statischen Fall	46
3.2	Gantt-Diagramm der optimalen Maschinenbelegung im <i>CLSP-PM</i>	59
3.3	Gozintograph für das Enderzeugnis E_2	63
3.4	Beispielhaftes Rüstmuster gemäß Annahmen der klassischen Losgrößenplanung	76
3.5	Beispielhaftes Rüstmuster einer Losgrößenplanung mit Rüstübertragung	77
3.6	Zeitstrukturen im allgemeinen Vergleich	83
3.7	Spezielle Zeitstruktur des GLSP	85
3.8	Beispielhafte Zeitstrukturen für einen Monatsplan	86
3.9	Gantt-Diagramm einer optimalen Maschinenbelegung im <i>CLSD-BOPM</i>	93
3.10	Mehrstufige Produktion mit parallelen Ressourcen an räumlich getrennten Standorten	95
3.11	Maschinen und Standorte für ein Modell <i>MLCLSD-PM-ML</i>	100

3.12	Systematischer Überblick relevanter Losgrößenplanungsmodelle	111
4.1	Variation der Indextmengen für die mehrstufige Produktion mit parallelen Ressourcen an räumlich getrennten Standorten	120
4.2	Klassifizierung von verderblichen Erzeugnissen	132
5.1	Nachweis der Komplexität mittels Spezialisierung	151
5.2	Klassifizierung von Lösungsverfahren	159
5.3	Beispielhafte Darstellung von Iterationen der Ressourcen-basierten Dekomposition	183
5.4	Beispielhafte Darstellungen von Iterationen der Zeit-basierten Dekomposition	189
5.5	Beispielhafte Darstellung von Iterationen der zweistufigen Ressourcen- und Zeit-basierten Dekomposition	192
5.6	Rechenzeiten für die Testinstanzen ohne zusätzliche Flexibilität	210
5.7	Relative GAPS der Gesamtkosten für die Testinstanzen ohne zusätzliche Flexibilität	212
5.8	Rechenzeiten für die Testinstanzen mit zusätzlicher Flexibilität	214
5.9	Relative GAPS der Gesamtkosten für die Testinstanzen mit zusätzlicher Flexibilität	216
5.10	Erzeugnisstruktur des Planungsszenarios	218
5.11	Produkt-Maschinen-Zuweisungen des Planungsszenarios	219
5.12	Supply Chain Netzwerk des Planungsszenarios	219
5.13	Indextmengen des Planungsszenarios für die mehrstufige Produktion mit parallelen Ressourcen an räumlich getrennten Standorten	220
5.14	Relative GAPS der Gesamtkosten und Rechenzeiten für die Modelle im Planungsszenario	226
5.15	Abweichungen der Einzelkosten für das <i>MLCLSD-PM-ML-DTW</i> im Planungsszenario	227
5.16	Abweichungen der Einzelkosten für das <i>MLCLSD-PM-ML-PTW</i> im Planungsszenario	229
5.17	Relative Abweichungen der Lagermengen und Umrüstungen im Planungsszenario	230

Tabellenverzeichnis

2.1	Relevante Dimensionen der Produktionsflexibilität	27
3.1	Bedarfmengen für das Produkt E_1 im Modell $SLULSP$	46
3.2	Optimales Ergebnis des Modells $SLULSP$ für die Planung von E_1	47
3.3	Kostensätze und Kapazitätsverbräuche im Modell $CLSP$	50
3.4	Bedarfmengen für die Produkt im Modell $CLSP$	50
3.5	Optimales Ergebnis für ein Modell $CLSP$	51
3.6	Optimales Ergebnis für ein Modell $CLSP-B$	53
3.7	Optimales Ergebnis für ein Modell $CLSP-OT$	55
3.8	Kostensätze und Kapazitätsverbräuche der neu beschafften Maschinen M_{1a} und M_{1b} im Modell $CLSP-PM$	58
3.9	Optimales Ergebnis für ein Modell $CLSP-PM$	59
3.10	Kapazitäten der verfügbaren Maschinen im Modell $MLCLSP$	63
3.11	Ergänzung der Kostensätze und Kapazitätsverbräuche im Modell $MLCLSP$	64
3.12	Optimales Ergebnis für ein Modell $MLCLSP$	64
3.13	Optimales Ergebnis für ein Modell $MLCLSP-B$	67
3.14	Optimales Ergebnis für ein Modell $MLCLSP-OT$	68
3.15	Auftragsmengen und Lieferzeitfenster für das Produkt E_1 im Modell $SLULSP-DTW$	73
3.16	Bedarfmengen und Produktionszeitfenster im Modell $CLSP-TW-ST$	73
3.17	Optimales Ergebnis für ein Modell $CLSP-TW-ST$	74
3.18	Gegenüberstellung wesentlicher Eigenschaften der Losgrößenmodelle mit Zeitfenstern	75
3.19	Optimales Ergebnis für ein Modell $CLSP-L$	80
3.20	Optimales Ergebnis für ein Modell $CLSD$	91
3.21	Optimales Ergebnis für ein Modell $CLSD-BOPM$	92
3.22	Optimales Ergebnis für ein Modell $MLCLSD$	99
3.23	Eingabedaten für die Transporte im Modell $MLCLSD-PM-ML$	100

3.24	Optimale Losgrößen, Lagermengen und Reihenfolgen für ein Modell <i>MLCLSD-PM-ML</i>	101
3.25	Optimale Transporte für ein Modell <i>MLCLSD-PM-ML</i>	102
3.26	Optimales Ergebnis für ein Modell <i>GLSPST</i>	107
3.27	Dimensionen der Flexibilität für bestehende Losgrößen- und Reihenfolgemodelle	114
4.1	Gegenüberstellung der Entscheidungsvariablen für <i>Capacitated Lotsizing with Sequence Dependent Setup Costs (CLSD)</i> - und <i>General Lotsizing and Scheduling Problem (GLSP)</i> -basierte Varianten der Modell 4.1 bis 4.3	142
5.1	Größenordnungen der Testinstanzen	209
5.2	Durchschnittliche Rechenzeiten und durchschnittliche relative GAPs der Gesamtkosten für die Testinstanzen ohne zusätzliche Flexibilität	213
5.3	Durchschnittliche Rechenzeiten und durchschnittliche relative GAPs der Gesamtkosten für die Testinstanzen mit zusätzlicher Flexibilität	217
5.4	Kosten für die Modelle <i>MLCLSD-PM-ML-DTW</i> und <i>MLCLSD-PM-ML-PTW</i> im Planungsszenario	222
5.5	Gesamtsumme Lagermengen, Gesamtanzahl Umrüstungen und Gesamtanzahl Transporte aller Lösungsverfahren für die Modelle <i>MLCLSD-PM-ML-DTW</i> und <i>MLCLSD-PM-ML-PTW</i> im Planungsszenario	224
5.6	Relative GAPs und Rechenzeiten der Lösungsverfahren für die Modelle <i>MLCLSD-PM-ML-DTW</i> und <i>MLCLSD-PM-ML-PTW</i> im Planungsszenario	225
C.1	Rechenzeiten [in Sek.] für die Testinstanzen ohne zusätzliche Flexibilität	264
C.2	Relative GAPs der Gesamtkosten [in %] für die Testinstanzen ohne zusätzliche Flexibilität	265
C.3	Rechenzeiten [in Sek.] für die Testinstanzen mit zusätzlicher Flexibilität	266
C.4	Relative GAPs der Gesamtkosten [in %] für die Testinstanzen mit zusätzlicher Flexibilität	267
D.1	Transportkosten zwischen den Standorten	269
D.2	Vorlaufverschiebungen und Volumina der Produkte	269
D.3	Parameter der Standorte	270

D.4	Kapazitäten, Überstunden und Anfangsrüstzustände der Ressourcen	270
D.5	Parameter für Ressource M_{11}	271
D.6	Parameter für Ressource M_{12}	271
D.7	Parameter für Ressource M_{13}	272
D.8	Parameter für Ressource M_{81}	272
D.9	Parameter für Ressource M_{82}	272
D.10	Parameter für die Ressourcen $M_2, M_3, M_4, M_5, M_6, M_7,$ M_{91} und M_{92}	273
D.11	Bedarfsmengen $d_{1,s,t}$ im Planungsszenario für das Enderzeugnis E_1 gruppiert nach Zeitfenstern	274
D.12	Bedarfsmengen $d_{2,s,t}$ im Planungsszenario für das Enderzeugnis E_2 gruppiert nach Zeitfenstern	275
D.13	Bedarfsmengen $d_{3,s,t}$ im Planungsszenario für das Enderzeugnis E_3 gruppiert nach Zeitfenstern	276

Algorithmenverzeichnis

5.1	Bestimmung der Anfangsrüstzustände für die Berechnung einer zulässigen Anfangslösung	176
5.2	Bestimmung einer zulässigen Rüstsequenz für alle Ressourcen und Perioden	177
5.3	Bestimmung einer Anfangslösung	178
5.4	Grundprinzip Ressourcen-basierter Dekomposition	181
5.5	Zeitliche Dekomposition mittels Fix-Relax-and-Optimize-Heuristik	188
5.6	Berechnung der Fix-Relax-and-Optimize-Zeitfenster	190
5.7	Initialisierung der binären Rüstvariablen	191
5.8	Variante des Ressourcen-basierten Dekompositionsverfahrens mit Ressourcen-orientierter Dekompositionsstrategie	196
5.9	Variante des Ressourcen-basierten Dekompositionsverfahrens mit Standort-orientierter Dekompositionsstrategie	199
5.10	Variante des Ressourcen-basierten Dekompositionsverfahrens mit Produkt-orientierter Dekompositionsstrategie	203
5.11	Variante des Ressourcen-basierten Dekompositionsverfahrens mit Prozess-orientierter Dekompositionsstrategie	206

Abkürzungsverzeichnis

AP	Advanced Planning
APS	Advanced Planning and Scheduling
B&B	Branch-and-Bound
BTB	Big-Time-Bucket
CLSP	Capacitated Lotsizing Problem
CLSP-B	Capacitated Lotsizing Problem with Backlogs
CLSP-L	Capacitated Lotsizing Problem with Linked Lotsizes
CLSP-OT	Capacitated Lotsizing Problem with Overtimes
CLSP-PM	Capacitated Lotsizing Problem with Parallel Mashines
CLSP-TW-ST	Capacitated Lotsizing Problem with Time Windows and Setup Times
CLSD	Capacitated Lotsizing with Sequence Dependent Setup Costs
CLSD-BOPM	Capacitated Lotsizing Problem with Sequence-Dependent Setups, Back-Orders and Parallel Machines
CSLP	Continous Setup Lotsizing Problem
DLSP	Discrete Lotsizing and Scheduling Problem
ERP-Systeme	Enterprise-Resource-Planning-Systems
GE	Geldeinheit
GLSP	General Lotsizing and Scheduling Problem
GLSPMS	General Lotsizing and Scheduling Problem for Multiple Production Stages
GLSPPL	General Lotsizing and Scheduling Problem with Parallel Lines
GLSPST	General Lotsizing and Scheduling Problem with Sequence-Dependend Setup Times
JIT	Just-in-Time
ME	Mengeneinheit
MLCLSP	Multi-Level Capacitated Lotsizing Problem

MLCLSP-B	Multi-Level Capacitated Lotsizing Problem with Backlogs
MLCLSP-L	Multi-Level Capacitated Lotsizing Problem with Linked Lotsizes
MLCLSP-OT	Multi-Level Capacitated Lotsizing Problem with Overtimes
MLCLSD	Multi-Level Capacitated Lotsizing Problem with Sequence-Dependent Setups
MLCLSD-PM-ML	Multi-Level Capacitated Lotsizing Problem with Sequence-Dependent Setup Costs using Parallel Machines at Multiple Locations
MLCLSD-PM-ML-DTW	Multi-Level Capacitated Lotsizing Problem with Sequence-Dependent Setup Costs using Parallel Machines at Multiple Locations considering Demand Time Windows
MLCLSD-PM-ML-PTW	Multi-Level Capacitated Lotsizing Problem with Sequence-Dependent Setup Costs using Parallel Machines at Multiple Locations considering Production Time Windows
MLPLSP	Multi-Level Proportional Lotsizing and Scheduling Problem
MRP	Material Requirements Planning
MRP II	Manufacturing Resource Planning
PLSP	Proportional Lotsizing and Scheduling Problem
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
SCM	Supply Chain Management
SLULSP	Single-Level Uncapacitated Lotsizing Problem
SLULSP-DTW	Single-Level Uncapacitated Lotsizing Problem with Demand Time Windows
STB	Small-Time-Bucket
TSP	Traveling Salesman Problem
VRP	Vehicle Routing Problem

Symbolverzeichnis

$\bar{\gamma}_p$	Anfangsrüstzustand für Produkt p in Periode $t = 0$
$\bar{\gamma}_{pm}$	Anfangsrüstzustand für Produkt p auf Ressource m in Periode $t = 0$
γ_{pmt}	Rüstübertragung für Produkt p auf Ressource m am Ende von Periode t
γ_{pt}	Rüstübertragung für Produkt p am Ende von Periode t
δ_t	Rüstvorgang in Periode t im Einproduktfall
δ_{pmt}	Rüstvorgang für Produkt p auf Ressource m in Periode t
δ_{pt}	Rüstvorgang für Produkt p in Periode t
ζ_{pamt}	Umrüstung von Produkt p nach Produkt q auf Ressource m in Periode t
ζ_{pqt}	Umrüstung von Produkt p nach Produkt q in Periode t
η_{pmt}	Position von Produkt p innerhalb der Reihenfolge auf Ressource m in Periode t
$\bar{\eta}_{pmt}^*$	eindeutige Position von Produkt p innerhalb der Reihenfolge auf Ressource m in Periode t im Optimum
η_{pt}	Position von Produkt p innerhalb der Reihenfolge in Periode t
$\bar{\eta}_{pt}^*$	eindeutige Position von Produkt p innerhalb der Reihenfolge in Periode t im Optimum
Θ	Steuerparameter in der zeitlichen Dekomposition für die Anzahl der Perioden mit zu optimierenden Rüstindikatoren
Φ	Steuerparameter in der zeitlichen Dekomposition für die Anzahl überlappender Perioden zwischen zwei aufeinanderfolgenden Iterationen
Ψ	Steuerparameter in der zeitlichen Dekomposition für die Anzahl der Perioden mit relaxierten Rüstindikatoren
a_p^P	Kapazitätsverbrauch für die Produktion einer Einheit von Produkt p
a_{pm}^P	Kapazitätsverbrauch für die Produktion einer Einheit von Produkt p auf Ressource m
a_p^R	Kapazitätsverbrauch eines Rüstvorgangs für Produkt p

a_{pm}^R	Kapazitätsverbrauch eines Rüstvorgangs für Produkt p auf Ressource m
a_{pq}^{UR}	Kapazitätsverbrauch eines Umrüstvorgangs von Produkt p auf Produkt q
a_{pqm}^{UR}	Kapazitätsverbrauch eines Umrüstvorgangs von Produkt p auf Produkt q für Ressource m
B_{pt}	Kumulierte Fehlmengen für p , die potentiell bis zur Periode t anfallen können
b_{plt}	Menge an Auftragsrückständen von Produkt p am Standort l zum Ende von Periode t
b_{pt}	Menge an Auftragsrückständen von Produkt p am Ende von Periode t
C_l^L	Kapazitätsgrenze des Lagers am Standort l
C_{mt}	Kapazitätsgrenze der Produktion von Ressource m in Periode t
C_{mt}^O	maximal mögliche Überstunden für Ressource m in einer Periode t
C_t^O	maximal mögliche Überstunden in einer Periode t
C_t	Kapazitätsgrenze der Produktion in Periode t
C_l^{Tr}	Kapazitätsgrenze der Transporte ausgehend von Standort l
D_{pt}	Kumulierter Bedarf für p in den zukünftigen Perioden von t bis zum Ende des Planungshorizonts T
D_{st}	Kumulierter Bedarf zwischen den Perioden s und t im Einproduktfall
\hat{d}_{plt}	Hilfsvariable für die von Produkte $p \in \mathcal{P}$ am Standort l in Periode $t \in \mathcal{T}$ zu erfüllenden Bedarfsmengen
d_{pst}	Primärbedarfsmenge von Produkt p im Zeitfenster von Periode s bis Periode t
d_{pt}	Primärbedarfsmenge von Produkt p in Periode t
d_t	Primärbedarfsmenge in Periode t im Einproduktfall
$f \in \mathcal{F}$	Indizierung der Mikroperioden
$\mathcal{F}_t \subseteq \mathcal{F}$	Indexmenge der Mikroperioden innerhalb einer fest gewählten Makroperiode $t \in \mathcal{T}$
\overline{f}_t	letzte Mikroperiode der Makroperiode t
\underline{f}_t	erste Mikroperiode der Makroperiode t
g_p	Volumen von Produkt p
k_{pt}^B	Kosten je Einheit Auftragsrückstand von Produkt p in Periode t

k^L	Lagerkosten je Produkteinheit und Periode im Einproduktfall
k_{pt}^L	Lagerkosten je Einheit von Produkt p in Periode t
k_{pl}^L	Lagerkosten je Einheit von Produkt p am Standort l
k_{plt}^L	Lagerkosten je Einheit von Produkt p am Standort l in Periode t
k_{mt}^O	Kosten je Überstunde auf Ressource m in Periode t
k_t^O	Kosten je Überstunde in Periode t
k_{pt}^P	Produktionskosten je Einheit von Produkt p in Periode t
k_{pmt}^P	Produktionskosten je Einheit von Produkt p auf Ressource m in Periode t
k^R	Rüstkosten je Periode im Einproduktfall
k_{pt}^R	Rüstkosten von Produkt p in Periode t
k_{pmt}^R	Rüstkosten von Produkt p auf Ressource m in Periode t
k_{lh}^{Tr}	Transportkosten von Standort l zu Standort h
k_{lht}^{Tr}	Transportkosten von Standort l zu Standort h in Periode t
k_{pqm}^{UR}	reihenfolgeabhängige Rüstkosten bei einer Umrüstung der Ressource m von Produkt p auf Produkt q
k_{pqmt}^{UR}	reihenfolgeabhängige Rüstkosten bei einer Umrüstung der Ressource m von Produkt p auf Produkt q in Periode t
$l, h \in \mathcal{L}$	Indizierung der Standorte
$\mathcal{L}_p \subseteq \mathcal{L}$	Indexmenge der Standorte, an denen ein Produkt $p \in \mathcal{P}$ hergestellt wird
$m, n \in \mathcal{M}$	Indizierung der Ressourcen
$\mathcal{M}^{fix} \subseteq \mathcal{M}$	Menge der bereits optimierten Ressourcen in einer Heuristik
$\mathcal{M}^{init} \subseteq \mathcal{M}$	Menge der Ressourcen mit Initialwerten in einer Heuristik
$\mathcal{M}^{opt} \subseteq \mathcal{M}$	Menge der zu optimierenden Ressourcen in einer Heuristik
M	große Zahl (zur Modellierung von linearen Wenn-Dann-Restriktionen)
M_{pmt}	große Zahl M , spezifisch für einzelne $p \in \mathcal{P}$, $m \in \mathcal{M}$ und $t \in \mathcal{T}$
M_{pt}	große Zahl M , spezifisch für einzelne $p \in \mathcal{P}$ und $t \in \mathcal{T}$
M_t	große Zahl M , spezifisch für einzelne $t \in \mathcal{T}$
$\mathcal{M}_{pl} \subseteq \mathcal{M}$	Indexmenge der Ressourcen, die ein Produkt $p \in \mathcal{P}_m$ (\mathcal{P}_m^M) am Standort $l \in \mathcal{L}$ produzieren können

$\mathcal{N}_p \subseteq \mathcal{P}$	Indexmenge aller Nachfolgeprodukte von einem fest gewählten Produkt $p \in \mathcal{P}$ innerhalb einer mehrstufigen Erdzeugnisstruktur
o_{mt}	Überstunden auf Ressource m in Periode t
o_t	Überstunden in Periode t
$p, q \in \mathcal{P}$	Indizierung der Produkte
$\mathcal{P}^{fix} \subseteq \mathcal{P}$	Produkte mit bereits optimierten und fixierten Rüstsequenzen bei der Prozess-orientierten Dekompositionsstrategie
$\mathcal{P}^{opt} \subseteq \mathcal{P}$	Produkte mit zu optimierenden Rüstsequenzen bei der Prozess-orientierten Dekompositionsstrategie
$\mathcal{P}^{pre} \subseteq \mathcal{P}$	Nachfolgeprodukte für den nächsten Iterationsschritt bei der Prozess-orientierten Dekompositionsstrategie
$\mathcal{P}_l^{\mathcal{L}} \subseteq \mathcal{P}$	Indexmenge der Produkte $p \in \mathcal{P}$, die am Standort $l \in \mathcal{L}$ hergestellt werden können
$\mathcal{P}_m \subseteq \mathcal{P}$	Indexmenge der Produkte, die von einer fest gewählten Ressource $m \in \mathcal{M}$ hergestellt werden können
$\mathcal{P}_m^{\mathcal{M}} \subseteq \mathcal{P}$	Indexmenge der Produkte $p \in \mathcal{P}$, die von Ressourcen $m \in \mathcal{M}$ hergestellt werden können
r_{pq}	Produktionskoeffizient: notwendige Menge von Erzeugnis q zur Herstellung einer Einheit von Erzeugnis p
s_{pmt}^{LB}	Schlupfvariable für die Aufweichung der Minimallosbedingungen in der Anfangslösung
$t, s, \theta, \tau \in \mathcal{T}$	Indizierung der (Makro-) Perioden
$\mathcal{T}^{fix} \subseteq \mathcal{T}$	Perioden mit bereits optimierten Rüstsequenzen in einer Heuristik
$\mathcal{T}^{init} \subseteq \mathcal{T}$	Perioden mit fixierten Rüstsequenzen aus der Anfangslösung
$\mathcal{T}^{opt} \subseteq \mathcal{T}$	Perioden mit zu optimierenden Rüstindikatoren in einer Heuristik
$\mathcal{T}^{rel} \subseteq \mathcal{T}$	Perioden mit relaxierten Rüstindikatoren in einer Heuristik
$\mathcal{V}_p \subseteq \mathcal{P}$	Indexmenge aller Vorgängerprodukte von einem fest gewählten Produkt $p \in \mathcal{P}$ innerhalb einer mehrstufigen Erdzeugnisstruktur
v_{plht}	Transportmenge für Produkt p von Standort l zu Standort h in Periode t
w_{lht}	Anzahl Transporte von Standort l zu Standort h in Periode t
x_p^{LB}	Mindestlosgröße von Produkt p

x_{pm}^{LB}	Mindestlosgröße von Produkt p auf Ressource m
x_{pmt}	Losgröße von Produkt p auf Ressource m in Periode t
x_{pt}	Losgröße von Produkt p in Periode t
x_t	Losgröße in Periode t im Einproduktfall
y_{plt}	Lagermenge von Produkt p am Standort l am Ende von Periode t
\bar{y}_{pl}	Lageranfangsbestand für Produkt p an Standort l
\bar{Y}_{pl}	Lagerendbestand für Produkt p an Standort l
y_{pt}	Lagermenge von Produkt p am Ende von Periode t
y_t	Lagermenge am Ende von Periode t im Einproduktfall
z_p	Vorlaufverschiebung von Produkt p bei mehrstufiger Planung
$\square_{\square}^{\text{ANF}}$	Zusatz an Variablen für die Zugehörigkeit zu einer Anfangslösung
$\bar{\square}$	Kennzeichnung einer Variable als auf einen festen Zahlenwert fixiert
$\square_{\square}^{\text{FRO}}$	Zusatz an Variablen für die Zugehörigkeit zur Lösung einer zeitlichen Dekomposition mittels Fix-Relax-and-Optimize-Heuristik
$\bar{\square}_{\square}^{\text{OPT}}$	Kennzeichnung einer Variable, die auf einen fixierten Wert aus einem bereits durchlaufenen Optimierungsverfahren gesetzt ist
\square^{ORD}	Zusatz an Indexmengen, die diese als geordnete Indexmenge ausweisen
$\square_{\square}^{\text{TSP}}$	Zusatz an Variablen für die Zugehörigkeit zum Eröffnungsverfahren mittels Modell TSP_{mt}



1 Einleitung

1.1 Hinführung zum Thema

Die *Produktionswirtschaft* als Teildisziplin der Betriebswirtschaft fokussiert vornehmlich auf die Herstellung von Sachgütern. Sowohl aus betriebswirtschaftlicher als auch aus volkswirtschaftlicher Sicht sind allerdings auch immaterielle Güter notwendig, deren „Erzeugung“ in weiteren Wirtschaftsdisziplinen neben der Produktionswirtschaft im Fokus steht (vgl. Günther und Tempelmeier 2012, S. 8). Um eine erste grobe Kategorisierung vorzunehmen, ist somit in produzierende und dienstleistende Unternehmen zu unterscheiden (vgl. Gutenberg 1983, S. 1).

Im Zusammenhang mit dem Begriff Produktionsplanung ist immer häufiger die Rede von *Flexibilität*: Ein Produktionsprozess soll flexibel sein oder muss noch flexibler werden. Die genaue Bedeutung wird jedoch oft nicht näher spezifiziert. Der Begriff Flexibilität wird vom lateinischen Wort *flexibilis* abgeleitet, was im Deutschen soviel wie „biegsam“, „geschmeidig“ oder „anpassungsfähig“ bedeutet (vgl. Burmann 2005, S. 30). Ein *flexibler* Prozess lässt sich somit allgemein als ein Vorgang beschrieben, der nicht starr von seiner Struktur ist und an veränderliche Umweltbedingungen angepasst werden kann.

Angenommen, der Begriff sei angemessen präzise spezifiziert, dann stellt sich sogleich die Frage nach geeigneten Instrumenten, um Flexibilität in der Produktionsplanung abzubilden und diese bei der Entscheidungsfindung zu berücksichtigen. Dies ist Gegenstand der vorliegenden Schrift. Zunächst ist jedoch ein erster Blick auf Geschichtliches zur Produktionsplanung zielführend.

1.2 Geschichtliches zur Planung von Produktionsgrößen

Bereits Anfang des 19. Jahrhunderts entstanden erste begriffliche Eingrenzungen zur *Produktion* (vgl. Corsten und Gössinger 2016, S. 1). Allerdings beschränkten sich diese zumeist auf rudimentäre Umschreibungen eines Prozesses, bei dem aus bestehenden Produkten durch eine vom Menschen ausgeführte Tätigkeit neue und zuvor nicht vorhandene Produkte entstehen. Zur Struktur oder aber einer Planung des Ablaufs solch eines „Transformationsprozesses“ wurde sich zu diesem Zeitpunkt allerdings nur wenig Gedanken gemacht.

„Every manufacturer is confronted with the problem of finding the most economical quantity to manufacture in putting through an order“ (Harris 1990, S. 947). Mit diesem Satz begann der Autor seinen Originalartikel von 1913 in „The Magazine of Management“ und griff damit als einer der ersten den ökonomischen Gedanken bei der Planung einer Produktion auf. Jedoch ist hier nicht unmittelbar einsichtig, was unter dem „Auffinden der wirtschaftlichsten Menge“ zu verstehen ist. Als Ergebnis stellt Harris schließlich ein Konzept zur optimalen Planung von Produktionsgrößen heraus und begründet hiermit einen ganzen Forschungszweig in der Betriebswirtschaft, welcher unter dem Titel der *Losgrößenplanung* bekannt ist. Im deutschsprachigen Raum gehen diese Überlegungen zurück auf die Arbeit von Andler (1929), in der ebenfalls die Bestimmung einer optimalen Losgröße thematisiert wird. Jedoch berücksichtigt keines der beiden Konzepte zeitlich veränderliche Aspekte bei der Planung, weshalb es sich hier um *statische* Ansätze handelt.

Die Produktionsplanung sowie das hiermit verbundene Produktionssystem umfassen aber im Allgemeinen mehrere, aufeinander aufbauende Schritte bzw. Stufen. Mit fortschreitender Forschung im Kontext der Produktionswirtschaft wurden diese Strukturen schließlich weiter spezifiziert. Daher erfolgt zunächst eine kompakte Darstellung produktionstheoretischer Grundbegriffe. Insbesondere Gutenberg (1983) und Zäpfel (1982) stellen die wichtige Beziehung im Zusammenhang mit der Produktionsplanung ausführlich dar. Hiernach handelt es sich bei Produktion um einen *Transformationsprozess*, bei dem aus Input durch eine – zunächst nicht näher spezifizierte – Bearbeitung, dem sog. Throughput, ein Output entsteht (vgl. Abb. 1.1). *Inputs* sind hierbei *Produktionsfaktoren*, die nach Gutenberg (1983, S. 2 ff.) in Elementarfaktoren – zum Beispiel Roh-, Hilfs-, und Betriebsstoffe, aber auch unmittelbar mit Produktionsprozess verbundene menschliche Arbeitskraft – und Dispositionsfaktoren – wie beispielsweise Tätigkeiten in der

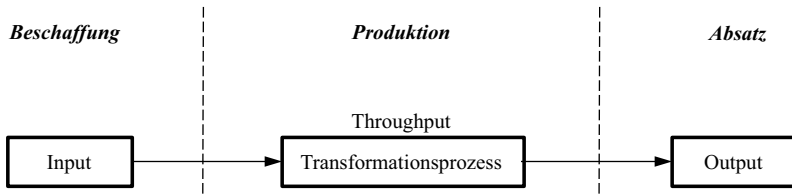


Abbildung 1.1: Abstrahierte Struktur eines Produktionssystems (eigene Darstellung in Anlehnung an Zäpfel 1982, S. 2)

Organisation und der Planung des Produktionsprozesses – unterteilbar sind. Der *Throughput* stellt den eigentlichen Produktionsprozess und somit einen Transformationsprozess dar: Durch eine eindeutig definierte Kombination von Produktionsfaktoren – etwa in Form von Arbeitsvorgängen zur Verarbeitung eines Rohstoffs – werden bestimmte Sach- oder Dienstleistungen erstellt (vgl. Zäpfel 1982, S. 7). Der hierdurch entstehende *Output* stellt das Ergebnis des Produktionsprozesses dar und wird bei Sachleistungsunternehmen als Produkt oder (End-)Erzeugnis bezeichnet (vgl. ebd., S. 2).

Mit der in Abbildung 1.1 dargestellten dreistufigen Struktur eines Produktionssystems geht zudem ein dreischnittiger Planungsprozess einher, der sich in die Bereiche Beschaffung, Produktion und Absatz unterteilen lässt (vgl. Fandel et al. 2011, S. 5 ff.; Corsten und Gössinger 2016, S. 3): Die *Produktionsplanung* fungiert dabei als Verbindung zwischen der Beschaffungs- und der Absatzplanung. Sie umfasst im Allgemeinen sämtliche Aufgaben der Planung und Durchführung der Produktionsaufträge (vgl. Zäpfel 1982, S. 185). Auf der „Eingangsseite“ der Produktion sorgt die *Beschaffungsplanung* – oder auch Bereitstellungsplanung genannt – dafür, dass eine kostenoptimale Bereitstellung aller für den Throughput notwendigen Inputs zur richtigen Zeit und am richtigen Ort stattfindet (vgl. Gutenberg 1983, S. 171; Domschke et al. 1997, S. 10 f.). Die betroffenen Faktoren basieren hierbei auf den auszuführenden Produktionsaufträgen und legen so die benötigten Inputs in Art und Umfang fest. Auf der „Ausgangsseite“ der Produktion ist schließlich die *Absatzplanung* dafür zuständig, alle Outputs den entsprechenden Absatzkanälen zuzuführen (vgl. Zäpfel 1982, S. 49). Zugleich findet eine Abstimmung zwischen Absatz- und Produktionsplanung statt, bei der zu erfüllende Bedarfsmengen für die (End-)Erzeugnisse zur Planung der Produktionsaufträge vorgegeben werden. In diesem Zusammenhang ist zu unterscheiden, was für die Auslösung eines Bedarfs ausschlaggebend ist (vgl. ebd., S. 154 f.):

Primärbedarfe resultieren aus unternehmensexogenen (Kunden-)Nachfragen; *Sekundärbedarfe* entstehen hingegen durch unternehmensinterne Prozesse und Strukturen.

Abbildung 1.1 stellt die Anknüpfungspunkte zwischen Produktions- und Planungsprozess noch einmal dar. Allerdings ist eine strikte Trennung bzw. Zuordnung zu den einzelnen Teilen nicht unbedingt zielführend. Vielmehr müssen hierbei auch mögliche Überschneidungen beachtet werden, die sich insbesondere aus der zeitlichen Ausrichtung einzelner Entscheidungen ergeben. In modernen und computergestützten Planungskonzepten – den sog. Advanced Planning and Scheduling (APS)-Systemen – finden solche Aspekte verstärkt Beachtung; eine detaillierte Darstellung erfolgt in Abschnitt 2.1.3. Die in der vorliegenden Schrift zentrale Losgrößen- und Reihenfolgeplanung lässt sich hiernach in jedem Fall dem Planungsprozess „Produktion“ zuordnen.

Mit der dynamischen Planung von Losgrößen in und entlang einer Wertschöpfungskette haben sich Wirtschaftswissenschaftler bereits Mitte des 20. Jahrhunderts beschäftigt. Ausgehend von einstufigen Losgrößenplanungsmodellen für ein einziges Erzeugnis – zunächst ohne Kapazitätsbeschränkungen (vgl. Wagner und Whitin 1958) – wurde dieses Planungskonzept stetig weiterentwickelt. Dies beginnt mit der Hinzunahme von weiteren Erzeugnissen bei einstufiger Produktion und setzt sich mit einer simultanen Planung von mehreren, über eine mehrstufige Struktur miteinander verbundenen Vor-, Zwischen- und Enderzeugnissen fort. In diesen Fällen wird dann von einer einstufigen Mehrprodukt- bzw. mehrstufigen Mehrprodukt-Losgrößenplanung gesprochen. Dabei sind die Ansätze jeweils in verschiedenen Varianten mit und ohne Berücksichtigung von Kapazitäten vertreten (vgl. Bahl et al. 1987; Karimi et al. 2003). Zumeist wird hier die Minimierung der mit der Losgrößenplanung verbundenen Gesamtkosten, welche sich je nach Auffassung und Auslegung der Problemstellung unterschiedlich zusammensetzen können, verfolgt.

Ende des 20. Jahrhunderts entwickelte sich die Thematik der Losgrößenplanung dann durch die Berücksichtigung von flexiblen Strukturen weiter (vgl. Groote 1994; Jordan und Graves 1995). Sobald die Planung von Losgrößen mehr als ein Produkt umfasst, stellt sich die Frage, ob unter bestimmten Umständen innerhalb der Struktur des Produktionsprozesses alternative Produktionsmöglichkeiten oder parallelisierbare Vorgänge vorhanden und realisierbar sind. Diese zusätzlichen Gegebenheiten liefern, sofern sie bei einer Planung aus technischer und ökonomischer Sicht mit einbezogen werden können, weitere Potentiale zur Verbesserung des Ergebnisses. Durch die gleichzeitige Ausführung eines Produktionsschrittes auf mehreren Ressourcen

ist es beispielsweise möglich, die Durchlaufzeiten zu verkürzen oder durch alternative Zulieferer die Gefahr eines Engpasses zu verringern. An dieser Stelle kommen Konzepte flexibler Planung zum Tragen, um solche Risiken abzumildern (vgl. Graves und Tomlin 2003; Slack 2005; Simchi-Levi und Wei 2012).

Im Kontext von Flexibilität innerhalb eines Produktionsprozesses entwickeln sich die Untersuchungen und Modellierungen stets weiter in Richtung simultaner Losgrößen- und Reihenfolgeplanung, wobei zunehmend auch parallele Ressourcen eine zentrale Rolle einnehmen (vgl. Drexl und Kimms 1997; Quadt 2004). In solchen Zusammenhängen wird zumeist von einer vollständig flexiblen Struktur ausgegangen, was unter anderem beinhaltet, dass jedes Produkt beispielsweise mit jeder Maschine bearbeitet werden kann. Dies ist häufig nur auf interne Unternehmensstrukturen beschränkt. Speziell ist in diesem Zusammenhang ein generalisiertes Losgrößen- und Reihenfolgeplanungsmodell nach Fleischmann und Meyr (1997) sowie dessen Weiterentwicklungen (vgl. etwa Meyr 2000, 2002) zu nennen. Die Klasse von simultanen Losgrößen- und Reihenfolgeproblemen zeichnet sich zudem dadurch aus, dass je nach Variante auch flexible Produktionsprozesse definiert werden können und es verschiedene Ansätze zur Behandlung von Zeitstrukturen gibt.

In Modellen der simultanen Losgrößen- und Reihenfolgeplanung für parallele Ressourcen mit flexibler Struktur wurden die deterministischen Bedarfsmengen bisher jedoch als zeitpunktbezogen angenommen: Eine nachgefragte Menge ist zu einem fest vorgegebenen Zeitpunkt in vorgegebener Höhe zu erfüllen. Dies liegt darin begründet, dass die spezifischen Strukturen denen von Losgrößenplanungsmodellen entlehnt sind. Solche Annahmen bieten aber nur wenig Spielraum für Flexibilität in den Bedarfszeitpunkten.

Im realen Produktionsumfeld handelt der Kunde allerdings häufig anders, indem er zumeist früheste und späteste Zeitpunkte für die Erfüllung seiner geforderten Bedarfe vorgibt (vgl. Lee et al. 2001; Wolsey 2006; Brahimi et al. 2015). Außerdem bestehen für die Produktion bestimmter Güter Vorgaben für den Zeitraum der Herstellung (vgl. Brahimi et al. 2010; Pan et al. 2014): Unter speziell gegebenen Rahmenbedingungen können früheste und/oder späteste Produktionszeitpunkte existieren, die es bei der Planung zu berücksichtigen gilt (vgl. hierzu insbes. Abschnitt 4.3.1). Daher sollen diese Aspekte in Form von *Zeitfenstern* auch innerhalb einer simultanen Planung von mehrstufigen Losgrößen- und Reihenfolgeproblemen für parallele Ressourcen einbezogen werden.

1.3 Ziel und Aufbau der Arbeit

Das Ziel der vorliegenden Schrift ist es, noch offene Forschungslücken in der Theorie der Produktionsplanung – insbesondere im Rahmen der simultanen Losgrößen- und Reihenfolgeplanung – bei Vorliegen flexibler Strukturen aufzuzeigen und zugleich Ansätze zu liefern, die solche bisher unberücksichtigten Aspekte einbeziehen. Im Speziellen werden mathematische Modelle entwickelt, welche die simultane Planung von Losgrößen und deren Reihenfolgen unter Aspekten der Flexibilität innerhalb der Produktion unterstützen. Insbesondere die Modellierung von Zeitfenstern spielt in diesem Zusammenhang eine zentrale Rolle, mit der ein zusätzliches Flexibilitätskonzept für die Erfüllung von Bedarfen resultiert. Dies wirkt sich sowohl auf der Kunden- als auch auf der Produzentenseite positiv aus, indem beide von einer erweiterten Planungsflexibilität im Rahmen von Produktion und Absatz profitieren.

Die Idee sowie das Verständnis solcher Zeitfenster entstammen Planungsansätzen aus der Logistik sowie der Reihenfolgeplanung. Anfangs- und Endzeitpunkte der Zeitfenster sind fest definiert und eine Überlappung dieser Zeiträume von beliebig vielen Perioden wird zugelassen. Die Modellierung in dieser Schrift erfolgt dabei durch ein Loslösen der Bestellmengen von bisher fixierten Zeitpunkten, wodurch Bedarfe innerhalb eines Zeitraums und nicht mehr zeitpunktbezogen befriedigt werden können. Um dieses Ziel zu erreichen, folgt die vorliegende Arbeit der nachstehend aufgezeigten Struktur. Abbildung 1.2 stellt die Kernzusammenhänge ergänzend in einer Übersicht dar.

Zunächst wird in Kapitel zwei mit dem Supply Chain Management der thematische Rahmen für Produktionsplanung im Allgemeinen geschaffen. Die für den Kontext relevanten Aspekte von Flexibilität innerhalb der Produktion erweitern diesen Rahmen, um schließlich grundlegende Überlegungen zur simultanen Losgrößen- und Reihenfolgeproblem anzustreben.

Im dritten Kapitel werden ausgewählte mathematische Modellierungsansätze aus der Literatur vorgestellt. Wesentliche Unterscheidungsmerkmale sind hierbei in der Anzahl der berücksichtigten Produktionsstufen sowie isolierte oder simultane Betrachtungen von Losgrößen und deren Reihenfolgen. Hierbei werden die theoretisch erarbeiteten Modelle stets durch Beispielanwendungen verdeutlicht. Die behandelten Ansätze dienen als Basis für die dann folgenden Entscheidungsmodelle.

Die schrittweise Entwicklung mathematischer Modelle, welche von der Grundstruktur her Losgrößenproblemen mit reihenfolgeabhängigen Rüstvorgängen entlehnt sind, bilden den Kern des vierten Kapitels. Hiermit lassen sich bereits Losgrößen und deren Reihenfolgen simultan planen. Durch