

Fabian Frieze

Multi-kriterielle stochastische kapazitätsbeschränkte Losgrößenplanung

Eine Betrachtung bei unsicherer
Nachfrage

MOREMEDIA



Springer Gabler

Produktion und Logistik

Reihe herausgegeben von

Bernhard Fleischmann, Lehrstuhl Produktion und Logistik, Universität Augsburg, Augsburg, Deutschland

Martin Grunow, TUM School of Management, Technische Universität München, München, Deutschland

Stefan Helber, Institut für Produktionswirtschaft, Universität Hannover, Hannover, Deutschland

Karl Inderfurth, Fakultät Wirtschaftswissenschaften, Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg, Deutschland

Herbert Kopfer, Lehrstuhl für Logistik, Universität Bremen, Bremen, Deutschland

Herbert Meyr, Universität Hohenheim, Stuttgart, Deutschland

Thomas S. Spengler, Produktion und Logistik, TU Braunschweig, Braunschweig, Deutschland

Hartmut Stadler, Institut für Logistik und Transport, Universität Hamburg, Hamburg, Deutschland

Horst Tempelmeier, FB Produktionswirtschaft, Universität Köln, Köln, Deutschland

Gerhard Wäscher, BWL VIII: Management Science, University Magdeburg, Magdeburg, Deutschland

Christian Bierwirth, Wirtschaftswissenschaften Fakultät LS für BW, Universität Halle-Wittenberg, Halle, Deutschland

Katja Schimmelpfeng, Fakultät für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften, Universität Hohenheim, Stuttgart, Deutschland

Moritz Fleischmann, Lehrstuhl für Logistik und SCM, Universität Mannheim, Mannheim, Deutschland

Hans-Otto Günther, Technische Universität Berlin, Berlin, Deutschland

Diese Reihe dient der Veröffentlichung neuer Forschungsergebnisse auf den Gebieten der Produktion und Logistik. Aufgenommen werden vor allem herausragende quantitativ orientierte Dissertationen und Habilitationsschriften. Die Publikationen vermitteln innovative Beiträge zur Lösung praktischer Anwendungsprobleme der Produktion und Logistik unter Einsatz quantitativer Methoden und moderner Informationstechnologie.

Kontakt

Professor Dr. Thomas S. Spengler
Technische Universität Braunschweig
Institut für Automobilwirtschaft und Industrielle Produktion
Mühlenpfordtstraße 23
38106 Braunschweig

Fabian Frieze

Multi-kriterielle stochastische kapazitätsbeschränkte Losgrößenplanung

Eine Betrachtung bei unsicherer
Nachfrage

Fabian Friese
Institut für Produktionswirtschaft
Leibniz Universität Hannover
Hannover, Deutschland

Dissertation an der Leibniz Universität Hannover

ISSN 1431-6846 ISSN 2628-0108 (electronic)
Produktion und Logistik
ISBN 978-3-658-38082-3 ISBN 978-3-658-38083-0 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-38083-0>

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

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2022

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.

Planung/Lektorat: Marija Kojic

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

Vorwort und Danksagung

In den letzten Jahren habe ich mich im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionswirtschaft der Leibniz Universität Hannover mit vielfältigen Aspekten der Produktionsplanung unter Unsicherheit mit einem Schwerpunkt auf die multi-kriterielle Losgrößenplanung unter Nachfrageunsicherheit beschäftigt. Als Ergebnis ist eine Dissertation entstanden, die Entscheidungspersonen in der Produktionsplanung unterstützen kann, indem die vorgestellte Methodik die Konsequenzen von Produktionsplanentscheidungen systematisch aufzeigt und somit eine Positionierung im Spannungsfeld konkurrierender Zielgrößen ermöglicht. Ausgangspunkt ist das klassische kapazitätsbeschränkte Losgrößenplanungsproblem – ein klassisches Optimierungsproblem des Operations Managements, mit welchem sich die Literatur schon seit vielen Jahren in etlichen Variationen auseinandersetzt.

Für die stochastische Variante dieses Problems mit unsicherer Nachfrage wird eine mutli-kriterielle Erweiterung entwickelt, bei welcher Reoptimierungen des Produktionsplans ermöglicht werden und dabei die drei Zielgrößen der Minimierung operativer Kosten, der Minimierung des Lieferverzugs und der Minimierung der Planungsnervosität als gleichwertige Zielgrößen betrachtet werden. Es wird ein interaktiver Ansatz entwickelt, der es Entscheidungspersonen ermöglicht, genau solche Lösungen zu ermitteln, die für sie von besonderer Relevanz sind. Weiterhin wurden Methoden des Spaltengenerierungsverfahrens sowie von Fix&Optimize-Heuristiken kombiniert, um eine Vielzahl Pareto-optimaler Lösungen in akzeptabler Rechenzeit zu generieren. Damit wird der Entscheidungsperson eine ökonomisch fundierte Positionierung im Spannungsfeld dieser Zielgrößen ermöglicht, was mit bisherigen in der Literatur verbreiteten Ansätzen in dieser Form nicht möglich war.

Dieses Werk in seiner finalen Version erscheint nun (so hoffe ich es zumindest) in sich rund, durchgeplant und gut strukturiert. Der Weg dahin sah jedoch vielfach ganz anders aus. Um hierhin zu kommen, bin ich eine Vielzahl an Irrwegen bestritten. Viele Untersuchungen haben sich als nicht zielführend herausgestellt und einige Ansätze, die ich ausprobierte, haben schlichtweg nicht funktioniert. Es gab Zeiten, in denen Arbeitszeit und Arbeitsoutput nicht mehr zu korrelieren schienen und Ideen erst wachsen und reifen mussten, bevor ich sie umsetzen konnte. Diese Zeiten können belastend sein. Das gehört alles zur Forschung dazu und ist eine der wichtigsten Erkenntnisse, die ich während meiner Promotionszeit gewonnen habe. Sollten Sie sich als Leser grade mitten in einer derartigen Promotion befinden, so möchte ich Ihnen Mut machen, weiterzumachen, auch wenn Sie sich grade auf einem derartigen Irrweg befinden sollten. Mir ist in meinem persönlichen Umfeld kein Promotionsverfahren bekannt, welches ohne derartige Längen abgelaufen ist. Am Ende kommt dann ein derartiges Werk bei raus, welches sich darstellen lässt, als sei zu jeder Zeit alles rundgelaufen. Das habe ich selbst zwischendurch nicht geglaubt, hier ist nun aber das Ergebnis.

Ein derartiges Werk wäre nicht möglich ohne die entsprechende Unterstützung. An dieser Stelle möchte ich mich für die umfangreiche Unterstützung bedanken, welche ich von vielen Menschen bekommen habe.

An erster Stelle bedanke ich mich bei meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. Stefan Helber, der mit seiner Betreuung maßgeblich zum Erfolg dieses Promotionsvorhabens beigetragen hat. Sie haben mir den richtigen Weg gewiesen, mich eingefangen, wenn ich drohte, mich in Nebenschauplätzen zu verlieren, mich durch das zielgerichtete Setzen von Deadlines zum Fortschritt animiert und mir durch engmaschige Feedback-Schleifen in der Abschlussphase zum zeitnahen Abschluss des Projektes verholfen. Dafür gebührt Ihnen mein Dank.

Weiterhin bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. Florian Sahling für die Anfertigung eines Gutachtens und das zielgerichtete Feedback zur Rohfassung meiner Dissertation sowie bei Frau Prof. Dr. Judith Christiane Schneider für die Übernahme des Vorsitzes des Prüfungsausschusses. Auch all denjenigen Wissenschaftlern danke ich, die mir mit ihrem Feedback auf wissenschaftlichen Tagungen und Konferenzen neue Ideen und frischen Wind in mein Forschungsprojekt brachten. Allen voran möchte ich hier Prof. Dr. Martin Grunow und Prof. Dr. Horst Tempelmeier hervorheben.

Die Zeit am Institut hat nicht nur fachliche Verbundenheit hervorgebracht, sondern auch freundschaftliche. In diesem Zusammenhang danke ich meinen Doktorbrüdern Dr. André Schnabel und Steffen Rickers für die gemeinsame Zeit sowohl am Institut als auch in der Freizeit. Auch allen Kollegen und Mitstreitern am Institut gebührt mein Dank. Insbesondere Steffen Rickers, der mich als

Schreib-Buddy beim Verfassen der Dissertation begleitete und einen Teil der Dissertation zur Korrektur gelesen hat. Auch Stefan Bugow, Insa Südbeck, Niklas Pöch, Martin Klingebiel und Ariane Kayser haben durch wertvolles Feedback zu Teilen der Dissertationsschrift maßgeblich zum Erfolg beigetragen. Weiterhin danke ich allen ehemaligen wie aktuellen Kollegen, namentlich Justine Broihan, Carolin Kellenbrink, Inka Nozinski, Dr. Cinna Seifi, Dr. Svenja Lagershausen, Dr. Bastian Schmidtman, Luise-Sophie Hoffmann, Lars Heinze sowie Karen Strzyz und Silvia Bertuzies, die mich bei allen Verwaltungsangelegenheiten stets unterstützten. Besonderer Dank gilt auch unseren wissenschaftlichen Hilfskräften, die mich bei der Erstellung von Abbildungen unterstützt haben, insbesondere Marie-Sophie Jeinsen und Zeineb Kyrkianidou-Toumi, sowie allen Studierenden, die an dem Projekt in Form von Abschlussarbeiten mitgewirkt haben.

Ein persönlicher Dank gilt allen Freunden und meiner Familie, die mich während der Erstellung der Dissertation unterstützt haben. Allen voran ist da Christine Borchmann zu nennen, die mich in jeder Phase des Projektes praktisch wie mental unterstützt hat. Dafür bin ich dir ganz besonders dankbar. Weiterhin gilt mein besonderer Dank Michelle Breezmann, die mich insbesondere in der Endphase der Dissertation unterstützt hat und bei allen Höhen und Tiefen geduldig ertragen hat. Weiterhin haben mir insbesondere Christian Diebitsch und Marina Rosebrook die notwendige Energie und den Rückhalt gegeben, meine Dissertation erfolgreich abzuschließen.

Auch bei meiner Familie, allen voran bei meiner Mutter Marita, Oma Marlis und Onkel Manfred, konnte ich stets den Rückhalt finden, der es mir ermöglicht hat, das Projekt erfolgreich abzuschließen.

Hannover
Februar 2022

Fabian Friese

Zum Geleit

Die Planung von Losgrößen ist seit jeher ein wichtiges Feld wissenschaftlicher Arbeit innerhalb der Produktionswirtschaft, sowohl aus akademischer als auch aus praktischer Sicht. Die erste Publikation zu diesem Thema liegt mittlerweile mehr als 100 Jahre zurück. Zwischenzeitlich ist eine geradezu unüberschaubare Zahl von wissenschaftlichen Publikationen zu Problemstellungen und Methoden vorgelegt worden. Diese Methoden finden praktisch Eingang in Softwaresystemen zur Entscheidungsunterstützung im Rahmen der betrieblichen Planung und Steuerung der Produktion. Die dort abzubildenden Probleme sind typischerweise hochgradig individuell und facettenreich, dabei aber aus mathematischer Sicht schwer lösbar, wenn man Lösungen anstrebt, die wirtschaftlich gesehen optimal oder zumindest näherungsweise optimal sind.

Lag in der Vergangenheit ein Fokus der Forschung auf Aspekten der zeitlichen Dynamik der Nachfrage in Verbindung mit den begrenzten betrieblichen Produktionskapazitäten, so rückt seit einiger Zeit ein anderes Problemfeld in den Fokus der Betrachtung. Einerseits sind die den Entscheidungen über die Losgrößen zu Grunde liegenden Informationen, insbesondere über die Nachfrage, vielfach unsicher. Andererseits sind die Entscheidungen selbst regelmäßig in einer rollierenden Art und Weise partiell zu aktualisieren und weiter in die Zukunft fortzuschreiben. Somit können also Entscheidungen in einem begrenzten Umfang revidiert werden. In einer solchen Welt begrenzter Produktionskapazitäten und unsicherer Nachfragen lässt es sich nicht immer vermeiden, dass Kunden nicht fristgerecht beliefert werden, somit auf die Erfüllung ihrer Nachfragen warten müssen. Damit deutet sich bereits an, dass rationale Entscheidungen über Losgrößen durch Unsicherheit und durch Zielkonflikte gekennzeichnet sind, die nur schwer formal zu fassen sind, weil wichtige Präferenzinformationen typischerweise nicht explizit vorliegen.

In diesem Spannungsfeld von wiederholten Entscheidungen unter Unsicherheit findet sich nun die Arbeit von Herrn Friese. In sehr schöner Weise kennzeichnet er zunächst anhand stilisierter Modelle die verschiedenen Aspekte des von ihm betrachteten Losgrößenproblems. Es gelingt ihm, das Problem formal zu fassen und anhand sorgfältig dokumentierter Beispielrechnungen die verschiedenen relevanten Beziehungen zu kennzeichnen. Er verbindet dazu in seinen Modellen die Aspekte der Dynamik, der Beschränktheit der betrieblichen Produktionskapazitäten, der Unsicherheit, der Mehr-Zielorientierung und der mehrstufigen Entscheidung. Dies führt zu einem Instrument, mit dem der Entscheidungsträger in systematischer Art und Weise Klarheit gewinnt, zum einen über seine eigenen Präferenzen und zum anderen über ökonomisch rationale Handlungsweisen. Dies befähigt ihn, betriebliche Kosten zu senken, Wartezeiten der Kunden zu reduzieren und dabei gleichzeitig die Nervosität des Planungssystems und des resultierenden Produktionsgeschehens zu dämpfen.

Aus meiner Sicht hat Herr Friese damit eine außerordentlich erfreuliche Dissertation vorgelegt, die gleichermaßen durch methodische Klarheit und praktische Relevanz besticht und nach meiner Überzeugung eine sehr gute Aufnahme in der wissenschaftlichen Diskussion finden wird.

Hildesheim
den 2. April 2022

Prof. Dr. Stefan Helber

Kurzfassung

Diese Dissertation diskutiert die Anwendung von Methoden der multi-kriteriellen Optimierung zur stochastischen kapazitätsbeschränkten Losgrößenplanung bei dynamischer und zufälliger Nachfrage. Bei dieser Problemstellung ist die Minimierung der operativen Kosten nicht die einzige mögliche Zielsetzung. Die Minimierung der Verspätung bei der Bedienung der Kundennachfrage ist nicht weniger relevant. Außerdem sind Entscheidungspersonen an langfristiger Planbarkeit der Produktion sowie an Planungsstabilität interessiert. Zur simultanen Berücksichtigung dieser drei Zielsetzungen wird eine multi-kriterielle Formulierung des stochastischen kapazitätsbeschränkten Losgrößenplanungsproblems (MO-SCLSP) entwickelt. Die Ermittlung mehrerer Pareto-optimaler Lösungen erlaubt es Entscheidungspersonen, sich ökonomisch fundiert im Spannungsfeld der Priorisierung geringer operativer Kosten, hoher Lieferzuverlässigkeit und geringer Planungsnervosität zu positionieren.

Das multi-kriterielle Problem wird in einem interaktiven Optimierungsansatz in multiplen Entscheidungsstufen gelöst. Die Prognose der unsicheren Nachfrage wird dabei gemäß des Martingale Model of Forecast Evolution im Zeitablauf angepasst. Somit werden bereits beobachtete Nachfrageinformationen systematisch berücksichtigt. Dies ermöglicht die Anpassung des Produktionsplans an die bisher bekannten Nachfragerealisationen.

Zur Ermittlung von Schranken einer großen Anzahl attraktiver Pareto-optimaler Lösungen, aus denen die Entscheidungsperson auswählen kann, wird ein heuristischer Ansatz zur Lösungsgenerierung entwickelt. Dabei werden mit einem Spaltengenerierungsansatz untere Schranken ermittelt. Zur Ermittlung

oberer Schranken wird das aus der Lösung der Spaltengenerierung ableitbare reduzierte Problem mittels eines auf Fix&Optimize-Heuristiken basierenden Lösungsansatzes gelöst.

Schlüsselworte: Stochastische Losgrößenplanung · Kapazitätsrestriktionen · multi-kriterielle Optimierung · Planungsnervosität · Servicegrade

Abstract

In this thesis methods from multi-objective optimization are applied to stochastic capacitated lot sizing problems subject to dynamic and random demand. Minimizing operational costs is not the only conceivable objective function in such a problem setting. Minimizing tardiness in customer demand satisfaction is no less important. Additionally, the decision maker is interested in production plan stability. Those three objectives are simultaneously taken into account in a multi-objective model formulation of the Stochastic Capacitated Lot Sizing Problem (MO-SCLSP). By determining a set of Pareto-optimal solutions, the decision maker is able to identify a promising compromise solution and to take an informed and economically reasonable position between prioritizing low operational costs, high delivery reliability and low production plan nervousness.

The multi-objective problem is solved with an interactive solution approach with multiple decision stages. The demand forecasts are updated periodically according to the Martingale Model of Forecast Evolution, systematically taking into account already realized demand information. Based on these demand observations the production plan can be adjusted.

A heuristic approach is applied to determine bounds of a large number of efficient Pareto-optimal solutions for the decision maker to select from. Lower bounds are determined with a column generation approach. A reduced problem is derived from the terminal solution of the column generation approach, which is solved with Fix&Optimize heuristics to generate upper bounds.

Key words: Stochastic lot sizing · capacity constraints · multi-objective optimization · production plan nervousness · service levels

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Forschungsfrage und Forschungsbeitrag	3
1.3	Aufbau der Arbeit	5
2	Einordnung der Problemstellung und Überblick über die Literatur	7
2.1	Bedeutung der Losgrößenplanung in der kapazitätsorientierten Produktionsplanung und -steuerung	7
2.2	Losgrößenplanung unter Unsicherheit mit mehreren Zielsetzungen	10
2.3	Produktionsplanung in rollierenden Planungshorizonten bei Fortschreibung von Nachfrageprognosen	15
3	Modellierung stochastischer Losgrößenplanungsprobleme	17
3.1	Beschreibung der Planungssituation	17
3.2	Berücksichtigung von Unsicherheit	19
3.3	Konfligierende Zielsetzungen	22
3.4	Konzeptionelles Grundmodell des stochastischen kapazitätsbeschränkten Losgrößenplanungsproblems (SCLSP) bei unsicherer Nachfrage	25
4	Uni-kriterielle Modelle für die stochastische Losgrößenplanung bei unsicherer Nachfrage	29
4.1	Überführung des multi-kriteriellen Problems in uni-kriterielle Modelle	29

4.2	Beschränkung von Fehlmengen, Fehlbeständen und Verspätungen	30
4.2.1	Relative Servicegradmaße	30
4.2.2	Mittlere Verspätung zur Beurteilung der Liefertreue	32
4.2.3	Zusammenhänge zwischen der mittleren Verspätung und relativen Servicegradmaßen	36
4.3	Starre stochastische Losgrößenplanung bei normalverteilter Nachfrage mit δ -Servicegrad-Restriktionen nach Helber et al. (2013)	38
4.3.1	Problembeschreibung und konzeptionelle Modellformulierung	38
4.3.2	Stückweise lineare Approximation der Bestandsfunktionen im $SCLSP_{\delta,static}^{PLA}$	40
4.4	Optimierung und Beschränkung von Erwartungswerten in der uni-kriteriellen stochastischen Losgrößenplanung mit starrten Produktionsplänen	45
5	Eine multi-kriterielle Modellformulierung des stochastischen Losgrößenplanungsproblems (MO-SCLSP)	49
5.1	Grundlagen der multi-kriteriellen Optimierung	49
5.1.1	Simultane Optimierung mehrerer Zielfunktionen	49
5.1.2	Vergleich von Lösungen bei konfligierenden Zielsetzungen	50
5.1.3	Bestimmung von Schranken des Pareto-optimalen Bereichs	53
5.1.4	Auswahl von Lösungen anhand von Präferenzangaben	54
5.2	Pareto-Optimalität in der stochastischen Losgrößenplanung	56
5.3	Anpassung von Produktionsplänen an Nachfragerealisierungen	61
5.3.1	Reoptimierung des Produktionsplans in multiplen Entscheidungsstufen	61
5.3.2	Fortschreibung von Nachfrageprognosen	64
5.3.3	Unterteilung des Planungshorizontes	69
5.4	Modellierung der Zielsetzungen des MO-SCLSP	72
5.4.1	Modellierung von operativen Kosten	72
5.4.2	Modellierung von Liefertreue	72
5.4.3	Modellierung von Planungsnervosität	74
5.5	Multi-kriterielle stückweise lineare Modellformulierung des MO-SCLSP	80

6 Eine interaktive Methode zur Lösung des multi-kriteriellen stochastischen Losgrößenplanungsproblems in multiplen Entscheidungsstufen	85
6.1 Argumente für interaktive Lösungsansätze in der multi-kriteriellen Optimierung	85
6.2 Skalarisierungsmethoden zur Erzeugung Pareto-optimaler Lösungen	87
6.2.1 Bestimmung Pareto-optimaler Ideal-Lösungen	87
6.2.2 Bestimmung Pareto-optimaler Lösungen mit der multidimensionalen ε -Constraint-Methode	90
6.2.3 Bestimmung Pareto-optimaler Lösungen mit der Gewichtete-Summen-Methode	95
6.3 Algorithmischer Ablauf der interaktiven Methode in multiplen Entscheidungsstufen	102
6.4 Numerische Experimente mit dem mehrstufig-interaktiven Planungsansatz zur multi-kriteriellen stochastischen Losgrößenplanung	106
6.4.1 Interaktion zwischen Planungsalgorithmus und Entscheidungsperson in einer beispielhaften Entscheidungsstufe	106
6.4.2 Manuelle Auswahl Pareto-optimaler Lösungen über multiple Entscheidungsstufen	114
6.4.3 Automatisierte Auswahl Pareto-optimaler Lösungen über multiple Entscheidungsstufen	120
7 Approximative Bestimmung der Pareto-Front in der multi-kriteriellen stochastischen Losgrößenplanung	125
7.1 Rechenaufwand zur Lösung multi-kriterieller stochastischer Losgrößenplanungsprobleme	125
7.1.1 Komplexität der Erzeugung Pareto-optimaler Lösungen	125
7.1.2 Anforderungen an die Lösungsgüte	126
7.2 Bestimmung unterer Schranken durch Lösung der Dantzig-Wolfe-Reformulierung des MO-SCLSP mit einem Spaltengenerierungsverfahren	128
7.2.1 Besondere Eignung der Spaltengenerierung zur Bestimmung unterer Schranken Pareto-optimaler Lösungen für das MO-SCLSP	128

7.2.2	Transformation des MO-SCLSP $_{\epsilon}^{PLA}$ in Master- und Subprobleme	132
7.2.3	Initialisierung des Spaltengenerierungsverfahrens	136
7.2.4	Ablauf des Spaltengenerierungsverfahrens	137
7.3	Bestimmung oberer Schranken durch heuristische Lösung des reduzierten Ausgangsproblems des MO-SCLSP mit Fix&Optimize-Heuristiken	139
7.3.1	Fix&Optimize-Heuristiken zur Bestimmung oberer Schranken für gemischt-ganzzahlige Optimierungsprobleme	139
7.3.2	Anwendung der Fix&Optimize-Heuristik auf das reduzierte MO-SCLSP $_{\epsilon}^{PLA}$	141
7.4	Numerische Experimente zur approximativen Bestimmung der Pareto-Front	152
7.4.1	Aufwand zum Lösen der Subprobleme im Rahmen des Spaltengenerierungsverfahrens	152
7.4.2	Ermittlung unterer Schranken mit dem Spaltengenerierungsverfahren und oberer Schranken durch Lösung des reduzierten Ausgangsproblems	154
7.4.3	Ermittlung oberer Schranken mit Fix&Optimize-Heuristiken für das reduzierte Problem	162
7.4.4	Einfluss des Nervositätslevels bei praxisrelevanten Probleminstanzen	169
7.4.5	Diskussion der Ergebnisse	173
7.4.6	Diskussion weiterer Verbesserungspotentiale	174
8	Schlussbetrachtung	177
8.1	Zusammenfassung und betriebswirtschaftliche Bewertung	177
8.2	Ausblick	179
	Literaturverzeichnis	185

Abkürzungsverzeichnis

CLSP	Kapazitätsbeschränktes Losgrößenproblem (engl.: <i>Capacitated Lot-Sizing Problem</i>)
CVaR	Conditional Value at Risk
GE	Geldeinheiten
GSM	Gewichtete-Summen-Methode
KE	Kapazitätseinheiten
LP	Lineares Problem (engl.: <i>Linear Program</i>)
ME	Mengeneinheiten
MILP	Gemischt-ganzzahliges lineares Problem (engl.: <i>Mixed-Integer Linear Program</i>)
MMFE	Martingalmodell der Prognoseentwicklung (engl.: <i>Martingale Model of Forecast Evolution</i>)
MO-SCSLP	Multi-kriterielles stochastisches kapazitätsbeschränktes Losgrößenproblem (engl.: <i>Multi-Objective Stochastic Capacitated Lot-Sizing Problem</i>)
MP	Masterproblem (engl.: <i>Master Problem</i>)
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
RMP	Reduziertes Masterproblem (engl.: <i>Reduced Master Problem</i>)
SCSLP	Stochastisches kapazitätsbeschränktes Losgrößenproblem (engl.: <i>Stochastic Capacitated Lot-Sizing Problem</i>)
SSIULSP	Nicht-kapazitätsbeschränktes stochastisches Ein-Produkt-Losgrößenproblem (engl.: <i>Stochastic Single-Item Uncapacitated Lot Sizing Problem</i>)
ZE	Zeiteinheiten

Symbolverzeichnis

b_t	Normalkapazität der Produktionsressource in Periode t
bc_k	Linearer Fehlbestandskostensatz von Produkt k
BL_{kt}	Fehlbestand von Produkt k am Ende von Periode t
BO_{kt}	Fehlmenge von Produkt k am Ende von Periode t
c_{km}	Kosten für Plan m von Produkt k
c_k^*	Kosten für den kostenminimalen Plan für Produkt k
cp_{ktl}	Kumulierte Produktion von Produkt k in den Perioden 1 bis t am Ende von Segment l
d_{kt}	Deterministische Nachfrage nach Produkt k in Periode t
D_{kt}	Zufällige Nachfrage nach Produkt k in Periode t
D_{kt}^τ	Prognose der Nachfrage von Produkt k in Periode t aus Sicht von Periode τ
\hat{d}_{kt}	Initiale Nachfrageprognose von Produkt k in Periode t
\bar{d}_{kt}	Nachfragerealisation von Produkt k in Periode t
δ_k	δ -Servicegrad von Produkt k
Δ	Reoptimierungsintervall
eb_{lktl}	Erwarteter Fehlbestand von Produkt k in Periode t am Ende von Segment l
eyp_{ktl}	Erwarteter physischer Bestand von Produkt k in Periode t am Ende von Segment l
ε	Schrittweite bei der ε -Constraint Methode
f^{asp}	Anspruchslevel von Zielfunktion f
f^{ideal}	Ideal-Wert von Zielfunktion f
f^{nadir}	Nadir-Wert von Zielfunktion f

g_k	Gewichtungsfaktor für die Ermittlung der gewichtet gemittelten mittleren Verspätung
$h_n^{fix_Q}$	Zeitraum der Fixierung der Produktionsmengen in Nervositätslevel n
$h_n^{fix_x}$	Zeitraum der Fixierung der Produktionszeitpunkte in Nervositätslevel n
h^{look}	Vorgriffshorizont
hc_k	Kostensatz der Lagerung einer Einheit von Produkt k je Periode
k	Produkte ($k \in \{1, \dots, K\}$)
\mathcal{KT}^{fix}	Menge der 2-Tupel (k, t) , deren binären Rüstvariablen temporär auf den Wert der besten bekannten Lösung fixiert sind
\mathcal{KT}^{cg}	Menge der 2-Tupel (k, t) , deren Produktionsplanentscheidungen dauerhaft auf den terminalen Wert aus dem Spaltengenerierungsverfahren fixiert sind
\mathcal{KT}^{nerv}	Menge der 2-Tupel (k, t) , deren binären Rüstvariablen dauerhaft zur Einhaltung des angestrebten Nervositätslevels fixiert sind
\mathcal{KT}^{past}	Menge der 2-Tupel (k, t) , die in der Vergangenheit liegen und daher fixierte Werte für die Produktionsplanentscheidungen annehmen
l	Linearsegmente ($l \in \{1, \dots, L\}$)
m	Produktionspläne für Produkt k ($m \in \mathcal{P}_k$)
M	BigM-Parameter
MT	Mittlere Verspätung
MT^{mit}	Gewichteter Mittelwert der mittleren Verspätung
MT^{max}	Maximale mittlere Verspätung
n	Diskrete Nervositätslevels ($n \in \{1, \dots, N\}$)
nc_n	Diskreter Nervositätskostensatz von Nervositätslevel n
N^*	Gewähltes Nervositätslevel ($N^* \in \mathbb{N}_0$)
O_t	Beanspruchte Überkapazität in Periode t ($O_t \geq 0$)
o_t^{max}	Maximale Zusatzkapazität in Periode t
oc	Kostensatz für eine Einheit Zusatzkapazität
p	Aktuelle Periode ($p \in \mathcal{T}$)
π_t	Dualwert der koppelnden Kapazitätsrestriktionen in Periode t
ϕ_k	Dualwert der Konvexitätsrestriktion von Produkt k
Q_{kt}	Produktionsmenge von Produkt k in Periode t ($Q_{kt} \geq 0$)
\overline{Q}_{kt}	Produktionsmengen im aktuellen Produktionsplan
\hat{Q}_{kt}	Produktionsmengen in der terminalen Lösung des Spaltengenerierungsverfahrens
ρ_{MT}	Kleine Zahl zur Bewertung der Übererfüllung des Anspruchsniveaus der mittleren Verspätung

S_{MT}	Übererfüllung des Anspruchsniveaus der mittleren Verspätung
sc_k	Kostensatz je Rüstvorgang für Produkt k
t	Perioden ($t \in \{1, \dots, T\}$)
tm_{kmt}	Kapazitätsbeanspruchung durch Plan m für Produkt k in Periode t
tp_k	Stückbearbeitungszeit für Produkt k
ts_k	Rüstzeit für Produkt k
θ	Anzahl der Perioden mit Anpassungen der Nachfrageprognose
V_n	Binäre Hilfsvariable, die den Wert 1 annimmt, wenn Nervositätslevel n oder höher gewählt wird ($V_n \in \{0; 1\}$)
V_t	Beanspruchte Strafkapazität in Periode t
vc	Strafkostensatz für beanspruchte Strafkapazität
W_{ktl}	Dem Segment l zugeordnete kumulierte Produktionsmenge von Produkt k in den Perioden 1 bis t
X_{kt}	Rüstzustand von Produkt k am Ende von Periode t ($X_{kt} \in \{0; 1\}$)
\overline{X}_{kt}	Rüstmuster im aktuellen Produktionsplan
\check{X}_{kt}	Rüstmuster in der terminalen Lösung des Spaltengenerierungsverfahrens
\hat{X}_{kt}	Rüstmuster der besten bekannten Lösung im aktuellen Subproblem
Y_{k0}	Lageranfangsbestand von Produkt k
Y_{kt}	Nettolagerbestand von Produkt k am Ende von Periode t
$Y P_{kt}$	Physischer Lagerbestand von Produkt k am Ende von Periode t
ψ_{kt}^τ	Anpassungsschritt in Periode τ der Nachfrageprognose von Produkt k in Periode t
$\overline{\psi}_{kt}^\tau$	Beobachteter Anpassungsschritt in Periode τ der Nachfrageprognose von Produkt k in Periode t
ω_{km}	Auswahlvariable für Plan m von Produkt k
Ω^K	Anzahl gleichzeitig betrachteter Produkte in Fix&Optimize-Heuristik
Ω^T	Anzahl gleichzeitig betrachteter Perioden in Fix&Optimize-Heuristik
ζ	Länge der betrachteten Perioden