

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	v
Inhaltsverzeichnis	xi
Abbildungsverzeichnis	xvii
1 Einführung: Modelle, Modellbildung und Optimierung	1
1.1 Was ist gemischt-ganzzahlige Optimierung?	1
1.2 Zur Geschichte der gemischt-ganzzahligen Optimierung	3
1.3 Zur Bedeutung von Modellen	5
1.4 Die Kunst der Modellierung	9
1.5 Variablen, Indizes und Indexmengen	9
1.6 Nebenbedingungen, Beschränkungen und Constraints	12
1.7 Die Zielfunktion	13
1.8 Definition gemischt-ganzzahliger Optimierungsprobleme	14
1.9 Konventionen und Abkürzungen	15
2 Einführende motivierende Beispiele	17
2.1 Beispiel: Lineare Optimierung - Verleihung von Booten	17
2.2 Beispiele: Gemischt-ganzzahlige lineare Optimierung	20
2.2.1 Beispiel 1: Von Kühen und Schweinen	21
2.2.2 Beispiel 2 : Ein Projektplanungssystem	22
2.2.3 Beispiel 3 : Ein Produktionsplanungssystem	22
2.2.4 Beispiel 4 : Optimale Depotwahl - Ein Standortplanungsmodell . .	23
2.2.5 Beispiel 5 : Optimale Produktverteilung	24
2.2.6 Beispiel 6 : Modellierung logischer Bedingungen	25
2.2.7 Beispiel 7 : Optimale Einbruchstrategie - Ein Rucksackproblem . .	25
2.3 Beispiel: Nichtlineare Optimierung - Ein Mischungsproblem	27
2.4 Es muss nicht immer Optimierung sein	28
3 Optimierung in der Praxis	31
3.1 Vorteile durch den Einsatz Mathematischer Optimierung	31
3.2 Die Struktur von Optimierungsprojekten	32
3.2.1 Kontraktierungsphase und Trainingsphase	32
3.2.2 Strukturierung und Beschaffung der Daten	32
3.2.3 Modellformulierung und Modellierungssprachen	33
3.2.4 Problemgröße, Komplexität und algorithmische Aspekte	35
3.2.5 Ergebnisse der Optimierung und ihre Interpretation	36
Duale Variablen und Schattenpreise	37
Reduzierte Kosten	38
3.2.6 Implementierung und Modellvalidierung - Vom Modell zum Einsatz	38
3.2.7 Benutzeroberfläche - Tabellenkalkulation und Datenbanken	39
3.2.8 Kommunikation mit dem Auftraggeber	40
3.2.9 Die Lebensdauer eines Modells	40

3.3	Kommerzielle Supply Chain Management und Optimierung	41
3.3.1	Supply Chain Management und Supply Chain Optimierung	41
3.3.2	APS – Advanced Planning Systems	43
	Strategisch, taktisch operatives Einsatzgebiet	45
	Lebensdauer des Optimierungsmodells	46
	Benutzerschnittstelle	46
3.3.3	SAP APO als Beispiel für ein APS	47
3.4	Optimierung und Integration in der Industrie	49
3.5	Optimierung in kleinen und mittelständischen Firmen	51
4	Grundlagen der Mathematischen Lösungstechniken	52
4.1	Lineare Optimierung - Lineare Programmierung	52
4.1.1	Das Simplexverfahren — Ein kurzer Überblick	53
4.1.2	IPM — Ein kurzer Überblick	53
4.1.3	Lineare Programmierung als Unterproblem	54
4.2	Elementare Erläuterung des Simplexverfahrens	55
4.2.1	Standardformulierung linearer Optimierungsprobleme	55
4.2.2	Schlupf- und Überschussvariablen	56
4.2.3	Unterbestimmte lineare Gleichungssysteme und Optimierung	57
4.2.4	Simplexverfahren und Bootsverleihproblem	58
4.3	Lineare gemischt-ganzzahlige Optimierung	63
4.3.1	Elementare Einführung des Branch&Bound-Verfahrens	65
4.3.2	Branch&Bound (B&B) mit LP-Relaxierung	68
	Knotenwahl	71
	Variablenwahl	73
	Das B&B-Verfahren im Überblick, Abbruchkriterien	73
	Konvexe Hülle und Lösungsverhalten des B&B-Verfahrens	75
4.3.3	Schnittebenenverfahren und Branch&Cut	76
4.3.4	Branch&Price: Optimierung mit Spaltenerzeugung	77
4.3.5	L-Klassen-Enumeration	78
4.4	Nichtlineare, kontinuierliche Optimierung	85
4.4.1	Einige Grundlagen zur unbeschränkten Optimierung	85
4.4.2	Beschränkte Optimierung - Grundlagen und einige Theoreme	89
4.4.3	Reduzierte-Gradienten-Verfahren	91
4.4.4	Sequentielle Quadratische Programmierung	94
4.4.5	Innere-Punkte-Methoden	95
4.5	Gemischt-ganzzahlige nichtlineare Optimierung	95
4.5.1	Einführende Bemerkungen	95
4.5.2	Exakte Verfahren zur Lösung von konvexen MINLP-Problemen	96
4.6	Globale Optimierung	98
5	Die Kunst guter Modellierung	102
5.1	Modellierung logischer Zusammenhänge	102
5.1.1	Ganzzahlige Variablen und logische Bedingungen	103
5.1.2	Transformation logischer Aussagen in arithmetische Ausdrücke	104
5.1.3	Logische Ausdrücke mit zwei Argumenten	104
5.1.4	Multivariate logische Ausdrücke	106
5.1.5	Das Erfüllbarkeitsproblem	108
5.2	Logische Bedingungen auf Nebenbedingungen	109

5.2.1	Logische Bedingungen auf einzelne Variablen	109
5.2.2	Logische Bedingungen auf Nebenbedingungen	110
5.2.3	Disjunktive Mengen von Implikationen	112
5.3	Modellierung von Nicht-Null-Variablen	113
5.4	Modellierung von Mengen paarweise verschiedener Werte	115
5.5	Modellierung von Betragstermen	116
5.6	Behandlung und Transformation nichtlinearer Probleme	117
5.6.1	Nichtlineare binäre Optimierungsprobleme	118
5.6.2	Quadratische Optimierungsprobleme in binären Variablen	119
5.6.3	Behandlung von stückweise linearen Funktionen	120
5.6.4	Produkte von Binärvariablen	122
5.6.5	Produkte binärer und einer kontinuierlichen Variablen	122
5.7	Strukturierte Mengen - Special Ordered Sets	123
5.7.1	Strukturierte Variablenmengen vom Typ 1 (SOS-1-Mengen)	123
5.7.2	Strukturierte Variablenmengen vom Typ 2 (SOS-2-Mengen)	125
5.7.3	Strukturierte Variablenmengen - Verknüpfte Mengen	127
5.7.4	Strukturierte Variablenmengen - Familien von SOS-Mengen	129
5.8	Verbesserte Modellformulierungen: Logische Ungleichungen	130
5.9	Verbesserte Modellformulierungen: Spezielle Schnitte	131
5.9.1	Schnitte für ganzzahlige und semi-kontinuierliche Variablen	131
5.9.2	Elimination unerwünschter Kombinationen von Binärvariablen	132
5.10	Preprocessing	133
5.10.1	Presolve	133
	Arithmetische Tests	133
	Verschärfung von Schranken	135
5.10.2	Disaggregation von Nebenbedingungen	136
5.10.3	Koeffizientenreduktion	137
5.10.4	Erzeugung von Clique-Ungleichungen	139
5.10.5	Erzeugung von Cover-Ungleichungen	139
5.11	Effiziente Lösung von LP-Problemen	141
5.11.1	Warmstarts	141
5.11.2	Effiziente Skalierung	141
5.12	Effiziente Modellierung - Gute Modellierungspraxis	142
5.13	Verzweigungsstrategien im Branch&Bound-Verfahren	145
5.13.1	Zielfunktion und Wahl des Akzeptanzwertes	146
5.13.2	Verzweigungsheuristiken im B&B-Verfahren	146
	Variablenwahl und Knotenwahl	146
5.13.3	Verzweigungsregeln für strukturierte Variablenmengen	147
5.13.4	Verzweigung auf halbstetigen und partiell-ganzzahligen Variablen	148
6	Lineare Optimierung in der Praxis	150
6.1	Produktionsplanung für einen Chemiereaktor	150
6.2	Verschnittprobleme	152
6.2.1	Beispiel: Ein Verschnittproblem in der Papierindustrie	152
6.2.2	Beispiel: Ein ganzzahliges Verschnittproblem	154
6.3	Ein scheinbar nichtlineares Mischungsproblem	155
6.3.1	Formulierung des direkten Problems	155
6.3.2	Formulierung des inversen Problems	157

6.3.3	Analyse und Reformulierung des Modells	158
6.4	Multi-kriterielle Optimierung und Goal Programming	160
6.4.1	Multi-kriterielle Optimierung	160
6.4.2	Ziel-Programmierung - Goal Programming	160
6.4.3	Goal Programming und weiche Nebenbedingungen	163
6.5	Grenzen Linearer Programmierung	164
6.5.1	Zielfunktion	164
6.5.2	Linearität in den Nebenbedingungen	165
6.5.3	Harte und weiche Nebenbedingungen	165
6.5.4	Konsistente und verfügbare Daten	165
6.6	Post-Optimale Analyse	166
6.6.1	Untersuchung von Unzulässigkeiten	166
6.6.2	Sensitivitätsanalyse und Ranging bei LP-Problemen	167
6.6.3	Parametrische Optimierung	169
6.6.4	Sensitivitätsanalyse in ganzzahligen Optimierungsproblemen	170
7	Gemischt-ganzzahlige lineare Optimierung in der Praxis	171
7.1	Modellieren will gelernt sein - Aufbau von Erfahrung	171
7.2	Ein Standortplanungsproblem	171
7.3	Optimierung im Verkehr – Einsatzplanung für Busfahrer	173
7.4	Drei instruktive praktische Probleme	175
7.4.1	Optimierung in der Energiewirtschaft – Vertragsallokation	175
7.4.2	Optimale Produktion von Barren in der Metallindustrie	177
7.4.3	Projekt-Portfolio-Optimierung und Projektplanung	178
7.5	Ein Projekt-Ressourcen-Planer	180
7.6	Routenplanung mit Zeitfenstern	182
8	Nichtlineare Optimierung in der Praxis	187
8.1	Rekursion und sequentielle lineare Programmierung	187
8.1.1	Rekursion	188
8.1.2	Das „Pooling“-Problem und Distributive Rekursion	189
8.2	Quadratische Programmierung	192
9	Gemischt-ganzzahlige nichtlineare Optimierung in der Praxis	196
9.1	Eine Integrierte Standortanalyse	196
9.1.1	Das Mathematische Modell	197
	Variablen	198
	Nebenbedingungen	198
	Zielfunktion	200
9.1.2	Lösungsweg „Homotopie-Verfahren“ und Ergebnisse	201
9.2	Simultanes Prozessdesign und Produktionsplanung	202
9.2.1	Mathematische Formulierung des Modells	202
	Massenbilanzierung der Reaktoren	203
	Reaktionsraten und Gewichtsanteile	204
	Diskrete Strukturen im Modell	206
	Die Zielfunktion	206
9.2.2	Lösungsansatz	207
9.2.3	Validierung und Implementierung	207
9.2.4	Ergebnisse und Vorteile für den Kunden	208

10 Globale Optimierung in der Praxis	210
10.1 Energieminimale Molekülkonfiguration	210
10.2 Ein Verschnittproblem	213
10.3 Optimale Verkaufsstrategien	217
11 Schlussbetrachtungen und Ausblick	221
11.1 Lernenswertes aus den Fallstudien	221
11.2 Parallele Optimierung	221
11.3 Zukünftige Entwicklungen	222
11.3.1 Simultane operative Planung und Design-Optimierung	225
11.3.2 Simultane operative Planung und strategische Optimierung	225
11.4 Mathematische Optimierung für eine bessere Welt	226
A Mathematische Beschreibung der Optimierungsverfahren	232
A.1 Eine tiefere Betrachtung des Simplexverfahrens	232
A.1.1 Das Simplexverfahren — Eine detaillierte Beschreibung	232
A.1.2 Die Berechnung von Startlösungen	237
A.1.3 LP-Probleme mit oberen Schranken	238
A.1.4 Das duale Simplexverfahren	242
A.2 Dualitätstheorie	243
A.2.1 Konstruktion des dualen Problems in der linearen Programmierung	243
A.2.2 Interpretation des dualen Problems	245
A.2.3 Dualität und Komplementarität	246
A.3 Innere-Punkte-Methoden — Eine detaillierte Beschreibung	248
Primal-duale Innere-Punkte-Methoden	250
Prädiktor-Korrektor-Schritt	252
Zur Berechnung zulässiger Startpunkte	253
Die Berechnung des Homotopieparameters	253
Abbruchkriterium	254
Identifizierung einer Basis und Cross-Over	254
Innere-Punkte-Methoden versus Simplexverfahren	255
A.4 Gemischt-ganzzahlige nichtlineare Optimierung	255
A.4.1 Ein Äussere-Approximation-Verfahren für konvexe Probleme	255
A.4.2 Natürliche polyedrische Repräsentation	256
A.4.3 Äußere Approximation und MILP-Masterprobleme	257
A.4.4 Formulierung des Masterproblems	257
A.4.5 Schranken	259
A.4.6 Unzulässige Teilprobleme	260
A.4.7 Zusammenfassung des Äussere-Approximation-Verfahrens	261
A.4.8 Optimalität	262
A.4.9 Erweiterung des Äussere-Approximation-Verfahrens	263
Einbeziehung von Gleichungen	263
Behandlung nichtkonvexer MINLP-Probleme	264
B Glossar	266
Literaturverzeichnis	271
Index	285