

# Logistik: Rundreisen und Touren

von

Prof. Dr. Dr. h.c. Wolfgang Domschke  
TU Darmstadt

und

Prof. Dr. Armin Scholl  
Universität Jena

5., überarbeitete und aktualisierte Auflage

Oldenbourg Verlag München

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	<b>V</b>
<b>Symbolverzeichnis</b> .....	<b>XIII</b>
<b>Kapitel 1: Grundlagen</b> .....	<b>1</b>
1.1 Definitionen .....	1
1.2 Branch-and-Bound- sowie Branch-and-Cut-Verfahren .....	6
1.2.1 Grundprinzipien von B&B-Verfahren .....	6
1.2.1.1 Verzweigen von Problemen (Branching) .....	7
1.2.1.2 Ermittlung von Schranken und Ausloten von Problemen (Bounding) .....	8
1.2.2 Ablauf und Komponenten von B&B-Verfahren .....	9
1.2.3 Beispiele .....	16
1.2.3.1 Ein allgemeines ganzzahliges lineares Optimierungsproblem .....	16
1.2.3.2 Ein Knapsack-Problem .....	17
1.2.4 Branch-and-Cut-Verfahren .....	19
1.3 Heuristische Verfahren .....	20
1.3.1 Überblick .....	20
1.3.2 Eröffnungsverfahren .....	21
1.3.3 Lokale Suchverfahren / Verbesserungsverfahren .....	23
1.3.3.1 Reine Verbesserungsverfahren .....	23
1.3.3.2 Simulated Annealing .....	25
1.3.3.3 Tabu Search .....	27
1.3.3.4 Weitere Bemerkungen zu Eröffnungs- und lokalen Suchverfahren .....	30
1.3.4 Populationsbasierte Verfahren .....	31
1.3.4.1 Genetische Algorithmen .....	32
1.3.4.2 Ameisenalgorithmen .....	36
1.3.4.3 Scatter Search .....	36
1.3.5 Unvollständig ausgeführte exakte Verfahren .....	36
1.3.6 Relaxationsbasierte Verfahren .....	37
1.4 Literatur zu Kapitel 1 .....	38

<b>Kapitel 2: Einige nicht-klassische Transport- und Umladeprobleme . . . . .</b>	<b>41</b>
2.1 Sensitivitätsüberlegungen zum klassischen TPP . . . . .	41
2.2 Verallgemeinerte (lineare) Transport- und Umladeprobleme . . . . .	45
2.3 Bottleneck-Transport- und -Umladeprobleme . . . . .	46
2.3.1 Das Bottleneck-TTPP . . . . .	46
2.3.2 Untere und obere Schranken für die Engpasszeit beim Bottleneck-TTPP . . . . .	47
2.3.3 Überblick über Lösungsverfahren für Bottleneck-TTPPe . . . . .	49
2.3.4 Ein primales Verfahren für Bottleneck-TTPPe . . . . .	50
2.3.5 Weitere Bottleneck-TTPPe und -Umladeprobleme . . . . .	54
2.4 Verallgemeinerte lineare Zuordnungsprobleme . . . . .	56
2.4.1 Die betrachteten Probleme . . . . .	56
2.4.2 Überblick über Lösungsverfahren . . . . .	60
2.4.3 Beispiele für Lösungsverfahren . . . . .	61
2.4.3.1 Heuristische Eröffnungsverfahren . . . . .	61
2.4.3.2 Lokale Suchverfahren/Verbesserungsverfahren . . . . .	64
2.4.3.3 Das B&B-Verfahren von Nagelhout und Thompson . . . . .	65
2.4.3.4 Das B&B-Verfahren von Fisher et al. . . . .	68
2.4.3.5 Verfahrensvergleiche . . . . .	71
2.5 Fixkosten-TTPPe und -Umladeprobleme . . . . .	72
2.5.1 Problemstellung und Überblick über Lösungsverfahren . . . . .	72
2.5.2 Eigenschaften von Fixkosten-TTPPen und daraus ableitbare Verfahren . . . . .	74
2.5.3 Ein B&B-Verfahren . . . . .	77
2.5.3.1 Bestimmung von Up- und Down-Penalties . . . . .	77
2.5.3.2 Das B&B-Verfahren . . . . .	78
2.5.4 Hinweise zum Rechenaufwand für Fixkosten-TTPPe . . . . .	80
2.6 Transport- und Umladeprobleme mit sonstigen nichtlinearen Zielfunktionen . . . . .	80
2.6.1 Probleme mit konvexen Zielfunktionen . . . . .	81
2.6.2 Probleme mit nichtkonvexen Zielfunktionen . . . . .	83
2.7 Literaturhinweise zu Kapitel 2 . . . . .	86
2.8 Aufgaben zu Kapitel 2 . . . . .	92

<b>Kapitel 3: Traveling Salesman-Probleme</b> .....	<b>95</b>
3.1 Grundlagen .....	95
3.1.1 Probleme, Definitionen, Anwendungen .....	95
3.1.2 Mathematische Formulierungen für TSPE .....	99
3.1.2.1 Formulierungen für asymmetrische Probleme .....	99
3.1.2.2 Formulierungen für symmetrische Probleme .....	102
3.1.3 Lösungsmöglichkeiten für TSPE .....	103
3.2 Heuristische Verfahren .....	104
3.2.1 Eröffnungsverfahren .....	104
3.2.1.1 Die Verfahren „Bester Nachfolger“ und „Sukzessive Einbeziehung“ ..	104
3.2.1.2 Ein Eröffnungsverfahren von Christofides .....	107
3.2.1.3 Der Patching-Algorithmus von Karp und Modifikationen .....	108
3.2.1.4 Weitere Eröffnungsverfahren .....	110
3.2.2 Lokale Suchverfahren/Verbesserungsverfahren .....	111
3.2.2.1 Reine Verbesserungsverfahren .....	111
3.2.2.2 Heuristische Metastrategien .....	119
3.2.3 Testergebnisse .....	121
3.3 B&B-Verfahren für asymmetrische TSPE .....	121
3.3.1 Der Algorithmus von Little et al. (Algorithmus 3.6) .....	122
3.3.2 Ein Subtour-Eliminations-Algorithmus (Algorithmus 3.7) .....	126
3.3.3 Bounding-Regeln zur Verbesserung von Subtour-Eliminations-Algorithmen ..	132
3.3.3.1 Einführung .....	132
3.3.3.2 Bounding-Regel 1 .....	133
3.3.3.3 Bounding-Regel 2 .....	136
3.3.3.4 Bounding-Regel 3 .....	138
3.3.3.5 Abschließende Bemerkungen .....	139
3.4 B&B-Verfahren für symmetrische TSPE .....	140
3.4.1 Das 1-Baum-Problem als Relaxation des TSPs .....	142
3.4.2 Lagrange-Relaxationen für TSPE .....	144
3.4.3 Ascent-Methoden zur Maximierung unterer Schranken .....	146
3.4.4 Ein B&B-Verfahren (Algorithmus 3.9) .....	149

3.5 Verallgemeinerungen von TSPen . . . . .	153
3.5.1 M-Traveling Salesmen - Probleme . . . . .	153
3.5.2 Weitere Verallgemeinerungen von TSPen . . . . .	155
3.6 Literatur zu Kapitel 3 . . . . .	158
3.7 Aufgaben zu Kapitel 3 . . . . .	165
<b>Kapitel 4: Briefträgerprobleme . . . . .</b>	<b>167</b>
4.1 Einführung . . . . .	167
4.2 Definitionen und Vorüberlegungen zu Lösungsverfahren . . . . .	169
4.3 Kostenminimale Erweiterung eines gerichteten Graphen . . . . .	172
4.4 Kostenminimale Erweiterung eines ungerichteten Graphen . . . . .	174
4.4.1 Lösungsansatz . . . . .	174
4.4.2 Zur Lösung von MK-Matching-Problemen. . . . .	175
4.5 Kostenminimale Erweiterung eines gemischten Graphen . . . . .	180
4.5.1 Übersicht . . . . .	180
4.5.2 Das heuristische Eröffnungsverfahren Mixed1 . . . . .	181
4.5.3 Ein GRASP-Verfahren . . . . .	186
4.5.4 Modellierung des Briefträger-Problems in gemischten Graphen . . . . .	188
4.6 Ermittlung einer Euler-Tour in einem Euler-Graphen . . . . .	188
4.7 Weitere Briefträgerprobleme . . . . .	190
4.8 Literatur zu Kapitel 4 . . . . .	193
4.9 Aufgaben zu Kapitel 4 . . . . .	196

---

<b>Kapitel 5: Tourenplanung</b> .....	<b>197</b>
5.1 Grundlagen .....	197
5.1.1 Einführung und Definitionen .....	197
5.1.2 Klassifikation .....	200
5.1.2.1 Depot- und Kundencharakteristik .....	200
5.1.2.2 Fahrzeugcharakteristik .....	202
5.1.2.3 Problem- oder Zusatzcharakteristik .....	202
5.1.2.4 Zielsetzungen .....	203
5.1.3 Standardprobleme der Tourenplanung .....	203
5.1.4 Literaturüberblick .....	205
5.2 Modellierung knotenorientierter Probleme .....	206
5.2.1 Formulierungen für asymmetrische Probleme .....	206
5.2.1.1 Lineares Zuordnungsproblem mit zusätzlichen Restriktionen .....	206
5.2.1.2 Verallgemeinertes Zuordnungsproblem mit zusätzlichen Restriktionen .....	208
5.2.2 Eine Formulierung für symmetrische Probleme .....	209
5.3 Exakte Verfahren für knotenorientierte Probleme .....	211
5.3.1 Exakte Verfahren für asymmetrische Probleme .....	211
5.3.1.1 Berechnung unterer Schranken .....	211
5.3.1.2 Verzweigung und Dominanzregeln .....	216
5.3.2 Exakte Verfahren für symmetrische Probleme .....	217
5.3.2.1 Relaxation des Problems und Lösungsmöglichkeiten .....	218
5.3.2.2 Verzweigungsmöglichkeiten .....	220
5.4 VRPe als Set-Covering- oder Set-Partitioning-Probleme .....	221
5.4.1 Prinzipielle Vorgehensweise .....	221
5.4.2 Die Technik der Spaltengenerierung .....	223
5.4.3 Abschließende Bemerkungen zu Set-Covering und Set-Partitioning .....	225
5.5 Heuristische Verfahren für knotenorientierte Probleme .....	226
5.5.1 Klassifikation von Heuristiken .....	226
5.5.2 Route first-cluster second-Verfahren .....	228
5.5.2.1 Der Sweep-Algorithmus .....	228
5.5.2.2 Petal-Algorithmen .....	231
5.5.3 Cluster first-route second-Verfahren .....	233

---

5.5.4	Simultane Eröffnungsverfahren . . . . .	235
5.5.4.1	Eine Grundversion des Savings-Algorithmus . . . . .	235
5.5.4.2	Modifikationen des Savings-Algorithmus . . . . .	238
5.5.5	Lokale Suchverfahren/Verbesserungsverfahren . . . . .	240
5.5.6	Vergleich der Verfahren anhand von CVRPen. . . . .	243
5.5.7	Modifikation der Verfahren für VRPe mit Zeitfenstern. . . . .	243
5.5.8	Sonstige knotenorientierte VRPe. . . . .	246
5.6	Verfahren für kantenorientierte Probleme . . . . .	249
5.6.1	Eine mathematische Formulierung für das CCPP . . . . .	250
5.6.2	Ermittlung unterer Schranken . . . . .	252
5.6.3	Heuristische Lösungsverfahren . . . . .	255
5.7	Literaturhinweise zu Kapitel 5 . . . . .	259
5.8	Aufgaben zu Kapitel 5 . . . . .	268
	<b>Anhang: Lösungen zu den Aufgaben . . . . .</b>	<b>271</b>
	<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>279</b>