

LEHRBUCH

Leena Suhl
Taïeb Mellouli

Optimierungssysteme

Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen

3. Auflage



Springer Gabler

LEHRBUCH

Leena Suhl
Taïeb Mellouli

Optimierungssysteme

Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen

3. Auflage



Springer Gabler

Springer-Lehrbuch

Leena Suhl • Taïeb Mellouli

Optimierungssysteme

Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen

3., korrigierte und aktualisierte Auflage

Leena Suhl
Decision Support & Operations Research Lab.
Universität Paderborn
Paderborn, Deutschland

Taïeb Mellouli
LS für Wirtschaftsinformatik
und Operations Research
Universität Halle-Wittenberg
Halle, Deutschland

ISSN 0937-7433

ISBN 978-3-642-38936-8

ISBN 978-3-642-38937-5 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-642-38937-5

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-Verlag Berlin Heidelberg 2005, 2009, 2013

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 dürfen.

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

Vorwort zur zweiten Auflage

Die zweite Auflage entspricht weitgehend der ersten Auflage. An einigen Stellen wurden jedoch Überarbeitungen in der Darstellung sowie Aktualisierungen vorgenommen. Auf einige kleinere Korrekturen wurden wir durch interessierte Leser dankenswerdensweise hingewiesen. Einige Graphiken wurden verbessert und einzelne Abschnitte überarbeitet, um das Verständnis der behandelten Modelle und Methoden zu erhöhen. Weiterhin wurden einige Hinweise auf Fallstudien und Projekte zu den behandelten Methoden sowie aktualisierte Literaturhinweise eingefügt. Für die Mitarbeit danken wir herzlich den Mitarbeitern Michael Römer in Halle (Saale) und Johannes Timmer in Paderborn.

Paderborn und Halle (Saale),
März 2009

*Leena Suhl
Taïeb Melloui*

Vorwort zur ersten Auflage

Ziel dieses Buches ist es, Studierenden und Praktikern Grundkenntnisse über Optimierungssysteme zu vermitteln, so wie sie heute in der betrieblichen Praxis eingesetzt werden. Darunter verstehen wir IT-basierte Anwendungssysteme, die Optimierungsmodelle generieren und verarbeiten können sowie zur Analyse der Modelle formale Lösungsmethoden einsetzen. In der klassischen Form basieren Optimierungssysteme auf Technologien der mathematischen Programmierung, die seit den 50er Jahren kontinuierlich weiterentwickelt werden und die durch die Möglichkeiten heutiger schneller Rechentechnologien immer öfter zur Anwendung kommen. Aufgrund der hohen kombinatorischen Komplexität können nicht alle schwierigen Modelle exakt optimal gelöst werden, so dass die klassischen Lösungstechnologien durch Heuristiken und Simulationsmethoden ergänzt werden.

Die Inhalte dieses Buches sind hauptsächlich im Rahmen der Lehrveranstaltung „Grundlagen von Optimierungssystemen“ an der Universität Paderborn entstanden und werden auch im Institut für Wirtschaftsinformatik und Operations Research an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg eingesetzt und ausgebaut. Weiterhin sind diese Inhalte teilweise Bestandteil des virtuellen Master-Studienganges VAWi (Virtuelle Aus- und Weiterbildung Wirtschaftsinformatik, s. <http://www.vawi.de>). Die Basistechnologien von Optimierungssystemen werden durch Praxisberichte aus der Beratungs- und Entwicklungspraxis der Autoren sowie aus aktuellen Literaturquellen ergänzt.

Das Buch folgt einem systematischen didaktischen Konzept mit Lerneinheiten, die jeweils Lernziele, Beispiele, Praxisberichte, Übungsaufgaben und Verständnisfragen beinhalten. Weitere Inhalte, Beispiele, Erklärungen und Übungsaufgaben befinden sich auf den Webseiten zum Buch: zu finden unter <http://dsor-lectures.upb.de/>. Das Buch ist sowohl geeignet als begleitendes Material zu Präsenz-Lehrveranstaltungen an Universitäten und Fachhochschulen als auch für ein Selbststudium, virtuell betreutes Studium und Blended Learning. Die Inhalte sind insbesondere für Wirtschaftswissenschaftler, Wirtschaftsinformatiker und Wirtschaftsingenieure aufbereitet, können aber auch für Informatiker und Mathematiker von Interesse sein. Man kann nicht genug betonen, wie wichtig eigenständiges Bearbeiten von Beispielen, Übungsaufgaben und Fallstudien für das Verständnis der Materie ist.

Optimierung und Modellierung sind Gebiete, die ein tiefes Verständnis erfordern, um sie in der Praxis richtig einsetzen zu können. Daher wird jeder Leserin und jedem Leser empfohlen, möglichst viele Übungsaufgaben selbständig zu bearbeiten. Zum Entstehen dieses Buches haben zahlreiche Mitarbeiter, Studierende, Projektpartner und Kollegen beigetragen. Wir möchten an dieser Stelle insbesondere den folgenden Personen für wertvolle Beiträge, Diskussionen, Korrekturhinweise und Anregungen danken: Andrea Beckmann, Klaus Bertelt, Claus Biederbick, Thomas Bräutigam, Stefan Bunte, Philipp Christophel, Yvonne Gröting, Yetis Keltepe, Christian Kirchhoff, Natalia Kliewer, Michael Römer, Rüdiger Stucke, Anja Theilen, Nils Urbach, Mathias Walther, Markus Wigger und Kai Zürnstein.

Wir widmen das Buch Prof. Dr. Uwe H. Suhl, der über Jahrzehnte einen außerordentlichen Beitrag zur Entwicklung und Anwendung von Optimierungssystemen geleistet hat.

Paderborn und Halle (Saale),
Juli 2005

Leena Suhl
Taïeb Mellouli

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
1 Optimierungssysteme als Bestandteil von OR/MS	5
1.1 Operations Research, Management Science und Decision Support ..	5
1.2 Modellbildung im Operations Research	6
1.3 Methoden des Operations Research	8
1.3.1 Lineare Optimierung	8
1.3.2 Gemischt-ganzzahlige Optimierung	9
1.3.3 Netzwerkoptimierung	10
1.3.4 Nichtlineare Programmierung	12
1.3.5 Heuristiken und Metaheuristiken	13
1.3.6 Simulation	13
1.3.7 Entscheidungstheorie	15
1.3.8 Prognoseverfahren	15
1.3.9 Weitere datenbasierte Verfahren	16
1.3.10 Weitere Techniken des Operations Research	17
1.4 Optimierungssysteme	17
1.5 Mathematische Programmierung	19
1.6 Anwendungen in der Betriebswirtschaft	20
1.7 Praxisbeispiele	25
1.7.1 Monte-Carlo-Simulation bei Multiprofil	25
1.7.2 Call-Center-Simulation bei einer Direktbank	25
1.7.3 SCM-Planungstechniken bei Fischer-Ski	26
1.7.4 Zeitschriften-Allokation bei Time Inc.	28
1.7.5 Weitere Praxisbeispiele	29
1.8 Was sollte ich gelernt haben?	29

2	Lineare Optimierungsmodelle	31
2.1	Aufbau von linearen Modellen	31
2.2	Grafische Lösung eines 2-dimensionalen LP-Modells	33
2.3	Eigenschaften des zulässigen Bereichs	36
2.4	LP-Modelle mit spezieller Struktur	38
2.5	Lösungsverfahren für lineare Optimierungsmodelle	42
2.6	Das Simplex-Verfahren zur Lösung von LP-Modellen	44
2.6.1	Grundidee und Standardformat	44
2.6.2	Schritte des Simplex-Verfahrens	47
2.6.3	Bestimmung einer zulässigen Anfangslösung	52
2.7	Grafische Veranschaulichung – Vertiefung	57
2.7.1	Grafische Veranschaulichung der Grundidee des Simplex-Verfahrens	57
2.7.2	Basis vs. Ecke	59
2.7.3	Was ist ein „Simplex“?	59
2.8	Ökonomische Interpretation und Auswertung einer LP-Lösung	61
2.8.1	Interpretation der reduzierten Kosten und der Schattenpreise	64
2.8.2	Duales Modell und seine Interpretation	67
2.9	Praxisbeispiele	70
2.9.1	Produktionsplanung bei Bottle Caps	70
2.9.2	Optimierung der Südzucker Rübenlogistik	71
2.10	Übungsaufgaben	72
2.11	Was sollte ich gelernt haben?	74
3	Software zur Lösung und Modellierung	77
3.1	Merkmale von LP-Optimierungssoftware	77
3.2	Spezielle Implementierungstechniken – Vertiefung	80
3.3	Rechenaufwand bei der Lösung von LP-Modellen	81
3.4	Ein- und Ausgabe von linearen Optimierungsmodellen	82
3.4.1	Interaktive Ein- und Ausgabe	83
3.4.2	Ein- und Ausgabe im MPS-Format	83
3.4.3	Ein- und Ausgabe in internen Datenstrukturen	85
3.4.4	Ein- und Ausgabe über eine DLL-Schnittstelle	86
3.4.5	Spezielle Modellierungssprachen	86
3.5	Einbettung von Optimierungssoftware in Decision-Support-Systeme	89
3.6	Übungsaufgaben	91
3.7	Was sollte ich gelernt haben?	93

4	Modellierungstechniken für Optimierungsaufgaben	95
4.1	Bedeutung der richtigen Modellierung	95
4.2	Fixkostenprobleme	98
4.3	Schwellenwerte	100
4.4	Darstellung alternativer Restriktionsgruppen	102
4.5	Weitere spezielle Modellierungstechniken	103
4.6	Stückweise lineare Funktionen	107
4.7	Darstellung logischer Aussagen als Restriktionen	110
4.8	Optimierung bei mehrfacher Zielsetzung	115
4.8.1	Gewichtungen und Mindestanteile von Zielen	116
4.8.2	Goal Programming	118
4.9	Fundierung von Modellierungstechniken – Vertiefung	119
4.10	Praxisbeispiele	121
4.10.1	Sortimentsoptimierung von Büro- und Papierwaren	121
4.10.2	Verschnittoptimierung von Rollenstahl	122
4.11	Übungsaufgaben	124
4.12	Was sollte ich gelernt haben?	128
 5	 Lösung gemischt-ganzzahliger Optimierungsmodelle	 131
5.1	Schwierigkeitsgrad von Optimierungsmodellen	131
5.2	Algorithmen und allgemeine Lösungsprinzipien	133
5.2.1	Greedy-Methode	134
5.2.2	Divide-and-Conquer	135
5.2.3	Eröffnungs- und Verbesserungsverfahren	135
5.2.4	Lokale Suche	136
5.2.5	Metaheuristiken und naturanaloge Verfahren	137
5.2.6	Backtracking und Branch&Bound	138
5.3	Backtracking und Branch&Bound-Verfahren	139
5.3.1	Backtracking-Verfahren und Hamilton-Kreise	139
5.3.2	Das Rucksackproblem und Job Sequencing	142
5.3.3	Anwendung von Backtracking mit Bounding	143
5.3.4	Branch&Bound-Verfahren für allgemeine MIP-Modelle	146
5.3.5	Beispiel zu Branch&Bound	149
5.4	Bemerkungen zu MIP-Modellen und deren Formulierung	152
5.4.1	Duality Gap	153
5.4.2	(Um-)Formulierung ganzzahliger Modelle – total unimodulare Matrizen	155
5.5	Spezielle Techniken und Software	156
5.6	Was sollte ich gelernt haben?	160

6	Netzwerkorientierte Optimierungsmodelle	163
6.1	Typische Optimierungsmodelle in Netzwerken	163
6.2	Grundbegriffe der Graphentheorie	167
6.3	Minimale Spannbäume	170
6.4	Kürzeste-Wege Probleme und Algorithmen	173
6.4.1	Der Dijkstra-Algorithmus	174
6.4.2	LC-Verfahren für kürzeste Wege	178
6.4.3	Kürzeste Wege zwischen allen Paaren von Knoten	181
6.4.4	Ermittlung längster Wege	183
6.5	Das Transportproblem	184
6.5.1	Das einstufige Transportproblem	184
6.5.2	Das mehrstufige Transportproblem	185
6.6	Das Transshipment-Modell	185
6.6.1	Das allgemeine Basismodell	185
6.6.2	Spezialfälle des Transshipment-Modells	188
6.7	Umformung des Transshipment-Modells	192
6.7.1	Transformation der unteren Schranken	192
6.7.2	Transformation in ein s-t-Flussproblem	193
6.7.3	Bestimmung von Zirkulationsflüssen	194
6.7.4	Kapazitätsrestriktionen auf Knoten	194
6.7.5	Ungerichtete und symmetrische Kanten	195
6.7.6	Netzwerke mit negativen Kantenbewertungen	196
6.8	Lösung des Min-Cost-Flow-Modells	197
6.8.1	Standardformat des Min-Cost-Flow-Modells	197
6.8.2	Bestimmung maximaler Flüsse	199
6.8.3	Bestimmung kostenminimaler Flüsse	203
6.8.4	Lösung mit Hilfe von Standard-Optimierungssoftware	206
6.9	Praxisbeispiele	208
6.9.1	Netzwerkflussmodell für Helsinki Wasserwerke	208
6.9.2	Netzausbauplanung im Gasnetz	209
6.9.3	Flugnetzoptimierung bei UPS	209
6.10	Übungsaufgaben	211
6.11	Was sollte ich gelernt haben?	212
7	Fallstudie Transportlogistik im ÖPV: Netzwerkbasierte Modellierung und Optimierung	215
7.1	Motivation	215
7.2	Produktionsplanung und -steuerung (PPS)	216
7.2.1	Hauptschritte eines PPS-Prozesses	217
7.2.2	Produktionsplanung und dispositive Kontrolle im öffentlichen Verkehr	217

7.3	Das Umlaufplanungsproblem	220
7.4	Netzwerkbasierte Modellierung des Umlaufplanungsproblems	222
7.5	Standard-Flussproblem und Netzwerktransformationen	225
7.6	Praxisanwendung – Probleme klassischer Modellierungsansätze	227
7.7	Aggregiertes Netzwerkflussmodell	229
7.7.1	Netzwerkflussmodell mit Anschlusslinien	229
7.7.2	Neue Aggregationsmethode für potentielle Leerfahrten	231
7.8	Umsetzung mit Optimierungssoftware in der Praxis	233
7.8.1	Realisierung und Rechenergebnisse	233
7.8.2	Kombination Heuristik/mathematische Optimierung	235
7.9	Was sollte ich gelernt haben?	235
8	Touren- und Standortplanung	237
8.1	Motivation – Transportlogistik im Güterverkehr	237
8.2	Basisprobleme der Tourenplanung	238
8.3	Mathematische Modellierung und exakte Verfahren	243
8.4	Heuristische Verfahren für Tourenplanung	246
8.4.1	Das Savings-Verfahren	247
8.4.2	Das Sweep-Verfahren	250
8.4.3	Verbesserungsverfahren	251
8.5	Dynamische Tourenplanung	254
8.6	Warehouse-Location-Probleme	255
8.6.1	Unkapazitiertes (einstufiges) WLP	256
8.6.2	Kapazitiertes (einstufiges) WLP	257
8.6.3	Mehrstufige Warehouse Location Probleme	258
8.7	Heuristische Verfahren zur Lösung von Warehouse-Location-Problemen	258
8.7.1	Eröffnungsverfahren für Warehouse Location-Probleme	259
8.7.2	Verbesserungsverfahren für Warehouse Location-Probleme	261
8.8	Zentrenprobleme	261
8.9	Praxisbeispiele	262
8.9.1	Tourenplanung für den technischen Kundendienst	262
8.9.2	Standortplanung bei der Stahlindustrie	262
8.10	Übungsaufgaben	264
8.11	Was sollte ich gelernt haben?	266

- 9 Simulation** 269
 - 9.1 Motivation und Fallstudien 269
 - 9.2 Kontinuierliche Modelle 272
 - 9.3 Diskrete Modelle: Techniken 274
 - 9.3.1 Konzepte in diskreten Simulationsmodellen 274
 - 9.3.2 Modellierung der Inputdaten 276
 - 9.3.3 Generierung von zufallsbehafteten Inputdaten 280
 - 9.3.4 Gestaltung und Auswertung von Simulationsexperimenten .. 282
 - 9.4 Diskrete Modelle: Fallstudien und Software 286
 - 9.4.1 Fallstudie „universitärer Druckerpool“ 286
 - 9.4.2 Simulationssoftware Arena 289
 - 9.5 Simulation und Optimierung 291
 - 9.6 Was sollte ich gelernt haben? 294

- Literaturverzeichnis** 297

- Sachverzeichnis** 303

Abbildungsverzeichnis

1.	Optimierungssysteme – Modellierung und Optimierungsverfahren . . .	1
1.1	Typisches Vorgehensmodell in Operations Research	7
1.2	Abstrahiertes Straßennetz	11
1.3	Umladeproblem	12
1.4	Inline-Skates-Absatz für 2004/2005	17
1.5	Bestandteile eines Advanced Planning Systems nach [Günther 2005]	22
1.6	Ausschnitt des Produktionsprozesses bei Fischer	27
2.1	Grafische Lösung von 2-dimensionalen LP-Modellen	35
2.2	Konvexe und nichtkonvexe Bereiche	36
2.3	Lösung zum Beispiel Tierfutter	40
2.4	Struktur eines Optimierungsmodells mit mehreren Produktionsstätten [Williams 2013]	41
2.5	Struktur eines mehrperiodischen Optimierungsmodells [Williams 2013]	41
2.6	Carl Friedrich Gauss 1777-1855	44
2.7	Basis für das Beispiel	46
2.8	Iteration 1	49
2.9	Iteration 2	50
2.10	Iteration 3	50
2.11	Iteration 4	51
2.12	Phase I, Iteration 1	53
2.13	Phase 1, Iteration 2	54
2.14	Phase 2	55
2.15	Phase 2, Iteration 1	55
2.16	Grafische Veranschaulichung der Simplexschritte (Phase I und Phase II)	56
2.17	Schlupfvariable 1	57