

Anita Amberg

# **Entscheidungsprobleme in kapazitätsbeschränkten Verkehrs- und Kommunikationsnetzen**

Entwicklung

neuer

Lösungsverfahren

Dissertation

Technische Universität Darmstadt 2001

D17

Schriften zur quantitativen Betriebswirtschaftslehre  
und Wirtschaftsinformatik

herausgegeben von Prof. Dr. Stefan Voß

**Anita Amberg**

**Entscheidungsprobleme in kapazitätsbeschränkten  
Verkehrs- und Kommunikationsnetzen**

Entwicklung neuer Lösungsverfahren

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag  
Aachen 2001

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

*Amberg, Anita:*

Entscheidungsprobleme in kapazitätsbeschränkten Verkehrs- und  
Kommunikationsnetzen: Entwicklung neuer Lösungsverfahren/

Anita Amberg. Aachen: Shaker, 2001

(Schriften zur quantitativen Betriebswirtschaftslehre  
und Wirtschaftsinformatik)

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2000

ISBN 3-8265-9408-8

Copyright Shaker Verlag 2001

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen  
oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungs-  
anlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8265-9408-8

ISSN 1616-1920

Shaker Verlag GmbH • Postfach 1290 • 52013 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • eMail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen einer externen Promotion am Institut für Betriebswirtschaftslehre, Fachgebiet Operations Research, an der Technischen Universität Darmstadt.

Mein herzlicher Dank gilt Herrn Professor Dr. Wolfgang Domschke dafür, daß er mir die Gelegenheit zur Promotion gegeben hat, für seine zahlreichen Verbesserungsvorschläge und Hinweise und für die Unterstützung, die ich an seinem Lehrstuhl in dieser Zeit erfahren habe.

Herrn Professor Dr. Stefan Voß danke ich für die Übernahme des Koreferates und ganz besonders für die engagierte Betreuung der Arbeit, seine wertvollen Anregungen und Fragen sowie für sein Interesse und seine wissenschaftliche Neugier, mit denen er die Arbeit begleitet hat.

Für die sorgfältige und kritische Durchsicht des Manuskripts möchte ich mich bei Frau Birgit Diesing und Frau Dr. Britta Giesen bedanken.

Herrn Holger Burmann danke ich für seine schnelle und geduldige Hilfe im Kampf mit Textverarbeitungs- und anderen Programmen.

Dank gebührt auch meiner Familie, mit deren Rückhalt und Unterstützung diese Arbeit erst möglich war: meinen Eltern Frau Heide und Herrn Leander Amberg, Herrn Gert Buchsbaum und meinen Töchtern Charlotte und Katharina Buchsbaum für ihr Verständnis auch in Zeiten, in denen es hektisch zugeht.

Mein Dank gilt allen, die mir bei meiner Promotion mit Rat und Hilfe nicht nur fachlich, sondern auch menschlich zur Seite gestanden haben und deren Ermutigung mir die Kraft gegeben hat, dieses Vorhaben zum Erfolg zu bringen. Besonderer Dank gilt hier Frau Marie-Luise Metz, Herrn Paul-Hermann Gruner und Frau Silke Thomas.

Anita Amberg



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungs- und Symbolverzeichnis .....</b>	<b>V</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>IX</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>XI</b>
<b>1. Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Graphentheoretische Grundlagen .....</b>	<b>7</b>
<b>2.1. Grundbegriffe .....</b>	<b>7</b>
<b>2.2. Bewertungen in Graphen .....</b>	<b>10</b>
<b>2.3. Größere Strukturen in Graphen .....</b>	<b>12</b>
2.3.1. Wege und Entfernungen .....	12
2.3.2. Teilgraphen und Supergraphen .....	14
2.3.3. Zusammenhangskomponenten .....	16
<b>2.4. Bäume und Wälder .....</b>	<b>16</b>
<b>2.5. Kapazitätsbeschränkungen: Definition von Teilbäumen .....</b>	<b>17</b>
<b>2.6. Optimierung: Minimale spannende Bäume .....</b>	<b>20</b>
<b>3. Metaheuristiken .....</b>	<b>21</b>
<b>3.1. Ein Anwendungsproblem .....</b>	<b>23</b>
<b>3.2. Lokale Suchverfahren .....</b>	<b>25</b>
3.2.1. Grundbegriffe .....	25
3.2.2. Simulated Annealing .....	30
3.2.3. Tabu Search .....	35
3.2.3.1. Statisches Tabu Search .....	38
3.2.3.2. Grundbegriffe dynamischer Tabu Search Methoden .....	43
3.2.3.3. Die Reverse Elimination Methode .....	44
3.2.3.4. Die Cancellation Sequence Methode .....	53
3.2.3.5. Komplexität der Tabu Search Methoden .....	61
3.2.3.6. Variationsmöglichkeiten .....	65

<b>3.3. Verfahren der Heuristischen Wiederholung -</b>	
<b>    Iterative Greedy Heuristiken IGH .....</b>	<b>75</b>
3.3.1. Überblick .....	75
3.3.2. Klassifikationsschema .....	76
3.3.2.1. Definition der Alternativenmenge - die Nachbarschaftsstruktur ...	77
3.3.2.2. Evaluationskriterium .....	78
3.3.2.3. Auswahlregel: Randomisierung und Kandidatenlisten .....	81
3.3.2.4. Kombination mit lokaler Suche .....	83
3.3.2.5. Reduktionstechniken .....	84
3.3.3. Beispielrechnungen für das Knapsackproblem .....	91
3.3.4. Komplexität .....	97
3.3.5. Literatur zu Iterativen Greedy Heuristiken .....	98
<b>3.4. Genetische Algorithmen .....</b>	<b>100</b>
<b>4. Netzwerkdesign mit Baumstrukturen - Capacitated</b>	
<b>    Minimum Spanning Tree Problem CMST .....</b>	<b>105</b>
<b>4.1. Überblick und Problembeschreibung .....</b>	<b>105</b>
<b>4.2. Mathematische Formulierung .....</b>	<b>109</b>
<b>4.3. Exakte Verfahren und untere Schranken .....</b>	<b>111</b>
<b>4.4. Heuristiken .....</b>	<b>116</b>
4.4.1. Eröffnungsverfahren .....	117
4.4.1.1. Konstruktionsverfahren .....	117
4.4.1.2. Savingsverfahren .....	121
4.4.1.3. Duale Verfahren .....	123
4.4.1.4. Auf Aggregation und Dekomposition basierende Verfahren .....	124
4.4.1.5. Verfahren mit konstanter Fehlerschranke .....	124
4.4.2. Verbesserungsverfahren .....	125
4.4.2.1. Lokale Austauschverfahren .....	125
4.4.2.2. Iterative Greedy Heuristiken .....	127
4.4.3. Qualität der Heuristiken - ein Literaturüberblick .....	130
<b>4.5. Metastrategien für das CMST .....</b>	<b>134</b>
4.5.1. Lokale Suchverfahren mit Knotenaustausch .....	134
4.5.1.1. Parameter und Algorithmen .....	134
4.5.1.2. Numerische Ergebnisse .....	138
4.5.2. Iterative Greedy Heuristiken .....	149
4.5.2.1. Prim-basierte Iterative Greedy Heuristiken .....	150



4.5.2.2.	EW-basierte Iterative Greedy Heuristiken - Vorbemerkungen ...	153
4.5.2.3.	EW-basierte Adaptive Greedy Heuristiken .....	154
4.5.2.4.	EW-basierte Randomisierte Greedy Heuristiken .....	163
4.5.2.5.	Vergleich von Adaptiven und Randomisierten Iterativen Greedy Heuristiken .....	177
4.5.3.	Vergleich der lokalen Suchverfahren und der Iterativen Greedy Heuristiken .....	178
<b>5.</b>	<b>Tourenplanung - Capacitated Arc Routing Problem CARP ..</b>	<b>179</b>
<b>5.1.</b>	<b>Überblick und Eingrenzung der Problemstellung .....</b>	<b>179</b>
<b>5.2.</b>	<b>Mathematische Formulierung .....</b>	<b>184</b>
<b>5.3.</b>	<b>Das Chinese Postman Problem CPP .....</b>	<b>188</b>
5.3.1.	Das ungerichtete Chinese Postman Problem .....	189
5.3.2.	Das gerichtete Chinese Postman Problem .....	192
5.3.3.	Das gemischte Chinese Postman Problem .....	193
<b>5.4.</b>	<b>Exakte Verfahren .....</b>	<b>196</b>
<b>5.5.</b>	<b>Untere Schranken .....</b>	<b>197</b>
5.5.1.	Der Chinese Postman Lower Bound CPPLB .....	199
5.5.2.	Der Matching Lower Bound MLB .....	199
5.5.3.	Der Node Scanning Lower Bound NSLB .....	202
5.5.4.	Der Matching Path Lower Bound MPLB .....	204
5.5.5.	Die Successive Cuts Lower Bounds SCLB1 und SCLB2 .....	207
5.5.6.	Die Node Duplicated Lower Bounds NDLB1, NDLB2 und NDLB3 .....	212
5.5.7.	Der q-Chain Lower Bound .....	224
<b>5.6.</b>	<b>Ein neues Lower Bounding Verfahren: Der Hierarchical Relaxations Lower Bound HRLB .....</b>	<b>225</b>
5.6.1.	Überblick .....	225
5.6.2.	Mathematische Formulierungen und Grundlagen .....	233
5.6.3.	Verfahrensablauf .....	243
5.6.4.	Beispielrechnungen .....	252
5.6.4.1.	Einfaches Beispiel .....	253
5.6.4.2.	Literaturdatensatz DeArmon 5 .....	264
5.6.4.3.	Literaturdatensatz DeArmon 14 .....	276
5.6.5.	Verbesserungs- und Erweiterungsmöglichkeiten .....	291
5.6.5.1.	Verbesserungen der unteren Schranke .....	291
5.6.5.2.	Anwendung im Rahmen einer Heuristik .....	295

<b>5.7. Heuristische Verfahren</b>	<b>296</b>
5.7.1. Eröffnungsverfahren	296
5.7.2. Verbesserungsverfahren	304
<b>5.8. Ein RFCS-basiertes Austauschverfahren</b>	<b>307</b>
5.8.1. Ein Beispiel	308
5.8.2. Bildung der Giant Route	309
5.8.3. Zerlegung der Giant Route und Bildung des Zyklenknotengraphen	309
5.8.4. Savings-Algorithmus für das Arc-Constraint-CMST	314
5.8.5. Transformation einer CMST-Lösung in eine CARP-Lösung	317
5.8.6. Mathematische Formulierung für das Arc-Constraint-CMST	320
5.8.7. Austauschverfahren für das Arc-Constraint-CMST	322
5.8.8. Reoptimierungsprozedur	324
5.8.9. Zusätzliche Nebenbedingungen und Zielsetzungen	325
5.8.10. Lösungsqualität	327
<b>5.9. Numerische Ergebnisse</b>	<b>329</b>
5.9.1. Überblick	329
5.9.2. Problem Daten	330
5.9.2.1. Königstein	330
5.9.2.2. Wennigsen	332
5.9.2.3. DeArmon-Daten	333
5.9.2.4. Random-Dateien	334
5.9.3. Der Hierarchical Relaxations Lower Bound HRLB	335
5.9.3.1. Königstein	335
5.9.3.2. Wennigsen	341
5.9.3.3. DeArmon-Daten	349
5.9.3.4. Qualität des Hierarchical Relaxations Lower Bounds	350
5.9.4. Die Route-First-Cluster-Second-Verfahren	351
5.9.4.1. Königstein	351
5.9.4.2. Wennigsen	355
5.9.4.3. DeArmon-Daten	357
5.9.4.4. Random-Daten	358
5.9.4.5. Qualität der RFCS-Verfahren	361
<b>6. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>363</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>369</b>
<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>381</b>

# Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

## Allgemeine Abkürzungen und Symbole

B&B	Branch&Bound
B&C	Branch&Cut
LB	Lower Bound, untere Schranke für den Zielfunktionswert
MK	Minimalkosten
o.B.d.A.	ohne Beschränkung der Allgemeinheit
$O(f(n))$	Ordnung einer Funktion $f(n)$
$s(i, j) = s_{ij}$	kürzeste Entfernung zwischen Knoten $i$ und $j$
$s(X, Y) = s_{XY}$	kürzeste Entfernung zwischen zwei Mengen $X$ und $Y$
UB	Upper Bound, obere Schranke für den Zielfunktionswert
ZF	Zielfunktion
$x := y$	$x$ erhält den Wert von $y$ zugewiesen
$X := Y$	Menge $X$ erhält die Elemente von Menge $Y$ zugewiesen
$\lceil x \rceil$	obere Gaußklammer: kleinste ganze Zahl größer oder gleich $x$
$x \in X$	$x$ ist Element von $X$
$x \notin X$	$x$ ist nicht Element von $X$
$ X $	Kardinalität der Menge $X$ (Anzahl der Elemente der Menge $X$ )
$X \cup Y$	Vereinigung der Mengen $X$ und $Y$
$X \setminus Y$	Differenz zwischen den Mengen $X$ und $Y$
$X \times Y$	Kartesisches Produkt der Mengen $X$ und $Y$
$\infty$	unendlich
$\emptyset$	leere Menge
$\mathbb{R}$	Menge der reellen Zahlen
$[i, j]$	Kante zwischen Knoten $i$ und Knoten $j$
$(i, j)$	Pfeil oder gerichtete Kante von Knoten $i$ zu Knoten $j$

## Metaheuristiken

AC	Adaptives Kriterium
AGH	Adaptive Greedy Heuristik
ALC	Aspiration Level Criterion (Kriterium)
ART	Memory Adaptive Reasoning Technique

ATL	Aktive Tabuliste
CL	Kandidatenliste
CLL	Kandidatenlistenlänge
CS	Cancellation Sequence
CSM	Cancellation Sequence Methode
GC	Greedy Kriterium
GH	Greedy Heuristik
GRASP	Greedy Randomized Adaptive Search Procedure
IGH	Iterative Greedy Heuristik
LS	Lokales Suchverfahren
MRL	Modifizierte Running List
Pilot(-Method)	Perform Improved Look-Ahead with Objective-Value Tests
RAGH	Randomisierte Adaptive Greedy Heuristik
RCS	Residual Cancellation Sequence
RE	Reoptimierung, Reoptimierungsverfahren
REM	Reverse Elimination Methode
RGH	Randomisierte Greedy Heuristik
SA	Simulated Annealing
SC	Selektionskriterium
STS	Statisches Tabu Search
TS	Tabu Search

## Netzwerkdesign - Capacitated Minimum Spanning Tree Problem

### *Problem- und Verfahrensbezeichnungen*

ACCMST	(Multiple-Center-)Arc-Constraint-CMST, wird im Rahmen der Tourenplanung behandelt
CMST	Capacitated Minimum Spanning Tree Problem
EW	Esau-Williams-Algorithmus
MST	Minimum Spanning Tree Problem, minimaler spannender Baum
PSA	Paralleler Savings-Algorithmus
TSP	Traveling Salesman Problem
VAM	Vogelsche Approximationsmethode, Regret-Verfahren

### *Graph für das Capacitated Minimum Spanning Tree Problem*

$G = (V, A, c; b)$	gerichteter Graph mit
$V = \{0, \dots, n\}$	Knotenmenge mit Depotknoten 0 und Knotenanzahl $n + 1$

A	Pfeilmenge
$c_{ij}$	Kosten von Pfeil $(i, j) \in A$
$b_i$	Nachfrage von Knoten $i \in V$
Q	Kapazität der Teilbäume

## Tourenplanung - Capacitated Arc Routing Problem

### *Problem- und Verfahrensbezeichnungen*

ACCMST	(Multiple-Center-)Arc-Constraint-CMST
CARP	Capacitated Arc Routing Problem
1-CARP	Ein-Depot-(One-Center-)CARP
M-CARP	Mehr-Depot-(Multiple-Center-)CARP
CCPP	Capacitated Chinese Postman Problem
CFRS	Cluster-First-Route-Second-Verfahren
CPP	Chinese Postman Problem oder Briefträgerproblem
CPPLB	Chinese Postman Lower Bound
HRLB	Hierarchical Relaxations Lower Bound
MLB	Matching Lower Bound
MPLB	Matching Path Lower Bound
NDLB	Node Duplicated (Matching Path) Lower Bound
NSLB	Node Scanning Lower Bound
RFCS	Route-First-Cluster-Second-Verfahren
RPP	Rural Postman Problem
SCLB	Successive Cuts Lower Bound

### *Graph für das Capacitated Arc Routing Problem*

$G = (V, E, q, t, c)$	Ungerichteter Graph eines CARP mit
V	Knotenmenge
E	Kantenmenge
$q_e$	Nachfrage der Kante $e = [i, j] \in E$
$t_e$	Zeitbedarf $t_{ij}$ der Kante $e = [i, j] \in E$
$c_e$	Kosten $c_{ij}$ der Kante $e = [i, j] \in E$
$R \subseteq E$	Teilmenge der zu bedienenden Kanten
$D \subset V$	Menge der Depots: $D = \{1, \dots,  D \}$ (M-CARP) oder
$d \in V$	Depotknoten (1-CARP)
Q, $Q_d$	Mengenkapazität des Fahrzeugs $d \in D$
$T_d$	Zeitkapazität des Fahrzeugs $d$

*Bezeichnungen und Symbole des Hierarchical Relaxations Lower Bound*

$R_i$	Relaxation des CCPP in Iteration $i$ des HRLB
$D_i$	Dual zur Relaxation $R_i$
$WR_i$	W-Relaxation in Iteration $i$ des HRLB
$WD_i$	Dual zur W-Relaxation
$CPP_i$	Quasikosten-CPP der Iteration $i$ des HRLB
$CPPD_i$	Dual des Quasikosten-CPP
$W, W_i$	zentrale Menge
$S_i = S(W_i)$	W-Schnitt
$p_i = p(W_i)$	fehlende Kantenanzahl im kritischen W-Schnitt $S_i$
W-Bedingung	Kantengradbedingung für einen W-Schnitt
$\mathcal{W}_i = \{W_1, \dots, W_i\}$	Menge aller zentralen Mengen der Iteration $i$ , für die in Relaxation $R_i$ eine W-Bedingung berücksichtigt wird
$\mathcal{U}$	Menge aller U-Bedingungen in Iteration $i$
$w, w(i)$	Dualvariablenvektor für W-Bedingungen in Iteration $i$ , Lösung von $WD_i$ , Teillösung von $D_i$
$w_j = w(W_j)$	Dualvariablenwert für W-Bedingung bzgl. $W_j$
$u, u(i)$	Dualvariablenvektor für W-Bedingungen in Iteration $i$ , Lösung von $CPPD_i$ , Teillösung von $D_i$
$\hat{c}_e, \hat{c}_e^{w(i)}$	Quasikosten für Kante $e \in E$ basierend auf $w(i)$
W-Phase	Phase des HRLB zur Ableitung der MK- und W-Kanten
M-Phase	Matching-Phase zur Ableitung der M-, X- und U-Kanten
M-Kante	Matching-Kante
$e_{\min}(i)$	MK-Kante Minimalkostenkante in W-Schnitt $S_i$
$y_e^W \geq 0$	W-Kanten Lösungskanten der W-Relaxation ( $e \in E$ )
$x_e$	X-Kante Lösungskante des Quasikosten-CPP ( $e \in E$ )
$y_e^U$	U-Kanten Kanten zur Korrektur der Lösung der W-Relaxation ( $e \in E$ )
$\lambda_e^W$	$\lambda$ -Faktor Umrechnungsfaktor zur Bestimmung von W- und U-Kanten
$WK_i$	W-Kosten Gesamtkosten der W-Kanten
$MK_i$	M-Kosten Gesamtkosten der M-Kanten bzw. der X- oder U-Kanten
$LB_i = WK_i + MK_i$	Untere Schranke für die Leerkanten in Iteration $i$

# Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1:	Graph $G = (V, E)$ und spannender Baum $T$ mit drei Teilbäumen .....	18
Abb. 4.1:	CMST-Graph und minimaler spannender Baum .....	107
Abb. 4.2:	Lösungen des modifiziertem Kruskal- und Prim-Algorithmus .....	118
Abb. 5.1:	Graph $G = (V, E, c = q)$ und CPP-Matching-Graph (Lösung fett) ...	190
Abb. 5.2:	Minimaler Eulergraph.....	191
Abb. 5.3:	Interdependenz des Ausgleichs von ungeraden Kantengraden und ungenügender Anzahl von Kanten im zentralen Schnitt.....	200
Abb. 5.4:	MLB-Matching-Graph und Ergänzung des Original-Graphen .....	202
Abb. 5.5:	Unzulässige und zulässige Ergänzung mit D-Paths.....	203
Abb. 5.6:	Matching-Graph für $MPLB_x$ .....	206
Abb. 5.7:	Matching-Graph für $SCLB2_{\{0, 1, 2\}}$ .....	211
Abb. 5.8:	Matching-Graph für $NDLB1$ .....	214
Abb. 5.9:	Matching-Graph für $NDLB2_{\{0, 1, 2\}}$ .....	216
Abb. 5.10:	Teilgraph, der ohne Verdopplung der Leerkante $[i, j]$ wieder verlassen werden kann .....	219
Abb. 5.11:	Teilgraph, der nicht ohne Verdopplung der Leerkante $[i, j]$ verlassen werden kann .....	220
Abb. 5.12:	Matching-Graph für $NDLB3$ .....	221
Abb. 5.13:	Ergänzung des Original-Graphen für $NDLB3$ .....	222
Abb. 5.14:	Ergänzung für $NDLB3$ bei Modifikation $q(0, 1) = 9$ .....	223
Abb. 5.15:	W-Schnitte des HRLB .....	227
Abb. 5.16:	CARP-Graph nach der W-Phase der 3. Iteration und Matching-Graph.....	229
Abb. 5.17:	Einfacher und alternierender Zyklus .....	250
Abb. 5.18:	Legende zu den HRLB-Beispielrechnungen .....	252
Abb. 5.19:	CARP- und CPP-Matching-Graph $G = G_0$ und $MG_0$ : $MK_0 = c_{Euler} = 22$ .....	253
Abb. 5.20:	$G_1$ und $MG_1$ : $WK_1 = 12, MK_1 = 22 \Rightarrow LB_1 = 34$ .....	256
Abb. 5.21:	$G_2$ und $MG_2$ : $WK_2 = 20, MK_2 = 22 \Rightarrow LB_2 = 42$ .....	257
Abb. 5.22:	$G_3$ und $MG_3$ : $WK_3 = 32, MK_3 = 20 \Rightarrow LB_2 = 52$ .....	259
Abb. 5.23:	$G_4$ und $MG_4$ : $WK_4 = 38, MK_4 = 20 \Rightarrow LB_4 = 58$ .....	261
Abb. 5.24:	Primale Lösung des HRLB .....	263
Abb. 5.25:	DeArmon 5: Graph $G = G_0$ und Eulerkanten.....	264
Abb. 5.26:	DeArmon 5: Matching-Graph $MG_0 = MG_{CPP}$ , $MK_0 = c_{Euler} = 26$ .....	265
Abb. 5.27:	DeArmon 5: Graph $G_1$ nach Iteration 1: $WK_1 = 28$ .....	267

Abb. 5.28: DeArmon 5: Matching-Graph $MG_1$ , $w_1 = 4$ , $MK_1 = 26$ .....	268
Abb. 5.29: DeArmon 5: Graph $G_2$ nach Iteration 2: $WK_2 = 34$ , Graph $G_3 = G_2$	270
Abb. 5.30: DeArmon 5: Matching-Graph $MG_2$ , $w_1 = 4$ und $w_2 = 3$ , $MK_2 = 26$	271
Abb. 5.31: DeArmon 5: $G_4$ nach Iteration 4: $WK_4 = 53$ .....	274
Abb. 5.32: DeArmon 5: Matching-Graph $MG_4$ , $w_1 = 4$ , $w_2 = 2$ und $w_4 = 7$ , $MK_4 = 8$ .....	275
Abb. 5.33: DeArmon 14: Graph $G_{CPP} = G_0$ mit Eulerkanten .....	276
Abb. 5.34: DeArmon 14: HRLB-Matching-Graphen ( $MG_5$ nur für Euler- Version).....	277
Abb. 5.35: DeArmon 14: Graph $G_1$ nach Iteration 1 .....	280
Abb. 5.36: DeArmon 14: Graph $G_2$ nach Iteration 2 .....	281
Abb. 5.37: DeArmon 14: Graph $G_3$ nach Iteration 3, Graph $G_4$ für Euler-Version .....	284
Abb. 5.38: DeArmon 14: Graph $G_5$ nach Iteration 5 der Euler-Version.....	286
Abb. 5.39: DeArmon 14: Original-Version: Graph $G_4$ nach der W-Phase .....	288
Abb. 5.40: Matching-Graphen $MG_4$ und $MG_5$ der Original-Version.....	289
Abb. 5.41: Graph $G = (V, E, q, t)$ eines M-CARP .....	308
Abb. 5.42: Der Zyklenknoten- oder CMST-Graph $G'$ für Partition $P_1$ .....	312
Abb. 5.43: Minimaler Wald mit zwei Komponenten .....	314
Abb. 5.44: Zulässige CMST-Lösung mit Gesamtkosten von 6 .....	316
Abb. 5.45a: Transformation von Teilbaum 1 in Route 1.....	318
Abb. 5.45b: Transformation von Teilbaum 2 in Route 2.....	319
Abb. 5.46: Zwei benachbarte CMST-Lösungen mit je zwei Teilbäumen.....	323
Abb. 5.47: Straßennetz von Königstein (vgl. Zhu (1989, 1992)) .....	331
Abb. 5.48: Straßennetz von Wennigsen (vgl. Zhu (1992)).....	332
Abb. 5.49: Graph von Wennigsen mit W-Schnitten des HRLB .....	343



# Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1:	Daten des Knapsackbeispiels .....	23
Tab. 3.2:	Ablauf von Simulated Annealing .....	32
Tab. 3.3:	Akzeptanzwahrscheinlichkeiten bei Simulated Annealing .....	33
Tab. 3.4:	Parameter der STS .....	38
Tab. 3.5:	Tabuprozeß der STS .....	39
Tab. 3.6:	Anwendungsprozeß der STS .....	40
Tab. 3.7:	Iterationen der STS .....	43
Tab. 3.8:	Parameter der REM .....	45
Tab. 3.9:	Anwendungsprozeß der REM .....	45
Tab. 3.10:	Tabuprozeß der REM .....	47
Tab. 3.11:	Tabuprozeß der REM rem bei verkürzter Running List .....	48
Tab. 3.12:	Iterationen der REM .....	51
Tab. 3.13:	Tabuprozeß der REM-Nachbar .....	53
Tab. 3.14:	Parameter der CSM .....	53
Tab. 3.15:	Anwendungsprozeß der CSM .....	54
Tab. 3.16:	Tabuprozeß der CSM .....	55
Tab. 3.17:	Iterationen der CSM .....	61
Tab. 3.18:	Kardinalität von Optimierungsproblem und Nachbarschaftsstruktur ..	62
Tab. 3.19:	Komplexität der Tabu Search Methoden .....	65
Tab. 3.20:	Dominanz im Knapsackbeispiel .....	66
Tab. 3.21:	Iterationen der STS bei Attributdifferenzierung .....	70
Tab. 3.22a:	Strategien zur Konstruktion von Iterativen Greedy Heuristiken .....	89
Tab. 3.22b:	Strategien zur Konstruktion von Iterativen Greedy Heuristiken .....	90
Tab. 3.23:	Hauptkriterien verschiedener Greedy Heuristiken .....	91
Tab. 3.24:	Daten des Knapsackbeispiels .....	92
Tab. 3.25:	Verlauf der Greedy Heuristik .....	93
Tab. 3.26:	Verlauf der Randomisierten Greedy Heuristik mit Auswahlkombination (3, 3, 1) .....	94
Tab. 3.27:	Verlauf der Adaptiven Greedy Heuristik .....	95
Tab. 3.28:	Verlauf der Randomisierten Adaptiven Greedy Heuristik mit Auswahlkombination (1, 3, 1) .....	96
Tab. 3.29:	Ablauf Genetischer Algorithmen .....	102
Tab. 4.1:	Simulated Annealing: CMST-Ergebnisse .....	140
Tab. 4.2:	Statisches Tabu Search: CMST-Ergebnisse .....	140

Tab. 4.3:	Cancellation Sequence Methode: CMST-Ergebnisse .....	141
Tab. 4.4:	Reverse Elimination Methode: CMST-Ergebnisse .....	142
Tab. 4.5:	REM-Nachbar bei unterschiedlichen Problemlassen und Kapazitäten .....	143
Tab. 4.6:	Vergleich der durchschnittlichen Qualität (ABW UBs) und der Anzahl erreichter Upper Bounds (# UBs) für ausgewählte Tabu Search Verfahren .....	144
Tab. 4.7:	Ergebnisse der 20 besten einzelnen Verfahren .....	145
Tab. 4.8:	Lokale Suchverfahren: Aggregierte Ergebnisse .....	147
Tab. 4.9:	Durchschnittliche Ausnutzung $T_{\emptyset}$ /Laufzeit und Verbesserung gegenüber EW bei Erhöhung der Laufzeit .....	148
Tab. 4.10:	Preprocessing-Techniken bei STS 24.....	149
Tab. 4.11:	Reoptimierung und Preprocessing bei Prim-AGHs .....	152
Tab. 4.12:	Ergebnisse der Prim-RGHs mit der AGH-Zeitschranke .....	152
Tab. 4.13:	Ergebnisse der Prim-RGHs mit der EW-Zeitschranke .....	153
Tab. 4.14:	Abweichung von den UBs bei AC=EW, AC=RE und verschie- denen Stopkriterien .....	158
Tab. 4.15:	Laufzeit pro Instanz (in Sekunden) bei AC=EW, AC=RE und verschiedenen Stopkriterien .....	159
Tab. 4.16:	Reduktion der Rechenzeit durch NI5 und NI1 gegenüber NI- .....	159
Tab. 4.17:	Variation des Selektionskriteriums $GC > 0.5/10$ für AC=RE NI- .....	160
Tab. 4.18:	Kombination AC=RE + LS.....	161
Tab. 4.19:	Adaptives Kriterium AC=LS .....	162
Tab. 4.20:	Zeitverhalten der RGH CO cll = 4 mit Ergänzung EW, RE oder LS .....	164
Tab. 4.21:	Qualität der RGH CO cll = 4 mit Ergänzung EW, RE oder LS .....	165
Tab. 4.22:	Ergebnisse der RGH-Verfahren CO und LI .....	166
Tab. 4.23:	Ergebnisse der RGH-Verfahren HA, PR und DC.....	167
Tab. 4.24:	Ergebnisse der besten Parameterwerte jedes RGH-Verfahrens, allein und in Kombination mit RGH-Typ DC .....	168
Tab. 4.25:	Aggregierte Ergebnisse, allein und in Kombination mit DC .....	169
Tab. 4.26:	Variationsbreite der Abweichung von den UBs .....	170
Tab. 4.27:	Abweichung von den UBs bei Differenzierung nach Problem- klassen für RGH CO und LI.....	171
Tab. 4.28:	Abweichung von den UBs bei Differenzierung nach Problem- klassen für RGH PR und HA .....	172
Tab. 4.29:	Durchschnittliche und maximale Zeit der letzten Verbesserung.....	174
Tab. 4.30:	Erhöhung der Laufzeit .....	176
Tab. 5.1:	Berechnung des MPLB .....	207

---

Tab. 5.2:	Verfahrensablauf des HRLB .....	244
Tab. 5.3:	Charakteristika der DeArmon-Daten.....	333
Tab. 5.4:	Königstein: HRLB - Veränderung gegenüber dem Eulergraphen ...	340
Tab. 5.5:	Wennigsen: HRLB - Veränderung gegenüber dem Eulergraphen ...	348
Tab. 5.6:	HRLB für die DeArmon-Daten.....	349
Tab. 5.7:	RFCS-Verfahren für Königstein .....	352
Tab. 5.8:	RFCS-Verfahren für Wennigsen.....	355
Tab. 5.9:	RFCS-Verfahren für die DeArmon-Daten.....	357
Tab. 5.10:	RFCS-Verfahren für die Random-Daten: Abweichung von den unteren Schranken .....	360
Tab. 5.11:	RFCS-Verfahren für die Random-Daten: Rechenzeiten pro Instanz (Sekunden) .....	361