

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur 2. Auflage	v
Vorwort	vii
Inhaltsverzeichnis	xiii
Abbildungsverzeichnis	xx
Verzeichnis von Modellbeispielen	xxi
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.....	6
1.4 Die Kunst der Modellierung	9
1.5 Variablen, Indizes und Indexmengen	10
1.6 Nebenbedingungen, Beschränkungen, Constraints	13
1.7 Die Zielfunktion.....	13
1.8 Definition gemischt-ganzzahliger Optimierungsprobleme.....	14
1.9 Konventionen und Abkürzungen	16
2 Einführende motivierende Beispiele.....	19
2.1 Beispiel: Lineare Optimierung - Verleihung von Booten	19
2.2 Beispiele: Gemischt-ganzzahlige lineare Optimierung.....	22
2.2.1 Beispiel 1: Von Kühen und Schweinen	23
2.2.2 Beispiel 2 : Ein Projektplanungssystem	24
2.2.3 Beispiel 3 : Ein Produktionsplanungssystem.....	24
2.2.4 Beispiel 4 : Optimale Depotwahl - Ein Standortplanungsmodell	25
2.2.5 Beispiel 5 : Optimale Produktverteilung	26
2.2.6 Beispiel 6 : Modellierung logischer Bedingungen.....	27
2.2.7 Beispiel 7 : Optimale Einbruchstrategie - Ein Rucksackproblem	27
2.3 Beispiel: Nichtlineare Optimierung - Ein Mischungsproblem	29
2.4 Es muss nicht immer Optimierung sein	30
3 Optimierung in der Praxis	35
3.1 Vorteile durch den Einsatz Mathematischer Optimierung	35
3.2 Optimierung ist nicht genug	36
3.2.1 Hintergrund	36
3.2.2 Probleme und Lösungen.....	37
3.2.2.1 Akzeptanz	38
3.2.2.2 Transparenz	38
3.2.2.3 Datenqualität	39
3.2.2.4 Optimale Lösungen und Randbedingungen	39

3.2.2.5	Zieldefinitionen.....	40
3.2.2.6	Konsistenz	42
3.2.2.7	Monitoring – Was muss wann beobachtet werden?	42
3.2.2.8	Projektfähigkeit.....	43
3.2.2.9	Problemlösung und Projekte	43
3.2.3	Zusammenfassung	44
3.3	Die Struktur von Optimierungsprojekten.....	44
3.3.1	Kontraktierungsphase und Trainingsphase.....	44
3.3.2	Strukturierung und Beschaffung der Daten	45
3.3.3	Modellformulierung und Modellierungssprachen	46
3.3.4	Problemgröße, Komplexität und algorithmische Aspekte.....	47
3.3.5	Ergebnisse der Optimierung und ihre Interpretation	49
3.3.5.1	Duale Variablen und Schattenpreise.....	50
3.3.5.2	Reduzierte Kosten.....	50
3.3.6	Implementierung und Validierung – Vom Modell zum Einsatz	50
3.3.7	Benutzerinterface - Tabellenkalkulation und Datenbanken	51
3.3.8	Kommunikation mit dem Auftraggeber.....	52
3.3.9	Die Lebensdauer eines Modells.....	52
3.4	Algebraische Modellierungssprachen.....	53
3.4.1	Modelle und Gegensatz zwischen Deklarativ und Prozedural	56
3.4.2	Ein Beispiel: Deklarativ versus Prozedural.....	57
3.4.3	Modellierung und Studium	58
3.5	Supply Chain Management und Optimierung	59
3.5.1	Supply Chain Management und Supply Chain Optimierung.....	60
3.5.2	APS – Advanced Planning Systems	61
3.5.2.1	Strategisch, taktisch operatives Einsatzgebiet	63
3.5.2.2	Lebensdauer des Optimierungsmodells.....	64
3.5.2.3	Benutzerschnittstelle	65
3.5.3	SAP APO als Beispiel für ein APS.....	65
3.6	Optimierung und Integration in der Industrie	68
3.7	Optimierung in kleinen und mittelständischen Firmen.....	70
4	Grundlagen der Mathematischen Lösungstechniken.....	71
4.1	Lineare Optimierung - Lineare Programmierung	71
4.1.1	Das Simplexverfahren — Ein kurzer Überblick.....	72
4.1.2	IPM — Ein kurzer Überblick.....	72
4.1.3	Lineare Programmierung als Unterproblem	73
4.2	Elementare Erläuterung des Simplexverfahrens	74
4.2.1	Standardformulierung linearer Optimierungsprobleme	74
4.2.2	Schlupf- und Überschussvariablen	76
4.2.3	Unterbestimmte lineare Gleichungssysteme und Optimierung	76
4.2.4	Simplexverfahren und Bootsverleihproblem.....	77
4.3	Lineare gemischt-ganzzahlige Optimierung	83
4.3.1	Elementare Einführung des Branch&Bound-Verfahrens	84
4.3.2	Branch&Bound (B&B) mit LP-Relaxierung	88
4.3.2.1	Knotenwahl.....	91
4.3.2.2	Variablenwahl	93
4.3.2.3	Das B&B-Verfahren im Überblick, Abbruchkriterien.....	94

4.3.2.4	Konvexe Hülle und Lösungsverhalten des B&B-Verfahrens	96
4.3.3	Schnittebenenverfahren und Branch&Cut.....	96
4.3.4	Branch&Price: Optimierung mit Spaltenerzeugung.....	98
4.3.5	L-Klassen – Enumeration	98
4.4	Nichtlineare, kontinuierliche Optimierung	105
4.4.1	Einige Grundlagen zur unbeschränkten Optimierung	105
4.4.2	Beschränkte Optimierung - Grundlagen und einige Theoreme.....	109
4.4.3	Reduzierte-Gradienten-Verfahren	112
4.4.4	Sequentielle Quadratische Programmierung	115
4.4.5	Innere-Punkte-Methoden.....	116
4.5	Gemischt-ganzzahlige nichtlineare Optimierung	116
4.5.1	Einführende Bemerkungen.....	116
4.5.2	Exakte Verfahren zur Lösung von konvexen MINLP-Problemen	117
4.6	Globale Optimierung.....	118
5	Die Kunst guter Modellierung.....	125
5.1	Modellierung logischer Zusammenhänge	125
5.1.1	Ganzzahlige Variablen und logische Bedingungen	126
5.1.2	Transformation logischer Aussagen in arithmetische Ausdrücke.....	127
5.1.3	Logische Ausdrücke mit zwei Argumenten	127
5.1.4	Multivariate logische Ausdrücke	129
5.1.5	Das Erfüllbarkeitsproblem	131
5.2	Logische Bedingungen auf Nebenbedingungen.....	132
5.2.1	Logische Bedingungen auf einzelnen Variablen.....	133
5.2.2	Logische Bedingungen auf Nebenbedingungen.....	133
5.2.3	Disjunktive Mengen von Implikationen	135
5.3	Modellierung von Nicht-Null-Variablen	137
5.4	Modellierung von Mengen paarweise verschiedener Werte	138
5.5	Modellierung von Betragstermen.....	139
5.6	Behandlung und Transformation nichtlinearer Probleme	141
5.6.1	Nichtlineare binäre Optimierungsprobleme	141
5.6.2	Quadratische Optimierungsprobleme in binären Variablen.....	142
5.6.3	Behandlung von stückweise linearen Funktionen.....	143
5.6.4	Produkte von Binärvariablen.....	146
5.6.5	Produkte binären und einer kontinuierlichen Variablen	147
5.7	Strukturierte Mengen - Special Ordered Sets	147
5.7.1	Strukturierte Variablenmengen vom Typ 1 (SOS-1-Mengen)	148
5.7.2	Strukturierte Variablenmengen vom Typ 2 (SOS-2-Mengen)	149
5.7.3	Strukturierte Variablenmengen - Verknüpfte Mengen	152
5.7.4	Strukturierte Variablenmengen - Familien von SOS-Mengen.....	154
5.8	Verbesserte Modellformulierungen: Logische Ungleichungen	155
5.9	Verbesserte Modellformulierungen: Spezielle Schnitte	156
5.9.1	Schnitte für ganzzahlige und semi-kontinuierliche Variablen	156
5.9.2	Elimination unerwünschter Kombinationen von Binärvariablen.....	157
5.10	Preprocessing	158
5.10.1	Presolve	158
5.10.1.1	Arithmetische Tests	158
5.10.1.2	Verschärfung von Schranken.....	160

5.10.2	Disaggregation von Nebenbedingungen	161
5.10.3	Koeffizientenreduktion	162
5.10.4	Erzeugung von Clique-Ungleichungen	164
5.10.5	Erzeugung von Cover-Ungleichungen	165
5.11	Effiziente Lösung von LP-Problemen	166
5.11.1	Warmstarts	166
5.11.2	Effiziente Skalierung	166
5.12	Effiziente Modellierung - Gute Modellierungspraxis	167
5.13	Verzweigungsstrategien im Branch&Bound-Verfahren	171
5.13.1	Zielfunktion und Wahl des Akzeptanzwertes	171
5.13.2	Verzweigungsheuristiken im B&B-Verfahren	171
5.13.3	Verzweigungsregeln für strukturierte Variablenmengen	172
5.13.4	Verzweigung auf halbstetigen und partiell-ganzzahligen Variablen...	174
6	Lineare Optimierung in der Praxis	177
6.1	Produktionsplanung für einen Chemiereaktor	177
6.2	Verschnittprobleme	179
6.2.1	Beispiel: Ein Verschnittproblem in der Papierindustrie	179
6.2.2	Beispiel: Ein ganzzahliges Verschnittproblem	181
6.3	Ein scheinbar nichtlineares Mischungsproblem	182
6.3.1	Der Weg zum Modell	183
6.3.2	Formulierung des Optimierungsproblems	184
6.3.3	Analyse und Reformulierung des Modells	185
6.4	Multikriterielle Optimierung und Goal Programming	187
6.4.1	Multikriterielle Optimierung	187
6.4.2	Ziel-Programmierung - Goal Programming	188
6.4.3	Goal Programming und weiche Nebenbedingungen	190
6.5	Grenzen Linearer Programmierung	192
6.5.1	Zielfunktion	192
6.5.2	Linearität in den Nebenbedingungen	192
6.5.3	Harte und weiche Nebenbedingungen	192
6.5.4	Konsistente und verfügbare Daten	193
6.6	Post-Optimale Analyse	193
6.6.1	Untersuchung von Unzulässigkeiten	193
6.6.2	Sensitivitätsanalyse und Ranging bei LP-Problemen	194
6.6.3	Parametrische Optimierung	197
6.6.4	Sensitivitätsanalyse in ganzzahligen Optimierungsproblemen	197
7	Gemischt-ganzzahlige lineare Optimierung in der Praxis	199
7.1	Modellieren will gelernt sein - Aufbau von Erfahrung	199
7.2	Ein Standortplanungsproblem	199
7.3	Optimierung im Verkehr – Einsatzplanung für Busfahrer	201
7.4	Drei instruktive praktische Probleme	203
7.4.1	Optimierung in der Energiewirtschaft – Vertragsallokation	203
7.4.2	Optimale Produktion von Barren in der Metallindustrie	205
7.4.3	Projekt-Portfolio-Optimierung und Projektplanung	206
7.5	Ein Projekt-Ressourcen-Planer	208
7.6	Routenplanung mit Zeitfenstern	211

8 Polylithische Modellierungs- und Lösungsansätze in der Praxis.....	217
8.1 Polylithische Modellierungs- und Lösungsansätze.....	217
8.1.1 Idee und Grundlagen Polylithischer Lösungsansätze	217
8.1.1.1 Monolithische Modelle und Lösungsansätze.....	218
8.1.1.2 Polylithische Modelle und Lösungsansätze (PMSAs)	218
8.1.2 Problemspezifisches Preprocessing	219
8.1.2.1 Dynamische Reduzierung von Big-M-Koeffizienten	219
8.1.2.2 Verschärfte Schranken auf ganzzahlige Variablen	219
8.1.2.3 Datenzulässigkeitstest.....	220
8.1.3 Mathematische Algorithmen.....	220
8.1.3.1 Branch&Bound und Branch&Cut	220
8.1.3.2 Dekompositionsverfahren.....	221
8.1.3.2.1 Benders' Dekomposition (BD).....	221
8.1.3.2.2 Spaltenenumerierung und Spaltenerzeugung	221
8.1.3.2.3 Column Generation und Branch&Price.....	222
8.1.3.3 Lagrange-Relaxierung.....	223
8.1.3.3.1 Das Subgradientenverfahren	225
8.1.3.3.2 Beispiel: Erweitertes Zuordnungsproblem	226
8.1.3.3.3 Variationen bei Nichtlinearen Problemen.....	229
8.1.4 Primale Heuristiken	229
8.1.4.1 Strukturierte Primale Heuristiken	230
8.1.4.1.1 LP-Guided Dives, Relax-and-Fix	230
8.1.4.1.2 SOS-2 Basierte Lineare Approximation.....	231
8.1.4.1.3 Homotopie-Sequenzen von Modellen	232
8.1.4.2 Hybrid-Verfahren	232
8.2 Rollenverschnittminimierung.....	233
8.2.1 Preliminarien.....	233
8.2.1.1 Indizes und Mengen.....	233
8.2.1.2 Eingabedaten.....	233
8.2.1.3 Variablen.....	233
8.2.2 Das Modell	234
8.2.3 Struktur des Problems und Lösung mittels Spaltenerzeugung	235
8.3 Minimierung der Anzahl der Muster	237
8.3.1 Indizes und Mengen.....	238
8.3.2 Eingabedaten	238
8.3.3 Variablen.....	239
8.3.4 Das Ausschöpfungsverfahren im Detail	239
8.3.5 Das Modell	239
8.3.6 Typisches Ergebnis.....	242
8.4 2D-Format-Produktion – Verschnittminimierung	243
8.4.1 Indizes und Mengen.....	245
8.4.2 Eingabedaten	246
8.4.3 Variablen.....	246
8.4.4 Überblick über die Algorithmischen Komponenten	246
8.4.5 Master- und Unterproblem	247
8.4.5.1 Das Masterproblem: Partitionierungsmodell	247
8.4.5.2 Das Unterproblem	248
8.4.5.3 Explizite Lösung des Unterproblems	249

9 Nichtlineare Optimierung in der Praxis	251
9.1 Rekursion und sequentielle lineare Programmierung.....	251
9.1.1 Rekursion.....	252
9.1.2 Das „Pooling“-Problem und Distributive Rekursion.....	253
9.2 Quadratische Programmierung	256
10 Gemischt-ganzzahlige nichtlineare Optimierung in der Praxis	261
10.1 Eine Integrierte Standortanalyse	261
10.1.1 Das Mathematische Modell	262
10.1.1.1 Variablen.....	263
10.1.1.2 Nebenbedingungen	263
10.1.1.3 Zielfunktion.....	265
10.1.2 Lösungsweg „Homotopie-Verfahren“ und Ergebnisse.....	266
10.2 Simultanes Prozessdesign und Produktionsplanung.....	267
10.2.1 Mathematische Formulierung des Modells	267
10.2.1.1 Massenbilanzierung der Reaktoren	268
10.2.1.2 Reaktionsraten und Gewichtsanteile.....	269
10.2.1.3 Diskrete Strukturen im Modell.....	271
10.2.1.4 Die Zielfunktion.....	271
10.2.2 Lösungsansatz.....	272
10.2.3 Validierung und Implementierung	272
10.2.4 Ergebnisse und Vorteile für den Kunden	273
11 Globale Optimierung in der Praxis.....	275
11.1 Energieminimale Molekülkonfiguration	275
11.2 Ein Verschnittproblem aus der Papierindustrie.....	279
11.3 Zuschnitt- und Packprobleme mit Kreisen, Polygonen und Ellipsen	282
11.3.1 Modellierung der Zuschnittbedingungen.....	283
11.3.1.1 Zuschnittbedingungen für Kreise.....	283
11.3.1.2 Zuschnittbedingungen für Polygone	285
11.3.1.3 Zuschnittbedingungen für Ellipsen	289
11.3.2 Problemstruktur und Symmetrie	294
11.3.3 Einige Ergebnisse.....	295
11.4 Optimale Verkaufsstrategien	296
12 Schlussbetrachtungen und Ausblick	301
12.1 Lernenswertes aus den Fallstudien	301
12.2 Parallele Optimierung	302
12.3 Zukünftige Entwicklungen.....	302
12.3.1 Simultane operative Planung und Design-Optimierung	305
12.3.2 Simultane operative Planung und strategische Optimierung	305
12.3.3 Polylithische Modellierungs- und Lösungsansätze.....	306
12.3.4 Globale Optimierung	306
12.4 Mathematische Optimierung für eine bessere Welt	306

A Mathematische Beschreibung der Optimierungsverfahren	313
A.1 Eine tiefere Betrachtung des Simplexverfahrens	313
A.1.1 Das Simplexverfahren — Eine detaillierte Beschreibung	313
A.1.2 Die Berechnung von Startlösungen	318
A.1.3 LP-Probleme mit oberen Schranken	319
A.1.4 Das duale Simplexverfahren	323
A.2 Dualitätstheorie	324
A.2.1 Konstruktion des dualen Problems in der linearen Programmierung	324
A.2.2 Interpretation des dualen Problems	326
A.2.3 Dualität und Komplementarität	327
A.3 Innere-Punkte-Methoden — Eine detaillierte Beschreibung	329
A.3.1 Primal-duale Innere-Punkte-Methoden	331
A.3.2 Prädiktor-Korrektor-Schritt	333
A.3.3 Zur Berechnung zulässiger Startpunkte	334
A.3.4 Die Berechnung des Homotopieparameters	334
A.3.5 Abbruchkriterium	335
A.3.6 Identifizierung einer Basis und Cross-Over	335
A.3.7 Innere-Punkte-Methoden versus Simplexverfahren	336
A.4 Gemischt-ganzzahlige nichtlineare Optimierung	336
A.4.1 Ein Äußere-Approximation-Verfahren für konvexe Probleme	336
A.4.2 Natürliche polyedrische Repräsentation	337
A.4.3 Äußere Approximation und MILP-Masterprobleme	338
A.4.4 Formulierung des Masterproblems	338
A.4.5 Schranken	340
A.4.6 Unzulässige Teilprobleme	341
A.4.7 Zusammenfassung des Äußere-Approximation-Verfahrens	342
A.4.8 Optimalität	343
A.4.9 Erweiterung des Äußere-Approximation-Verfahrens	344
A.4.9.1 Einbeziehung von Gleichungen	344
A.4.9.2 Behandlung nichtkonvexer MINLP-Probleme	345
B Glossar	347
Literaturverzeichnis	353
Index	373