

---

# Produktion und Logistik

## **Herausgegeben von**

B. Fleischmann, Augsburg

M. Grunow, München

H.-O. Günther, Berlin

S. Helber, Hannover

K. Inderfurth, Magdeburg

H. Kopfer, Bremen

H. Meyr, Hohenheim

Th. S. Spengler, Braunschweig

H. Stadtler, Hamburg

H. Tempelmeier, Köln

G. Wäscher, Magdeburg

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.

**Herausgegeben von**

Professor Dr. Bernhard Fleischmann  
Universität Augsburg

Professor Dr. Herbert Meyr  
Universität Hohenheim

Professor Dr. Martin Grunow  
Technische Universität München

Professor Dr. Thomas S. Spengler  
Technische Universität Braunschweig

Professor Dr. Hans-Otto Günther  
Technische Universität Berlin

Professor Dr. Hartmut Stadler  
Universität Hamburg

Professor Dr. Stefan Helber  
Universität Hannover

Professor Dr. Horst Tempelmeier  
Universität Köln

Professor Dr. Karl Inderfurth  
Universität Magdeburg

Professor Dr. Gerhard Wäscher  
Universität Magdeburg

Professor Dr. Herbert Kopfer  
Universität Bremen

**Kontakt**

Professor Dr. Hans-Otto Günther  
Technische Universität Berlin  
H 95, Straße des 17. Juni 135  
10623 Berlin

---

Markus Meiler

# Integrierte Kampagnen- planung in logistischen Netzwerken der chemischen Industrie

Mit einem Geleitwort von Prof. Dr. Hans-Otto Günther



Springer Gabler

**RESEARCH**

Markus Meiler  
Leichlingen, Deutschland

Dissertation Technische Universität Berlin, 2012

D 83

ISBN 978-3-8349-4374-3

ISBN 978-3-8349-4375-0 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-8349-4375-0

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

© Gabler Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden 2012

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 Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

*Einbandentwurf:* Künkellopka GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Gabler ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.

[www.springer-gabler.de](http://www.springer-gabler.de)

# Geleitwort

In vielen Industriezweigen sind in den letzten Jahren komplexe logistische Netzwerke entstanden, die Produktionsstandorte in unterschiedlichen Ländern umfassen. Diese Entwicklung ist zunehmend auch in der chemisch-pharmazeutischen Industrie zu beobachten. Mit der fortschreitenden logistischen Vernetzung erhöht sich die Planungskomplexität beträchtlich. Daher werden heute überwiegend computergestützte Planungssysteme eingesetzt, welche sowohl die netzwerkweite Kampagnenplanung als auch die standortbezogene Detailplanung mit Hilfe von quantitativen Methoden unterstützen. Diesem Problemkomplex widmet sich die Arbeit von Herrn Dr. Meiler, wobei er eine reale Anwendung aus der chemisch-pharmazeutischen Industrie als Untersuchungsfall aufgreift.

Das betriebswirtschaftliche Schrifttum konzentriert sich bisher überwiegend auf Fragestellungen der stückgutorientierten Fertigung. Mit der Untersuchung der Kampagnenplanung in der chemisch-pharmazeutischen Industrie greift Herr Dr. Meiler ein bisher zu Unrecht vernachlässigtes betriebswirtschaftliches Forschungsgebiet auf. Gleichzeitig leistet er einen wesentlichen Beitrag zur theoretischen Fundierung von sog. Advanced Planning Systemen, die heute zunehmend zur Unterstützung des Supply Chain Management in vielen Industriezweigen zum Einsatz kommen.

Die von Herrn Dr. Meiler entwickelte Modellierung der netzwerkweiten Kampagnenplanung mit Hilfe disjunktiver Graphen beruht auf einem starken theoretischen Fundament, das aus dem Job-Shop-Scheduling übernommen und im Hinblick auf die Kampagnenplanung zielgerichtet angepasst und erweitert wird. Diese Modellierung berücksichtigt die Materialflussbeziehungen innerhalb des Netzwerkes, mögliche Ressourcenkonflikte sowie die relevanten Kostenbewertungen der netzwerkweiten Produktions- und Transportaktivitäten. Zudem wird ein neuartiges lineares Optimierungsmodell entwickelt, das auf der Modellierung des Job-Shop-Scheduling Problems mit Hilfe disjunktiver Graphen beruht und problemadäquate Aggregationstechniken einbezieht. Diese zeitkontinuierliche Modellformulierung ist bisher aus der wissenschaftlichen Literatur nicht bekannt und muss daher als wesentlicher Beitrag für die modellgestützte Kampagnen-

nenplanung angesehen werden. Für die Anwendung auf besonders großen Problem-  
instanzen wird ein heuristischer Lösungsansatz unter Rückgriff auf das Lösungsprinzip  
der bekannten Shifting-Bottleneck-Heuristik vorgestellt. Die vorgeschlagene iterative  
Vorgehensweise beginnt mit der Ressourcenauswahl und der Ablaufplanung für die  
identifizierte Engpassressource. Anschließend erfolgt die Auswahl der Produktionspfade  
für die einzelnen Bedarfsэлеmente. Dieser konzeptionell neuartige heuristische Lösungsansatz bereichert die wissenschaftliche Literatur.

Zudem zeigt Herr Dr. Meiler Wege zur softwaretechnischen Implementierung der  
Lösungsverfahren auf und weist in umfangreichen numerischen Untersuchungen deren  
Praktikabilität nach. Als Testumgebung dient ein abstrahierter Praxisfall der mehrstufigen  
Kampagnenplanung aus der chemisch-pharmazeutischen Industrie. Die numerischen  
Ergebnisse machen deutlich, dass der Anwendung von Optimierungsmodellen und deren  
Lösung mit Hilfe von Standardoptimierungssoftware Grenzen gesetzt sind. Das Rechenzeitverhalten des entwickelten heuristischen Lösungsverfahrens ist dagegen  
ausgesprochen günstig und auch für praktische Anwendungsfälle akzeptabel.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass Herr Dr. Meiler in seiner Untersuchung ein  
wichtiges Thema behandelt, das bisher in der wissenschaftlichen Literatur zu Unrecht  
vernachlässigt wurde. Dies gilt sowohl für die Anwendung quantitativer Planungsmethoden  
im Rahmen der Kampagnenplanung als auch für die netzwerkweite Koordination der  
Produktionsaktivitäten, die im Rahmen des Supply Chain Management in der Industrie  
erhebliche Beachtung gefunden hat. Die wissenschaftlichen Leistungen von Herrn Dr. Meiler  
bestehen nicht nur in einer theoretisch fundierten Modellbetrachtung, sondern auch in der  
Entwicklung effizienter und praxisgerechter Lösungsverfahren. Gemessen am Stand der  
internationalen Forschung stellen die von Herrn Dr. Meiler erarbeiteten Planungsansätze  
bemerkenswerte Beiträge dar. Insofern ist die vorgelegte Schrift für die industrielle Praxis  
gleichermaßen lesenswert wie für einschlägig orientierte Wissenschaftler. Ich wünsche daher  
der Arbeit eine weite Verbreitung und eine interessierte Leserschaft.

Prof. Dr. H.O. Günther

# Vorwort

Im Rahmen eines mehrjährigen Forschungsprojektes an der Technischen Universität Berlin zum Thema „Supply Chain Management in der Prozessindustrie“ konnte ich mich eingehend mit der besonderen Charakteristik chemisch-pharmazeutischer Produktionsnetzwerke auseinandersetzen. Ein besonderes Augenmerk lag dabei in der Erforschung und prototypischen Erprobung geeigneter Planungsverfahren für eine mehrstufige, mittelfristige Produktionsplanung in einem global verteilten Produktionsnetzwerk der chemischen Industrie. Die daraus resultierenden Ergebnisse sind in dieser Arbeit zusammengefasst.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr. H.O. Günther, der mir die Gelegenheit zur wissenschaftlichen Bearbeitung dieses Forschungsthemas am Lehrstuhl für Produktionsmanagement der Technischen Universität Berlin ermöglichte. In besonderer Erinnerung bleiben mir die vielen wertvollen und inspirierenden Diskussionen und seine richtungsweisenden fachlichen Ratschläge, die eine erfolgreiche Fertigstellung dieser Arbeit unterstützten. Außerdem ermöglichte mir die Teilnahme an nationalen und internationalen Fachtagungen die eigenen Erkenntnisse einer breiten Forschungsgemeinschaft zu präsentieren und dabei interessante Kontakte zu knüpfen. Ein weiterer Dank geht an Prof. Dr. M. Grunow, der die Entstehungsphase stets mit konstruktiver und offener Kritik begleitete und die Arbeit als Zweitgutachter betreute, sowie an Prof. Dr. R. Kasperzak für seine bereitwillige Zusage den Vorsitz des Promotionsausschusses zu übernehmen.

In besonders positiver Erinnerung bleibt mir die Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl und der freundschaftliche und hilfsbereite Umgang aller Kollegen. Ich möchte mich u.a. bei Ulf Neuhaus, Ihsan Onur Yilmaz, Matthias Lehmann, Reinhard Hübner, Rico Gujjula, Mario Lueb und Andreas Schöpferl für die kollegiale und fachliche Unterstützung bedanken. Ein weiterer Dank geht an die ehemaligen Forschungstutoren Jenny Golz, Sebastian Werk und Jan Dörmer, die mich während der umfangreichen Programmierarbeiten entlasteten.

Ein herzliches Dankeschön geht an meine Eltern Elfriede und Hubert Meiler, deren langjährige Unterstützung und Rückhalt ich die Grundlage für diese Ausbildung verdanke. Mein größter Dank allerdings geht an meine liebe Ehefrau Marion und an meine beiden Töchter Annika und Silja. Sie waren während all der Jahre stets für mich da und mussten besonders in der letzten Phase auf viele Stunden wertvolle Freizeit mit ihrem Ehemann und Vater verzichten. Ihnen sei dieses Buch gewidmet.

Markus Meiler



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>XV</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>XIX</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Untersuchungsgegenstand .....	2
1.2 Vorgehen.....	4
<b>2 Supply Chain Management in der chemisch-pharmazeutischen Industrie .....</b>	<b>7</b>
2.1 Wirtschaftliche Bedeutung der chemisch-pharmazeutischen Industrie .....	11
2.2 Branchencharakteristika der chemischen Industrie .....	14
2.2.1 Typologische Merkmale chemischer Produktionsnetzwerke .....	16
2.2.1.1 Einstufige Sortenproduktion .....	16
2.2.1.2 Mehrstufige Produktion auf Mehrzweckanlagen.....	17
2.2.1.3 Produktion in vernetzten Kampagnen .....	18
2.2.2 Materialströme in Produktionsnetzwerken .....	19
2.2.3 Produktionssysteme und Anlagenfahrweise .....	21
2.2.4 Kampagnenplanung auf Mehrzweckanlagen .....	23
2.3 Stufen hierarchischer Produktionsplanung .....	24
2.3.1 Supply Netzwerk Design .....	27
2.3.2 Bedarfsplanung .....	28
2.3.3 Mehrstufige Bestandsplanung.....	29
2.3.4 Supply-Netzwerk-Planung.....	31
2.3.5 Detaillierte Produktionsplanung .....	32

---

2.3.6	ATP und CTP.....	32
2.4	Übersicht über Forschungsaktivitäten .....	34
2.4.1	Produktionsplanung in der Prozessindustrie.....	34
2.4.1.1	Sequenziell-hierarchische Lösungsansätze.....	36
2.4.1.2	Integrativ-simultane Lösungsansätze.....	37
2.4.1.3	Netzwerkweite Kampagnenplanung .....	38
2.4.2	Enterprise-wide Optimization in der Prozessindustrie .....	39
2.4.3	Einordnung des vorgestellten Verfahrens und Vorteile.....	41
2.5	Produkt-Prozess-Netzwerk-Darstellung chemischer Produktionsnetzwerke .	43
<b>3</b>	<b>Methodische Ansätze zur Ablaufoptimierung .....</b>	<b>47</b>
3.1	Job-Shop-Scheduling.....	49
3.1.1	Klassisches Job-Shop-Problem.....	49
3.1.1.1	Definition der Problemklasse .....	50
3.1.1.2	Darstellung als disjunktiver Graph .....	53
3.1.2	Kampagnen-Scheduling-Problem.....	60
3.1.3	Auftragsbasiertes Kampagnen Job-Shop-Scheduling Problem .....	64
3.2	Überblick Lösungsverfahren.....	67
3.2.1	Lineare und (gemischt) ganzzahlige lineare Optimierung.....	67
3.2.1.1	Historische Entwicklung der algorithmischen linearen Optimierung 70	
3.2.1.2	MILP-basierte Optimierung von Produkt-Prozess-Netzwerken.....	74
3.2.1.3	MILP-basierte Optimierung von Job Shop Problemen .....	78
3.2.2	Heuristische Lösungsmethoden .....	80
3.2.2.1	Nachbarschaftssuche in disjunktiven Graphen.....	81
3.2.2.2	Shifting Bottleneck Verfahren .....	87
3.3	Zusammenfassung .....	91

---

<b>4</b>	<b>Kampagnenplanung im Rahmen der Supply-Netzwerk-Planung.....</b>	<b>93</b>
4.1	Planung vernetzter Kampagnen .....	96
4.1.1	Abgrenzung des Produktionsnetzwerkes .....	96
4.1.2	Beschreibung der Problemstellung .....	102
4.1.3	Koordinationsbedarf in der Kampagnenplanung .....	105
4.2	Vorbereitende Datenaufbereitung .....	107
4.2.1	IT-gestützte Supply Netzwerk Analyse .....	108
4.2.1.1	Definition lokaler und globaler Zwischenprodukte .....	108
4.2.1.2	Definition von Task Kaskaden .....	109
4.2.1.3	Definition von Produktionspfaden.....	114
4.2.2	Demand Preprocessing .....	116
4.2.2.1	Definition von Bedarfselementen .....	116
4.2.2.2	Definition individualisierter Produktionselemente .....	117
4.2.2.3	Definition von Produktionsbäumen .....	119
4.2.2.4	Definition der Offset-Werte $\Delta^{\min}$ und $\Delta^{\max}$ .....	120
4.3	Kampagnenplanung .....	126
4.3.1	Aufbau des Routing-Graphen .....	126
4.3.2	Kampagnen-Fluss-Problem .....	128
4.3.3	Job-Shop basierte Kampagnenplanung.....	131
4.3.3.1	Erweiterter disjunktiver Routing-Graph .....	132
4.3.3.2	Weitere Anforderungen an eine vernetzte Kampagnenplanung .....	134
4.3.4	Lösung des auftragsbezogenen Kampagnen-Scheduling Problems .....	138
4.4	Zusammenfassung .....	143

<b>5</b>	<b>Implementierung des Planungssystems .....</b>	<b>145</b>
5.1	MILP-Modell des auftragsbasierten Kampagnen-Scheduling Problems.....	145
5.2	Heuristische Ansätze für die auftragsbasierte Kampagnenplanung .....	156
5.2.1	Vorüberlegungen zum Einsatz heuristischer Verfahren .....	157
5.2.1.1	Initiale Erstellung eines azyklischen disjunktiven Graphen .....	157
5.2.1.2	Kampagnenplanung durch die Umorientierung von Disjunktionen ..	162
5.2.1.3	Konzept einer Heuristik für die Kampagnenplanung .....	165
5.2.2	Grundlegende Algorithmen für die Kampagnenplanung.....	167
5.2.2.1	Methode zur Bestimmung der frühesten und spätesten Anfangszeitpunkte aller Produktionselemente .....	167
5.2.2.2	Bestimmung der möglichen Startzeitpunkte der Kampagnen einer Ressource.....	172
5.2.2.3	Methode zur iterativen Kampagnenplanung auf allen Ressourcen ..	177
5.2.2.4	Quantitative Bewertung erzielter Teillösungen .....	181
5.2.3	Engpassorientierte Heuristik für die vernetzte Kampagnenplanung .....	183
5.2.3.1	Aufbau der Heuristik für die Kampagnenplanung.....	184
5.2.3.2	Algorithmische Orientierung der Disjunktionen einer Ressource ...	188
5.2.3.3	Algorithmus zur iterativen Pfadauswahl für die Bedarfselemente ...	189
5.2.3.4	Zeitliche Nachoptimierung mit Hilfe der Nachbarschaftssuche.....	195
5.3	Zusammenfassung .....	197
<b>6</b>	<b>Praktische Erprobung.....</b>	<b>199</b>
6.1	Untersuchte Fallstudie und Design der Testinstanzen.....	199
6.2	Entwickelte Untersuchungsanwendung.....	205
6.2.1	Daten Import und Export .....	206
6.2.2	Datenhaltung.....	207
6.2.3	Planungsablauf und weitere Funktionalitäten.....	207

---

6.3	Rechenzeitverhalten und Lösungsqualität der MILP-Formulierung .....	210
6.4	Rechenzeitverhalten des heuristischen Ansatzes .....	216
6.5	Vergleich der Lösungsqualität beider Ansätze .....	218
6.6	Zusammenfassung .....	224
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>227</b>
<b>Anhang</b>	<b>.....</b>	<b>231</b>
A-1	Numerische Auswertung MILP Modell .....	232
a.	Szenario I .....	232
b.	Szenario II.....	233
A-2	Numerische Auswertung Heuristik.....	237
a.	Szenario I .....	237
b.	Szenario II.....	238
A-3	Vergleich MILP Ansatz und Heuristik .....	240
a.	Szenario I .....	240
b.	Szenario II.....	241
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>.....</b>	<b>243</b>

# Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1 Abgrenzung der chemisch-pharmazeutischen Industrie.....	8
Abb. 2-2 Schematische Darstellung einer mehrstufigen Supply Chain der chemischen Industrie.....	10
Abb. 2-3 Sparten des Verarbeitenden Gewerbes mit Anteil am Umsatz im Jahr 2008..	11
Abb. 2-4 Anteil am Weltumsatz der chemisch-pharmazeutischen Industrie 2008.....	12
Abb. 2-5 Anteil an den Weltexporten der chemisch-pharmazeutischen Industrie 2008	13
Abb. 2-6 Differenzierung von Stückgut- und Prozessindustrie.....	15
Abb. 2-7 Grundformen der Materialumsetzungen.....	19
Abb. 2-8 Schema eines Produktionsnetzwerkes der pharmazeutischen Industrie.....	21
Abb. 2-9 Bildung von Kampagnen auf einer Ressource .....	24
Abb. 2-10 Matrix der Supply Chain Planungsprobleme in einem Advanced Planning System .....	27
Abb. 2-11 Beispiel eines einfachen Produkt-Prozess-Netzwerkes .....	46
Abb. 3-1 Disjunktiver Graph des Job Shop Problems .....	57
Abb. 3-2 Disjunktiver Graph mit einer beliebigen azyklischen Selektion .....	58
Abb. 3-3 Gantt-Chart des Ablaufplans (I) .....	59
Abb. 3-4 Gantt-Chart des Ablaufplans (II).....	60
Abb. 3-5 Transformation PPN in eine LP-Darstellung.....	75
Abb. 3-6 Transformation eines disjunktiven Graphen in ein MILP .....	80
Abb. 3-7 Basis-Nachbarschaften bei Scheduling Problemen .....	84
Abb. 3-8 Ablaufdiagramm der Shifting Bottleneck Heuristik.....	90
Abb. 4-1 Überblick Planungsablauf.....	94
Abb. 4-2 Komplexes Produktionsnetzwerkes mit Pipelines und Standorten .....	100
Abb. 4-3 Exemplarisches gemeinschaftliches Produkt-Prozess-Netzwerk (I) .....	102
Abb. 4-4 Problemstellung der Kampagnenplanung in vernetzten chemischen Produktionssystemen .....	103
Abb. 4-5 Exemplarisches gemeinschaftliches Produkt-Prozess-Netzwerk (II).....	110
Abb. 4-6 Beispiel einer Kampagne eines aggregierten Prozesses .....	113
Abb. 4-7 Identifikation der Produktionspfade für $f1$ und $f3$ .....	115

Abb. 4-8 Zwei Produktionselemente zur Produktion eines Bedarfselementes.....	118
Abb. 4-9 Produktionsbaum zur Produktion eines Bedarfselementes $f_3$ .....	120
Abb. 4-10 Graphische Darstellung des Intra-Kaskaden Offset Wertes .....	123
Abb. 4-11 Routing-Graph mit den Produktionsbäumen von vier Bedarfselementen...	127
Abb. 4-12 Beispiel eines erweiterten disjunktiven Routing-Graphen .....	133
Abb. 4-13 Mögliche Orientierungen der Disjunktionen einer Produktionsressource ..	137
Abb. 4-14 Schedule einer Ressource in Abhängigkeit der Orientierung der Disjunktionen aus Abb. 4-13 .....	137
Abb. 4-15 Erweiterter disjunktiver Routing-Graph mit orientierten Disjunktionen ....	139
Abb. 4-16 Gantt Darstellung des Kampagnenplans des betrachteten Beispiels .....	141
Abb. 4-17 Funktionalität des Kampagnen-Streaming .....	142
Abb. 5-1 Entwicklung der Rüst- und Reinigungsaufwendungen durch die Umorientierung von Disjunktionen .....	164
Abb. 5-2 Überblick über den Ablauf der Heuristik zur Kampagnenplanung .....	165
Abb. 5-3 Veranschaulichung zur Berechnung der FAZ und SAZ im disjunktiven Routing-Graphen .....	169
Abb. 5-4 Ermittlung der Startzeitpunkte neuer Kampagnen auf einer Ressource mit Hilfe des Wagner-Whitin Algorithmus .....	174
Abb. 5-5 Ausschnitt aus einem Gantt-Chart eines Kampagnenplanes .....	177
Abb. 5-6 Aufbau der Heuristik für die Kampagnenplanung .....	184
Abb. 5-7 Ablaufplan des Algorithmus zur iterativen Pfadauswahl für die Bedarfselemente .....	191
Abb. 5-8 Beispiel zur iterativen Pfadauswahl (1).....	192
Abb. 5-9 Beispiel zur iterativen Pfadauswahl (2).....	193
Abb. 5-10 Residualgraph zum Zwecke der Nachoptimierung .....	194
Abb. 5-11 Beispiel zur iterativen Pfadauswahl (3).....	195
Abb. 6-1 Produktionsnetzwerk zur Herstellung aktiver pharmazeutischer Wirkstoffe	201
Abb. 6-2 Vergleich der Kennzahlen der disjunktiven Graphen von Szenario I und Szenario II.....	204
Abb. 6-3 IT-Infrastruktur SNP Optimizer .....	206
Abb. 6-4 Screenshot des SNP Optimizers mit dargestelltem Gantt-Diagramm eines Planungslaufes .....	210
Abb. 6-5 Entwicklung der Rechenzeiten für das Szenario I.....	211

---

Abb. 6-6 Entwicklung der Rechenzeiten und MIP-GAP für das Szenario II .....	212
Abb. 6-7 Entwicklung der MILP-Größe der Testinstanzen von Szenario II .....	213
Abb. 6-8 Ausschnitt aus einem Gantt-Chart mit geplanten Kampagnen und Produktionselementen .....	215
Abb. 6-9 Überblick der Rechenzeiten der Heuristik für Szenario I .....	217
Abb. 6-10 Überblick der Rechenzeit der Heuristik für Szenario II .....	218
Abb. 6-11 Vergleich Zielfunktionswerte Heuristik und MILP in Szenario I .....	219
Abb. 6-12 Abweichung Zielfunktionswerte der Heuristik vom MILP (Szenario I) .....	220
Abb. 6-13 Vergleich Zielfunktionswerte Heuristik und MILP in Szenario II .....	221
Abb. 6-14 Abweichung Zielfunktionswerte der Heuristik vom MILP (Szenario II) ...	222
Abb. 6-15 Vergleich der Anzahl geplanter Kampagnen bei beiden Verfahren .....	223



# Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1 Überblick und Notation zum Klassischen Job Shop Problem.....	51
Tabelle 3-2 Zusätzliche Bezeichner für das Job Shop Problem .....	53
Tabelle 3-3 Daten der Operationen des beispielhaften Job Shop Problems .....	56
Tabelle 3-4 Kampagnen-Scheduling vs. Job-Shop-Scheduling .....	63
Tabelle 3-5 Auftragsbasiertes Kampagnen Job-Shop-Scheduling Problem.....	66
Tabelle 3-6 Lineares Programm (LP) .....	69
Tabelle 3-7 Ganzzahliges lineares Programm (IP).....	69
Tabelle 3-8 Gemischt-Ganzzahliges lineares Programm (MILP) .....	69
Tabelle 3-9 <i>Critical-Arc</i> Nachbarschaft auf disjunktiven Graphen.....	86
Tabelle 4-1 Faktoren für die Auswahl von Produktionsstandorten .....	98
Tabelle 4-2 Definition der Symbole zur Berechnung des Intra-Kaskaden Offset-Wertes .....	124
Tabelle 4-3 Berechnung des Intra-Kaskaden Offset Wertes .....	125
Tabelle 4-4 Klasse des Kampagnen-Fluss-Problems.....	129
Tabelle 5-1 Algorithmus für eine topologische Sortierung .....	161
Tabelle 5-2 Pseudo-Code zur iterativen Kampagnenplanung auf allen Ressourcen ....	181
Tabelle 6-1 Monatliche Bedarfe der Endprodukte in kg und Zuordnung betrachteter Mengen zu den Szenarien I und II.....	202
Tabelle 6-2 Zuordnung Monatsbedarfe zu Testinstanzen (Szenario I).....	203