

Neue Tabusuche-Heuristiken für die logistische Tourenplanung bei restringierendem Anhängereinsatz, mehreren Depots und Planungsperioden

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines
Doktors der Wirtschaftswissenschaft

Eingereicht an der
Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät
der Universität Regensburg

vorgelegt von
Stephan Scheuerer

Tag der Disputation: 2. April 2004

Berichterstatter: Prof. Dr. H. Steckhan und
Prof. Dr. F. Lehner

Meinen Eltern

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	vii
Tabellenverzeichnis	ix
Abkürzungsverzeichnis	xi
Symbolverzeichnis	xv
1 Einleitung	1
1.1 Gegenstand und Motivation	1
1.2 Zielsetzung	5
1.3 Aufbau	7
2 Tourenplanungsprobleme	9
2.1 Das Standardproblem der Tourenplanung (VRP)	9
2.1.1 Problembeschreibung	9
2.1.2 Benchmarkprobleme	11
2.2 Überblick über Varianten von Tourenplanungsproblemen . . .	13
2.2.1 Gängige Varianten	13
2.2.2 Klassifikationsansätze	20
2.3 Fokussierte Varianten von Tourenplanungsproblemen	21
2.3.1 Periodische Tourenplanung (PVRP)	21
2.3.1.1 Problembeschreibung inklusive mathematischer Formulierung	21
2.3.1.2 Benchmarkprobleme	24
2.3.1.3 Literaturüberblick	26
2.3.2 Mehrdepot-Tourenplanung (MDVRP)	33

2.3.2.1	Problembeschreibung inklusive Rekurs auf die PVRP-Formulierung	33
2.3.2.2	Benchmarkprobleme	34
2.3.2.3	Literaturüberblick	36
2.3.3	Tourenplanung bei restringierendem Anhängereinsatz (TTRP)	42
2.3.3.1	Problembeschreibung inklusive neuer mathe- matischer Formulierung	42
2.3.3.2	Benchmarkprobleme	53
2.3.3.3	Literaturüberblick	55
2.4	Formulierung neuer Tourenplanungsprobleme	56
2.4.1	Periodische Tourenplanung bei restringierendem An- hängereinsatz (PTTRP)	57
2.4.1.1	Problembeschreibung inklusive neuer mathe- matischer Formulierung	57
2.4.1.2	Entwicklung von Benchmarkproblemen	62
2.4.2	Mehrdepot-Tourenplanung bei restringierendem An- hängereinsatz (MDTTRP)	65
2.4.2.1	Problembeschreibung inklusive Rekurs auf die PTTRP-Formulierung	65
2.4.2.2	Entwicklung von Benchmarkproblemen	66
3	Entwicklung neuer Konstruktionsverfahren für das TTRP	69
3.1	Heuristiken für das Rundreiseproblem	69
3.2	Bekannte Konstruktionsverfahren für das VRP	73
3.2.1	Savings-Algorithmus	73
3.2.2	Sweep-Algorithmus	74
3.2.3	Generalized Assignment-Algorithmus	75
3.3	Bekannte Konstruktionsverfahren für das TTRP	76
3.3.1	Verfahren von Semet und Taillard	77
3.3.2	Verfahren von Semet	78
3.3.3	Verfahren von Chao	79

3.4	Das neue TTRP-Konstruktionsverfahren T-Cluster	80
3.5	Das neue TTRP-Konstruktionsverfahren T-Sweep	83
3.6	Vergleich der TTRP-Konstruktionsverfahren anhand bekannter Benchmarkprobleme	84
4	Tabusuche-Heuristiken für Tourenplanungsprobleme	89
4.1	Die Metaheuristik Tabusuche	89
4.1.1	Grundlagen lokaler Suchverfahren	89
4.1.2	Kernidee der Tabusuche	91
4.1.3	Lösungsraum und Nachbarschaft	93
4.1.4	Tabustatus und Aspirationskriterium	96
4.1.5	Kandidatenmenge und Akzeptanzkriterium	98
4.1.6	Intensivierung und Diversifikation	99
4.2	Bekannte Tabusuche-Heuristiken	100
4.2.1	Verfahren von Osman	100
4.2.2	Praxisbezogene Tabusuche von Semet und Taillard . .	101
4.2.3	Dekompositions-Verfahren von Taillard	102
4.2.4	Taburoute-Verfahren von Gendreau, Hertz und Laporte	103
4.2.5	Adaptive Memory-Verfahren von Rochat und Taillard .	105
4.2.6	Mehrdepot-Verfahren von Renaud, Laporte und Boctor	106
4.2.7	Ejection-Chain-Verfahren von Rego und Roucairol . . .	107
4.2.8	Flower-Algorithmus von Rego	109
4.2.9	Netzfluss-Evaluierungs-Verfahren von Xu und Kelly . .	109
4.2.10	Vereinheitlichter Tabusuche-Algorithmus von Cordeau, Gendreau und Laporte	111
4.2.11	Verfahren von Barbarosoğlu und Özgür	112
4.2.12	TTRP-Tabusuche von Chao	113
4.2.13	BoneRoute-Verfahren von Tarantilis und Kiranoudis . .	115
4.2.14	Granulare Tabusuche von Toth und Vigo	117
4.3	Vergleich der fokussierten VRP-Verfahren	119
4.4	Die Tabusuche in Bezug zu anderen Metaheuristiken	123

5	Entwicklung einer Tabusuche-Heuristik für das TTRP	127
5.1	Komponenten des Verfahrens	127
5.1.1	Lösungsraum	127
5.1.2	Nachbarschaftsdefinition	129
5.1.3	Nachbarschaftsreduktion	131
5.1.4	Kandidatenmenge	132
5.1.5	Tabustatus und Akzeptanzkriterium	133
5.1.6	Langzeitgedächtnis	134
5.1.7	Intensivierungsstrategien	135
5.2	Sensitivitätsanalyse der Parameter	136
5.2.1	Überblick und initiale Einstellungen	136
5.2.2	Nachbarschaft	138
5.2.3	Nachbarschaftsreduktion	141
5.2.4	Kandidatenmenge	142
5.2.5	Akzeptanzkriterium	144
5.2.6	Langzeitgedächtnis	145
5.2.7	Shifting Penalty Parameter	147
5.2.8	Tabudauer	147
5.2.9	Intensivierungsstrategien	149
6	Entwicklung einer Tabusuche-Heuristik für das MDTTRP	153
6.1	Modifizierte Komponenten des TTRP-Verfahrens	154
6.1.1	Startlösung	154
6.1.2	Nachbarschaftsdefinition	157
6.1.3	Intensivierungsstrategien	157
6.2	Sensitivitätsanalyse der Parameter	158
6.2.1	Überblick und initiale Einstellungen	158
6.2.2	Nachbarschaft	159
6.2.3	Nachbarschaftsreduktion	159
6.2.4	Tabudauer	161
6.2.5	Intensivierungsstrategien	161

7	Entwicklung einer Tabusuche-Heuristik für das PTTRP	165
7.1	Modifizierte Komponenten des TTRP-Verfahrens	166
7.1.1	Startlösung	166
7.1.2	Nachbarschaftsdefinition	166
7.1.3	Nachbarschaftsreduktion	168
7.1.4	Intensivierungsstrategien	168
7.2	Sensitivitätsanalyse der Parameter	169
7.2.1	Überblick und initiale Einstellungen	169
7.2.2	Nachbarschaft	169
7.2.3	Nachbarschaftsreduktion	170
7.2.4	Tabudauer	172
7.2.5	Intensivierungsstrategien	172
8	Einheitliche Darstellung und Evaluation der neuen Algorithmen	175
8.1	Einheitliche Darstellung der Lösungsverfahren	175
8.1.1	Die Funktion SEARCH	175
8.1.2	Einheitliche Steuerfunktion	178
8.1.3	Parameterüberblick	180
8.1.4	Kernelemente der neuen Tabusuche-Heuristiken	183
8.2	Evaluation anhand von Benchmarkproblemen	184
8.2.1	Ergebnisse für das TTRP	185
8.2.2	Ergebnisse für das MDTTRP	189
8.2.3	Ergebnisse für das PTTRP	193
9	Zusammenfassung	197
A	Lösungen für das TTRP	201
B	Lösungen für das MDTTRP	211
C	Lösungen für das PTTRP	237
D	Lösungen für das MDVRP	289
E	Lösungen für das PVRP	293
	Literaturverzeichnis	296

Abbildungsverzeichnis

2.1	Beste bekannte Lösung zu VRP-Testproblem C1	13
2.2	Beste bekannte Lösung zu PVRP-Testproblem P21	26
2.3	Beste bekannte Lösung zu MDVRP-Testproblem MD10	35
2.4	Exemplarische CVR-Route	45
2.5	Beste bekannte Lösung zu TTRP-Testproblem T1	55
2.6	Beste bekannte Lösung zu PTTRP-Testproblem PT1	64
2.7	Beste bekannte Lösung zu MDTTRP-Testproblem MDT1	68
3.1	Exemplarischer 2-opt-Verbesserungsschritt	71
3.2	Exemplarischer Or-opt-Verbesserungsschritt	72
3.3	Exemplarisches Subtour Root Refining	83
3.4	Lösungen der Heuristiken T-Cluster und T-Sweep zu TTRP- Testproblem T2	85
4.1	Exemplarischer Shift Move	93
4.2	Exemplarischer Swap Move	94
5.1	Optimierungsverlauf für Problem T20 mit Nachbarschaft C	141
5.2	Optimierungsverlauf für Problem T10 mit $\delta = 0,5$	148
5.3	I_2 -Optimierungsverlauf für Problem T5 mit $\mu = 5n$	151
6.1	I_3 -Optimierungsverlauf für Problem MDT4 mit $\mu = 5n$	163
8.1	Tendenzieller Optimierungsverlauf bei TTRP-Problemen	188
8.2	Prozentuale Abweichung vom besten bekannten Zielfunktionswert	188
8.3	Tendenzieller Optimierungsverlauf bei MDTTRP-Problemen . . .	190
8.4	Tendenzieller Optimierungsverlauf bei PTTRP-Problemen	193

Tabellenverzeichnis

2.1	Arbeiten zur periodischen Tourenplanung	28
2.2	Vergleich ausgewählter PVRP-Verfahren	31
2.3	Arbeiten zur Mehrdepot-Tourenplanung	37
2.4	Vergleich ausgewählter MDVRP-Verfahren	41
2.5	Übersicht über die TTRP-Testdaten	54
2.6	Übersicht über die neuen PTTRP-Testdaten	63
2.7	Übersicht über die neuen MDTTRP-Testdaten	67
3.1	Vergleich der Konstruktionsheuristiken	86
4.1	Funktionsweise einer Descent-Heuristik	90
4.2	Funktionsweise einer einfachen Tabusuche-Heuristik	92
4.3	Vergleich ausgewählter VRP-Tabusuche-Heuristiken, Teil 1	120
4.4	Vergleich ausgewählter VRP-Tabusuche-Heuristiken, Teil 2	121
5.1	Parametereinstellung für das TTRP-Tuning	137
5.2	Vergleich verschiedener Nachbarschaften ohne Root Refining . . .	138
5.3	Vergleich verschiedener Nachbarschaften mit Root Refining	139
5.4	Ergebnisse für variable Nachbarschaften	140
5.5	Ergebnisse für verschiedene Größen von h	142
5.6	Ergebnisse für verschiedene Größen von ω	143
5.7	Vergleich von BA und FBA bei verschiedenen Werten von ω . . .	144
5.8	Ergebnisse für verschiedene Werte von γ mit $\omega = 1$	145
5.9	Ergebnisse für verschiedene Werte von γ mit $\omega = 2$	146
5.10	Ergebnisse für verschiedene Werte von γ mit $\omega = 3$	146

5.11	Ergebnisse für verschiedene Werte von δ	148
5.12	Ergebnisse für verschiedene Werte von $\bar{\theta}$	149
5.13	Vergleich verschiedener Intensivierungsstrategien	150
6.1	MDTTRP-Ergebnisse für verschiedene Nachbarschaften	160
6.2	MDTTRP-Ergebnisse für verschiedene Größen von h	160
6.3	MDTTRP-Ergebnisse für verschiedene Größen von $\bar{\theta}$	162
6.4	MDTTRP-Ergebnisse für verschiedene Intensivierungsstrategien .	163
7.1	PTTRP-Ergebnisse für verschiedene Nachbarschaften	171
7.2	PTTRP-Ergebnisse für verschiedene Größen von h	171
7.3	PTTRP-Ergebnisse für verschiedene Größen von $\bar{\theta}$	172
7.4	PTTRP-Ergebnisse für verschiedene Intensivierungsstrategien . .	173
8.1	Funktion SEARCH	177
8.2	Einheitliche Steuerfunktion der neuen Algorithmen	179
8.3	Variable Parametereinstellungen	181
8.4	Fixe Parametereinstellungen	182
8.5	Ergebnisse für die TTRP-Testdaten	186
8.6	Ergebnisse für die MDTTRP-Testdaten	191
8.7	Ergebnisse für die PTTRP-Testdaten	194

Abkürzungsverzeichnis

ARPD	Average Relative Percentage Deviation (Durchschnittliche relative prozentuale Abweichung)
Avg	Average (Durchschnitt)
BA	Best Accept
bzgl.	bezüglich
CVR	Complete Vehicle Route (Fahrzeugroute eines Fahrzeuges mit Anhänger)
Dp	Depot
FBA	First Best Accept
FSMVRP	Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem
FT	Fahrzeugtyp
GAP	Generalized Assignment Problem (Verallgemeinertes Zuordnungsproblem)
ID	Eindeutige Nummer
L	Ladung
Max	Maximum
Min	Minimum
MDTTRP	Multi-Depot Truck and Trailer Routing Problem (Mehrdepot-Tourenplanungsproblem bei restringierendem Anhängereinsatz)

MDVRP	Multi-Depot Vehicle Routing Problem (Mehrdepot-Tourenplanungsproblem)
MT	Maintour
MTVRP	Multi-Trip Vehicle Routing Problem (Tourenplanungsproblem mit Mehrfacheinsatz der Fahrzeuge)
OMDVRP	Open Multi-Depot Vehicle Routing Problem (Offenes Mehrdepot-Tourenplanungsproblem)
PTR	Pure Truck Route (Fahrzeugroute eines Fahrzeuges ohne Anhänger)
PTSP	Periodic Traveling Salesman Problem (Periodisches Rundreiseproblem)
PTTRP	Periodic Truck and Trailer Routing Problem (Periodisches Tourenplanungsproblem bei restringierendem Anhängereinsatz)
PVRP	Periodic Vehicle Routing Problem (Periodisches Tourenplanungsproblem)
RDC	Ratio of Demand to Capacity (Verhältnis von Angebot zu Kapazität)
RPD	Relative Percentage Deviation (Relative prozentuale Abweichung)
SDVRP	Site Dependent Vehicle Routing Problem (Ortsabhängiges Tourenplanungsproblem)
ST	Subtour
T	Tag
TC	Truck Customer (Kunde, der nur ohne Anhänger angefahren werden kann)
TS	Tabusuche

TSP	Traveling Salesman Problem (Rundreise- bzw. Handlungsreisendenproblem)
TT	Tourtyp
TTRP	Truck and Trailer Routing Problem (Tourenplanungsproblem bei restringierendem Anhängereinsatz)
u.d.B.	unter den Bedingungen
VC	Vehicle Customer (Kunde, der mit und ohne Anhänger angefahren werden kann)
VDC	Visit Day Combination (Besuchsmuster eines Kunden)
VRP	Vehicle Routing Problem (Standardproblem der Tourenplanung)
VRPHE	Vehicle Routing Problem with Heterogeneous Vehicles (Tourenplanungsproblem mit heterogenen Fahrzeugen)
VRPTW	Vehicle Routing Problem with Time Windows (Tourenplanungsproblem mit Zeitfenster)
zgl.	zugleich

Symbolverzeichnis

$B(\bar{s})$	Attributmenge der Nachbarlösung \bar{s}
C_i	Menge aller zulässigen Besuchsmuster des Kunden i
D	Maximale Gesamteinsatzdauer eines Fahrzeuges
I_k	Intensivierungsstrategie k
M	Kandidatenmenge
$N(s)$	Nachbarschaft von s
$\tilde{N}(s)$	Menge aller Nachbarlösungen der Lösung s , die nicht tabu sind oder die ein Aspirationskriterium erfüllen
$N_{M,h}^x(s)$	Nachbarschaft von s für die gewählte Kandidatenmenge M , Nachbarschaftsgröße h und ggf. Nachbarschaftstyp $x \in \{B, I\}$: B Basis-Nachbarschaft, I Intensivierungs-Nachbarschaft
Q	Fahrzeugkapazität
Q^A	Anhängerkapazität
Q^Z	Zugfahrzeugkapazität
a_{rs}	Konstante zur Bezeichnung, ob Tag s im Besuchsmuster r enthalten ist
$c(s)$	Gesamtdistanz der Lösung s
c_{ij}	Entfernung von Punkt i zu Punkt j
d	Anzahl Depots

d_i	Servicezeit des Kunden i
e_i	Bedienfrequenz des Kunden i
$f(s)$	Evaluierungsfunktion für Lösung s ohne Häufigkeitsstrafe
$g(s)$	Evaluierungsfunktion für Lösung s unter Berücksichtigung einer Häufigkeitsstrafe
h	Parameter zur Bestimmung der Nachbarschaftsgröße
(i, k, l)	Attribut das Kunde i einer Tour zu Root k in Route l zuordnet
m	Anzahl Fahrzeuge pro Depot und Tag
m_1	Anzahl Fahrzeuge mit Anhänger pro Depot und Tag
n	Anzahl Kunden
nr	Anzahl an maximal möglichen Routen
q_i	Angebots- bzw. Nachfragemenge des Kunden i
$q(s)$	Überkapazität der Lösung s
r	Besuchsmuster eines Kunden
rc	Anzahl der Root-Kandidaten (Anzahl VC-Kunden plus Depots)
$r(\bar{s})$	Häufigkeitsstrafe für die Nachbarlösung \bar{s}
s	Aktuelle Lösung
\bar{s}	Nachbarlösung von s
s'	Beste Nachbarlösung von s
s^*	Beste gefundene Lösung
s^{**}	Beste bekannte Lösung
t	Anzahl Tage
y	Zähler für die Anzahl an Neustarts auf s^*

Δ_{2-opt}	Einsparung in Distanz nach Durchführung eines 2-opt-Verbesserungsverfahrens
Δ_{Or-opt}	Einsparung in Distanz nach Durchführung eines Or-opt-Verbesserungsverfahrens
α	Shifting Penalty Parameter
δ	Parameter zur Adjustierung von α
γ	Parameter zur Adjustierung der Häufigkeitsstrafe
η	Globales Iterationenlimit
$\tilde{\eta}$	Lokales Iterationenlimit in Funktion SEARCH
θ	Tabudauer
$\bar{\theta}$	Parameter zum Adjustieren der Tabudauer
λ	Globaler Iterationenzähler
$\tilde{\lambda}$	Lokaler Iterationenzähler in Funktion SEARCH
λ^*	Iteration bei der s^* in Funktion SEARCH gefunden wurde
μ	Parameter für die maximale Anzahl Iterationen ohne Verbesserung von s^*
ν_i	Maximale Anzahl Kunden in einem verschobenen Teilstück ($i = 1, 2$) bzw. Schalter für die Anwendung des Root Refining ($i = 3$) und Inter-Tag Moves ($i = 4$)
π	Gewichtungsparameter für die T-Cluster Heuristik
ρ_{ikl}	Absolute Häufigkeit, wie oft Kunde i in eine Tour zu Root k und Route l neu in die Lösung aufgenommen wurde
$\rho(\bar{s})$	Relative Häufigkeit des betrachteten Moves
τ_{ikl}	Tabustatus von Kunde i zu einer Tour des Root k in Route l
$\tau(\bar{s})$	Tabustatus von Nachbarlösung \bar{s}

ω	Parameter zur Bestimmung der Größe der Kandidatenmenge
$ M $	Mächtigkeit der Menge M
\mathbb{N}	Menge der natürlichen Zahlen
\mathbb{R}	Menge der reellen Zahlen
\mathbb{R}^+	Menge der reellen Zahlen, die größer oder gleich null sind
∞	Unendlich
$[a; b]$	$\{x \in \mathbb{R} \mid a \leq x \leq b\}$
$round(x)$	x kaufmännisch gerundet

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Gegenstand und Motivation

Gegenstand der logistischen *Tourenplanung* ist die Aufgabe, für die Fahrzeuge eines Fuhrparks die Fahrzeugtouren zu geographisch verteilten Kunden kostenminimal zu bestimmen. Für ein typisches¹ Tourenplanungsproblem gilt es dabei die Touren so zu planen, dass jeder Kunde von genau einem Fahrzeug bedient wird, jede Tour im Fahrzeugdepot beginnt und endet und die Kapazität eines Fahrzeuges nicht überschritten wird.

Dantzig und Ramser [Dan59] waren die ersten, die 1959 diese Problemstellung adressierten. Sie betrachteten die Distribution von Treibstoff und entwickelten eine erste mathematische Formulierung sowie einen algorithmischen Lösungsansatz. Seitdem wurden hunderte von Modellen und Algorithmen für die optimale und approximative Lösung verschiedenster Varianten von Tourenplanungsproblemen vorgestellt. Vor allem die in den letzten Jahrzehnten rasante Entwicklung leistungsfähiger Personalcomputer hat dazu beigetragen, dass mittlerweile Dutzende von Softwarepaketen zur logistischen Tourenplanung existieren und diese in vielen Bereichen ihren Einsatz finden. Golden, Assad und Wasil [Gol02] beschreiben beispielsweise Anwendungen in den Bereichen der Abfallbeseitigung, der Lebensmittel- und Getränkedistribution sowie in der Milch- und Zeitungsindustrie. Werden diese Probleme

¹ Vgl. das Standardproblem der Tourenplanung in Kapitel 2.1.1.

durch Anwendung von Lösungstechniken des Operations Research gelöst, so sind Kosteneinsparungen im Bereich von 5% bis 20% der gesamten Transportkosten keine Seltenheit [Tot02b]. Dadurch kommt der logistischen Tourenplanung als Bestandteil der Distributionslogistik eine entscheidende Bedeutung zu, will man die gesamte logistische Wertschöpfungskette optimal gestalten.

Das Interesse an Lösungsverfahren für die logistische Tourenplanung ist aber nicht nur motiviert durch deren praktische Relevanz, sondern auch durch die Herausforderung, die die Tourenplanung aus mathematischer Sicht darstellt. Bereits das Standardproblem der Tourenplanung, wie es in Kapitel 2.1.1 beschrieben wird, ist ein äußerst schwer zu lösendes, sog. *NP-schwieriges* kombinatorisches Optimierungsproblem². Bei der Klasse der NP-schwierigen Probleme wird vermutet, dass für kein Problem dieser Klasse ein exaktes Lösungsverfahren existiert, dessen Zeitbedarf nicht exponentiell zur Problemgröße wächst [Gar79]. Obwohl eine Reihe größerer Tourenplanungsprobleme nachweisbar optimal gelöst werden konnte [Nad02], existiert derzeit kein exaktes Verfahren³, welches in der Lage wäre, Problemstellungen mit mehr als 50 Kunden durchwegs optimal zu lösen [Tot98a, Nad02]. Aus diesem Grund werden zur Lösung größerer Probleme meistens approximative Lösungstechniken, sog. *Heuristiken* eingesetzt. Reeves [Ree93a, S. 6] definiert eine Heuristik als „a technique which seeks good (i.e. near-optimal) solutions at a reasonable computational cost without being able to guarantee either feasibility or optimality, or even in many cases to state how close to optimality a particular feasible solution is“. Heuristische Lösungstechniken zur Tourenplanung können dabei in zwei Klassen untergliedert werden. Dies sind zum einen problemspezifische *Konstruktionsheuristiken*, die zumeist zwischen 1960 und 1990 entwickelt wurden, und zum anderen *Metaheuristiken*, die v.a. in den letzten Jahren starke Aufmerksamkeit erfuhren.

² Als kombinatorische Optimierung wird die mathematische Untersuchung zum Auffinden einer optimalen Anordnung, Gruppierung, Reihenfolge oder Auswahl von diskreten, in der Anzahl beschränkten Objekten bezeichnet [Law76, S. 1]. Für die meisten kombinatorischen Optimierungsprobleme gilt, dass sie meist leicht zu beschreiben, aber äußerst schwer zu lösen sind.

³ Für einen Überblick über exakte Verfahren zur Tourenplanung wird verwiesen auf Laporte [Lap92b], Bodin, Maniezzo und Mingozzi [Bod99], Naddef und Rinaldi [Nad02], Bramel und Simchi-Levi [Bra02] sowie Toth und Vigo [Tot02d, Tot04b].

Konstruktionsheuristiken liefern im Allgemeinen Lösungen guter Qualität bei verhältnismäßig kurzen Rechenzeiten. Darüber hinaus können diese Techniken meist relativ einfach angepasst werden, um der Vielfalt an praxisrelevanten Restriktionen zu begegnen. Deswegen finden diese Methoden auch heute noch eine weite Verbreitung in kommerziellen Softwarepaketen zur logistischen Tourenplanung [Sch97, Bak02]. Eine der bekanntesten Konstruktionsheuristiken zur Lösung von Tourenplanungsproblemen ist die 1964 von Clarke und Wright [Cla64] vorgestellte Savings-Heuristik⁴.

Metaheuristiken sind die neueste Entwicklung in approximativen Suchmethoden zur Lösung komplexer Optimierungsprobleme. Sie sind in der Lage, Lösungen zu schwierigen kombinatorischen Optimierungsproblemen zu finden, bei denen sich problemspezifische Konstruktionsheuristiken als ineffektiv erweisen. Der Begriff Metaheuristik wurde von Glover [Glo86] eingeführt und bezeichnet allgemein eine Strategie, die untergeordnete Heuristiken leitet oder modifiziert um im Verlauf der Lösungsfindung lokale Optima⁵ zu überwinden und eine robuste Durchsuchung des Lösungsraumes⁶ zu gewährleisten. Die meisten Metaheuristiken beinhalten Konzepte aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz oder Analogien zu physikalischen, biologischen oder evolutionären Prozessen. Die Familie der Metaheuristiken⁷ umfasst z.B. Genetische Algorithmen, Simulated Annealing, Tabusuche, Ameisensysteme, Scatter Search und Path Relinking, Greedy Randomized Adaptive Search Procedures, Variable Neighborhood Search und Guided Local Search. Aus all diesen Techniken erwies sich insbesondere die Metaheuristik Tabusuche als äußerst effizient und effektiv zur Lösung von Tourenplanungsproblemen [Gen02b, Cor02a, Gol98].

Viele Varianten⁸ der Tourenplanung unterscheiden sich jeweils nur marginal voneinander. Trotz der augenscheinlichen Ähnlichkeit dieser Probleme wei-

⁴ Vgl. Kapitel 3.2.1.

⁵ Vgl. Kapitel 4.1.1.

⁶ Als Lösungsraum wird hier die Menge aller zulässigen Lösungen bezeichnet.

⁷ Für einen umfassenden Überblick zu Metaheuristiken wird verwiesen auf Glover und Kochenberger [Glo03a], Reeves [Ree93a, Ree96], Osman und Kelly [Osm96b], Aarts und Lenstra [Aar97a], Pardalos und Resende [Par02], Gendreau und Potvin [Gen02c], Stützle [Stü99] und Blum und Roli [Blu01].

⁸ Eine Vorstellung gängiger Varianten erfolgt in Kapitel 2.

sen sie oft wesentliche strukturelle Unterschiede auf, was insbesondere auf die Entwicklung geeigneter Heuristiken großen Einfluss hat.⁹ Daher können viele der in den letzten Jahrzehnten entwickelten speziellen Algorithmen¹⁰ nicht von einem Problem auf ein anderes übertragen werden. Die Entwicklung von Heuristiken erfolgt deswegen meist konkret für eine ganz spezielle Problemstellung.

Zentraler Gegenstand dieser Arbeit ist die -trotz großer Praxisrelevanz¹¹- bisher selten behandelte *Tourenplanung bei restringierendem Anhängereinsatz* (Truck and Trailer Routing Problem, TTRP)¹². Bei diesem Problemtyp besitzt eine Teilmenge der vorhandenen Fahrzeuge einen Anhänger, welcher im Verlauf einer Route an ausgewählten Parkplätzen abgestellt werden kann bzw. muss. Das An- und Abkoppeln eines Anhängers wird erforderlich, da ein Teil der Kunden zwingend eine Bedienung ohne Anhänger verlangt. Beispiele hierfür sind Kunden im innerstädtischen Bereich oder in bergigen Gegenden. Neben der Zuordnung der Kunden zu den Fahrzeugen stellt sich bei der Planung einer Fahrzeugroute daher insbesondere die Frage, wo und wie oft Anhänger geparkt und in welchem Teil der Route bzw. in welcher Reihenfolge die Kunden eines Fahrzeuges bedient werden. Das TTRP kann deshalb auch als ein kombiniertes Standort- und Tourenplanungsproblem¹³ angesehen werden. Die Problemstellung gewinnt insofern an Bedeutung, als sie Elemente anderer bekannter Varianten der Tourenplanung beinhaltet, wie z.B. heterogene Fahrzeugtypen. Darüber hinaus können beispielsweise das Standardproblem der Tourenplanung¹⁴ oder das Tourenplanungsproblem mit Mehrfacheinsatz der Fahrzeuge¹⁵ als TTRP abgebildet und somit mit einem Lösungsverfahren für das TTRP ebenfalls gelöst werden.

⁹ Heuristische Techniken adressieren meist nicht ein mathematisches Modell, sondern direkt die problemspezifische, kombinatorische Natur eines Problems.

¹⁰ Die Begriffe Algorithmus, Verfahren und Heuristik werden im Rahmen dieser Arbeit synonym verwendet.

¹¹ Vgl. z.B. Steckhan [Ste97a], Semet und Taillard [Sem93] und Stöckl [Stö87].

¹² Eine detaillierte Beschreibung findet sich in Kapitel 2.3.3.1.

¹³ Vgl. Kapitel 2.2.1.

¹⁴ Vgl. Kapitel 2.1.1.

¹⁵ Vgl. Kapitel 2.2.1.

1.2 Zielsetzung

Das vorrangige Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung von Lösungsverfahren für das TTRP. Dies beinhaltet insbesondere die

- *Entwicklung neuer effizienter Konstruktionsheuristiken für das TTRP*

Die neuen Heuristiken sollen bewusst einfach konzipiert werden, um einerseits eine leichte Integration einer Vielzahl zusätzlicher Restriktionen zu ermöglichen und andererseits eine einfache Implementierung zu gewährleisten. Diese Punkte werden von den bekannten TTRP-Konstruktionsheuristiken nur zum Teil erfüllt.

- *Entwicklung einer neuen Tabusuche-Heuristik für das TTRP*

Die bekannten heuristischen Lösungsverfahren für Tourenplanungsprobleme mit Anhängereinsatz behandeln entweder zu dem in dieser Arbeit untersuchten TTRP abweichende Problemstellungen oder beschränken sich vereinfachend auf eine Untersuchung lediglich einer Teilmenge aller möglichen zulässigen Lösungen¹⁶. Letzteres geschieht meist durch Annahme zusätzlicher Restriktionen¹⁷, die den Lösungsraum des TTRP erheblich einschränken. Dadurch ist jedoch das Auffinden eines globalen Optimums für die eigentliche Problemstellung nicht mehr gewährleistet. Die neu zu entwickelnde Heuristik soll dies in effizienter Weise dennoch sicherstellen.

Des Weiteren soll das TTRP bei Vorhandensein zusätzlicher Restriktionen betrachtet werden. Folgende neue Tourenplanungsprobleme sollen hierbei Beachtung finden:

¹⁶ Vgl. Kapitel 2.3.3.3.

¹⁷ Chao [Cha02] lässt beispielsweise im Verlauf der von ihm vorgestellten Tabusuche keine Modifikation der Anzahl an Subtouren zu.

- *Erweiterung des TTRP um mehrere Planungsperioden*

Beim periodischen Tourenplanungsproblem¹⁸ (Periodic Vehicle Routing Problem, PVRP) ist ein Planungshorizont von mehreren Tagen gegeben und jedem Kunden eine Menge an zulässigen Bedienmustern zugeteilt, die jeweils bestimmen, an welchen Tagen des Planungshorizonts die Bedienung des Kunden zu erfolgen hat. Es gilt, einen kostenminimalen Tourenplan für alle Tage des Planungshorizonts zu finden, so dass gegebene Restriktionen eingehalten und insbesondere für jeden Kunden genau ein zulässiges Bedienmuster gewählt wird. Bei der *periodischen Tourenplanung bei restringierendem Anhängereinsatz* (Periodic Truck and Trailer Routing Problem, PTTRP) wird das TTRP um diesen Sachverhalt erweitert.

- *Erweiterung des TTRP um mehrere Depots*

Wohingegen die meisten Tourenplanungsprobleme von genau einem Fahrzeugdepot ausgehen, in dem sich alle verfügbaren Fahrzeuge befinden und von dem aus alle Touren starten und enden, behandelt das Mehrdepot-Tourenplanungsproblem¹⁹ (Multi-Depot Vehicle Routing Problem, MDVRP) die Existenz mehrerer Fahrzeug-Depots. Es gilt, einen gesamtkostenminimalen Tourenplan zu finden, bei dem jeder Kunde von genau einem Depot aus bedient wird. Das *Mehrdepot-Tourenplanungsproblem bei restringierendem Anhängereinsatz* (Multi-Depot Truck and Trailer Routing Problem, MDTTRP) greift diese Problemerkweiterung um mehrere Depots auf.

Diese Formen der Problemerkweiterung wurden gewählt, da sie einerseits motiviert werden durch reale Anforderungen aus der Praxis (vgl. z.B. Steckhan [Ste97a] und Stöckl, Haisch und Betz [Stö87]), zum anderen wegen den mathematisch-strukturellen Eigenschaften der resultierenden Probleme. Beide neuen Problemtypen können als komplexe mehrstufige Tourenplanungsprobleme gesehen werden. Als *mehrstufiges Tourenplanungsproblem* wird hierbei ein Tourenplanungsproblem bezeichnet, das dem Standardproblem

¹⁸ Eine detaillierte Beschreibung findet sich in Kapitel 2.3.1.

¹⁹ Eine detaillierte Beschreibung findet sich in Kapitel 2.3.2.

der Tourenplanung, wie es in Kapitel 2.1 beschrieben wird, eine weitere Entscheidungsstufe hinzufügt [Cha02]. Das TTRP, das MDVRP oder das PVRP sind Beispiele für derartige Problemstellungen. Eine Verknüpfung von an sich mehrstufigen Tourenplanungsproblemen erscheint deshalb als interessantes Studienobjekt, da durch die zahlreichen Interdependenzen der einzelnen Entscheidungsstufen der Schwierigkeitsgrad bei der Tourenplanung weiter erhöht und das Auffinden einer optimalen bzw. einer nahe am globalen Optimum liegenden Lösung weiter erschwert wird. Gerade in der Praxis sind Verknüpfungen dieser Art jedoch oftmals gegeben. Dennoch existieren bislang lediglich wenige Studien, die sich derartigen komplexen, praxisrelevanten Problemerkweiterungen widmen. Diese Arbeit soll einen Beitrag in diese Richtung leisten, indem für die neuen Problemstellungen jeweils ein Tabusuche-Verfahren entwickelt wird.

Schließlich sollen die neu zu entwickelnden Heuristiken anhand von Benchmarkproblemen evaluiert und -soweit möglich- bekannten Verfahren gegenübergestellt werden. Hierzu ist die Definition neuer Benchmarkprobleme für das PTTRP und MDTTRP notwendig.

1.3 Aufbau

In Kapitel 2 wird zuerst das Standardproblem der Tourenplanung und anschließend der Variantenreichtum von logistischen Tourenplanungsproblemen beispielhaft aufgezeigt. Fokussiert dargestellt werden die periodische und Mehrdepot-Tourenplanung sowie das TTRP. Des Weiteren werden die neuen Tourenplanungsprobleme PTTRP und MDTTRP erstmalig definiert und für jedes der Probleme neue Benchmarkprobleme präsentiert. Für das TTRP und PTTRP wird jeweils eine neue mathematische Formulierung vorgestellt, wobei letztere auch die Abbildung der MDTTRP-Problemstellung ermöglicht.

Eine Anwendung der Metaheuristik Tabusuche setzt eine (möglichst gute) initiale Lösung des zu behandelnden Problems voraus. Für das TTRP wurden daher zwei Konstruktionsverfahren neu entwickelt. Kapitel 3 stellt diese

vor²⁰ und vergleicht sie mit bekannten Verfahren. Um das notwendige Hintergrundwissen bereitzustellen, werden zuerst die bekanntesten Konstruktions- und Verbesserungsheuristiken für das sog. Rundreiseproblem sowie bekannte Konstruktionsheuristiken für das Standardproblem der Tourenplanung und die Tourenplanung bei restringierendem Anhängereinsatz vorgestellt.

Eine Einführung in die theoretischen Grundlagen der Metaheuristik Tabusuche erfolgt in Kapitel 4. Es werden die bekanntesten Tabusuche-Heuristiken für Tourenplanungsprobleme beschrieben, verglichen und deren Kernelemente herausgestellt.

Die Entwicklung einer neuen Tabusuche-Heuristik für das TTRP bildet den Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit. Eine Beschreibung des neuen Verfahrens und eine ausführliche empirische Untersuchung zur Sensitivität des neuen Verfahrens gegenüber möglichen Parametereinstellungen einschließlich der Ermittlung der bestmöglichen Parameterwerte findet sich in Kapitel 5.

In Kapitel 6 wird aufbauende auf dem neuen TTRP-Tabusuche-Verfahren ein Ansatz zur Lösung des MDTRP vorgestellt. Die zu modifizierenden Komponenten werden beschrieben und kritische Parametereinstellungen empirisch evaluiert.

Ein Übertrag der neuen TTRP-Tabusuche zur Lösung des PTTRP wird in Kapitel 7 behandelt. Auch hier erfolgt eine Sensitivitätsanalyse kritischer Parameter.

Kapitel 8 stellt die Kernelemente der neuen Tabusuche-Verfahren dar, verdeutlicht deren Ablauf im Rahmen einer einheitlichen Darstellung und gibt einen Überblick über die besten ermittelten Parametereinstellungen. Darüber hinaus werden alle entwickelten Verfahren anhand von Benchmarkproblemen empirisch evaluiert und -soweit möglich- anderen bekannten Verfahren gegenübergestellt.

Den Abschluss der Arbeit bildet eine Zusammenfassung der Ergebnisse in Kapitel 9.

²⁰ Ein Übertrag der Verfahren zur Lösung von MDTRP- und PTTRP-Problemen wird in den Kapiteln 6 bzw. 7 geschildert.

Kapitel 2

Tourenplanungsprobleme

Dieses Kapitel soll einen Einblick in die Problematik der Tourenplanung geben. Hierzu wird zunächst das Standardproblem der Tourenplanung genauer betrachtet. Danach erfolgt eine Vorstellung häufig in der Tourenplanung anzutreffender Problemtypen und eine detaillierte Betrachtung der im Rahmen dieser Arbeit fokussierten Varianten. Abschließend werden zwei neue Tourenplanungsprobleme vorgestellt, die trotz ihrer Praxisrelevanz bisher noch nicht Gegenstand von Forschungsarbeiten waren.

2.1 Das Standardproblem der Tourenplanung (VRP)

2.1.1 Problembeschreibung

Das *Standardproblem der Tourenplanung* ((Classical) Vehicle Routing Problem, VRP) lässt sich formal auf einem ungerichteten, gewichteten Graphen $G = (N, A)$ mit Knotenmenge $N = \{0, 1, \dots, n\}$ und Kantenmenge $A = \{(i, j) \mid i, j \in N, i < j\}$ definieren [Cor02a]. Knoten 0 repräsentiert das Depot, in dem sich eine Menge von m homogenen Fahrzeugen mit der jeweiligen Kapazität Q befindet. Die verbleibenden Knoten bezeichnen die zu bedienenden Kunden. Jedem Kunde ist eine nicht negative Nachfrage-

oder Angebotsmenge q_i und eine Servicezeit d_i zugeordnet. Mit A wird eine symmetrische Kostenmatrix $C = (c_{ij})$ für die Distanzen¹ zwischen den Kunden sowie den Kunden und dem Depot assoziiert. Das VRP besteht nun darin, eine Menge von maximal m Auslieferungs- oder Sammelrouten so zu konstruieren, dass die insgesamt anfallenden Fahrtkosten² minimiert werden und dass gilt:

1. jede Route beginnt und endet im Depot,
2. jeder Kunde wird genau einmal von genau einem Fahrzeug angefahren,
3. die Gesamtmenge einer Route übersteigt nicht die Fahrzeugkapazität Q und
4. die Gesamtdauer (Fahrtzeiten³ und Servicezeiten) einer Route übersteigt nicht die maximale Gesamteinsatzzeit eines Fahrzeuges D .

Die Anzahl der einzusetzenden Fahrzeuge ist dabei entweder gegeben oder wird als Entscheidungsvariable behandelt.⁴ Weiterhin wird implizit angenommen, dass alle Kunden entweder eine Menge anbieten (Sammelproblem) oder verlangen (Auslieferungsproblem), nicht aber beides.

Das VRP beinhaltet zwei grundlegende, interdependente Teilprobleme:

- Zuordnung der Kunden zu Fahrzeugen (Zuordnungsproblem) und
- Bestimmung der Reihenfolge in der die Kunden eines Fahrzeuges bedient werden (Reihenfolgeproblem).

¹ Zumeist die euklidischen Distanzen zwischen den Knoten.

² Das VRP betrachtet eine Minimierung der zurückgelegten Gesamtentfernung. Alternative Ziele der Tourenplanung sind die Minimierung der Fahrtzeiten, der von Strecke, Zeit und Fahrzeug abhängigen variablen Kosten oder der Anzahl an einzusetzenden Fahrzeugen [Fle98]. Eine Kombination mehrerer Zielsetzungen wird zumeist durch eine gewichtete Zielfunktion abgebildet, vgl. z.B. Mehti et al. [Mec99].

³ Es wird zumeist angenommen, dass die Fahrtzeiten proportional zu den Entfernungen sind.

⁴ Bei vielen VRP-Varianten wird eine Lösung mit weniger einzusetzenden Fahrzeugen als besser eingestuft, gerechtfertigt durch die z.T. hohen Fixkosten der Fahrzeuge.

Liegt eine Zuordnung der Kunden zu den Fahrzeugen vor, so reduziert sich das Problem auf die Lösung entsprechender Reihenfolge- bzw. Rundreiseprobleme. Beim *Rundreise-* bzw. *Handlungsreisendenproblem* (Traveling Salesman Problem, TSP) gilt es, für einen Handlungsreisenden (respektive ein Fahrzeug) eine optimale Besuchsreihenfolge für eine gegebene Menge an Orten so zu bestimmen, dass jeder Ort genau einmal angefahren wird, der Handlungsreisende wieder an seinen Ausgangsort zurückkehrt und die Summe der zurückgelegten Entfernungen minimal ist.

Eine zulässige Lösung zu einem Problem der Tourenplanung wird als *Tourenplan* bezeichnet [Dom97, S. 206]. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff *Tour* für eine einzelne, einfache Rundreise eines Fahrzeuges verwendet, wohingegen eine *Route* mehrere zusammenhängende Touren beinhalten kann.⁵ Eine Tour ist dabei eindeutig einer Route und eine Route eindeutig einem Fahrzeug zugeordnet.⁶ Diese begriffliche Unterscheidung wird z.B. bei Mehrfacheinsatz eines Fahrzeuges⁷ oder bei restringierendem Anhänger Einsatz⁸ notwendig.

Konstruktionsverfahren für das VRP werden in Kapitel 3, Tabusuche-Metaheuristiken für das VRP in Kapitel 4 vorgestellt.

2.1.2 Benchmarkprobleme

Eine gängige Methode, um die Qualität und Robustheit eines Verfahrens beurteilen bzw. um unterschiedliche Lösungsverfahren miteinander vergleichen⁹ zu können, besteht darin, das Verfahren empirisch auf einer Vielzahl an verschiedenartigen Benchmarkproblemen zu testen [Ree93c].

⁵ Domschke definiert den Begriff Tour hingegen als die Menge der einer Fahrt zugeordneten Kunden und Route als die Reihenfolge, in der die Kunden bedient werden [Dom97, S. 206].

⁶ Ein Fahrzeug kann jedoch mehrere Routen bzw. Touren zugeordnet haben, vgl. eine mehrtägige Problemstellung wie sie in Kapitel 2.4.1.1 beschrieben ist.

⁷ Vgl. Kapitel 2.2.1.

⁸ Vgl. Kapitel 2.3.3.

⁹ Ein objektiver Vergleich verschiedener Verfahren ist deswegen noch nicht sichergestellt, vgl. z.B. Bräysy und Gendreau [Brä01b] zu dieser Problematik.

Für das VRP haben sich in der Literatur 14 Testdatensätze von Christofides, Mingozzi und Toth [Chr79b] als Standard-Benchmarkprobleme¹⁰ etabliert (C1-C14), denen die Probleme von Christofides und Eilon [Chr69] zugrunde liegen. Die Probleme C1 bis C5 haben zwischen 50 und 199 zufällig verteilte Kunden mit zentral gelegenem Depot und ohne Zeitrestriktion. Die Probleme C6 bis C10 entsprechen diesen, haben jedoch zusätzlich ein Zeitlimit für die Gesamtdauer einer Tour und einheitliche Servicezeiten für jeden Kunden. Alle Kunden sind dabei in der Ebene verteilt und die Entfernungen bzw. Fahrtzeiten werden als die euklidischen Distanzen zwischen den Kunden angenommen. Bei den Problemen C11 bis C14 sind Kunden in der Ebene konzentriert (geclustert). Datensatz C11 hat ein zentral gelegenes Depot und C12 ein Depot in Randlage. C13 und C14 entsprechen wiederum den Datensätzen C11 und C12, unterscheiden sich jedoch durch Hinzunahme einer Gesamtzeitrestriktion für die Touren und Servicezeiten für die Kunden. Alle Datensätze weisen einen homogenen, unbeschränkten Fuhrpark auf. Ein optimaler¹¹ Tourenplan zu Testproblem C1 mit Gesamtdistanz 524,61 ist in Abbildung 2.1 dargestellt.

Für das Standardproblem der Tourenplanung mit und ohne Gesamtzeitbeschränkung der Fahrzeuge existieren darüber hinaus weitere Testprobleme verschiedener Autoren. Einen Überblick hierzu geben Golden et. al [Gol98], die wiederum 20 neue, größere Testprobleme kreierten. Diese 20 Probleme gelten in der neueren Literatur bereits als Erweiterung der 14 klassischen Standardprobleme. Bisher wurden jedoch erst wenige Verfahren¹² auf den neuen Datensätzen getestet.

¹⁰ Die Probleme sind in elektronischer Form über die OR-Library von Beasley [Bea90] beziehbar.

¹¹ Vgl. Hadjiconstantinou, Christofides und Mingozzi [Had95].

¹² Vgl. Golden et. al [Gol98], Coy et al. [Coy00], Tarantilis und Kiranoudis [Tar02b], Li, Golden und Wasil [Li04], Reimann, Dörner und Hartl [Rei04], Prins [Pri04] und Toth und Vigo [Tot04a].

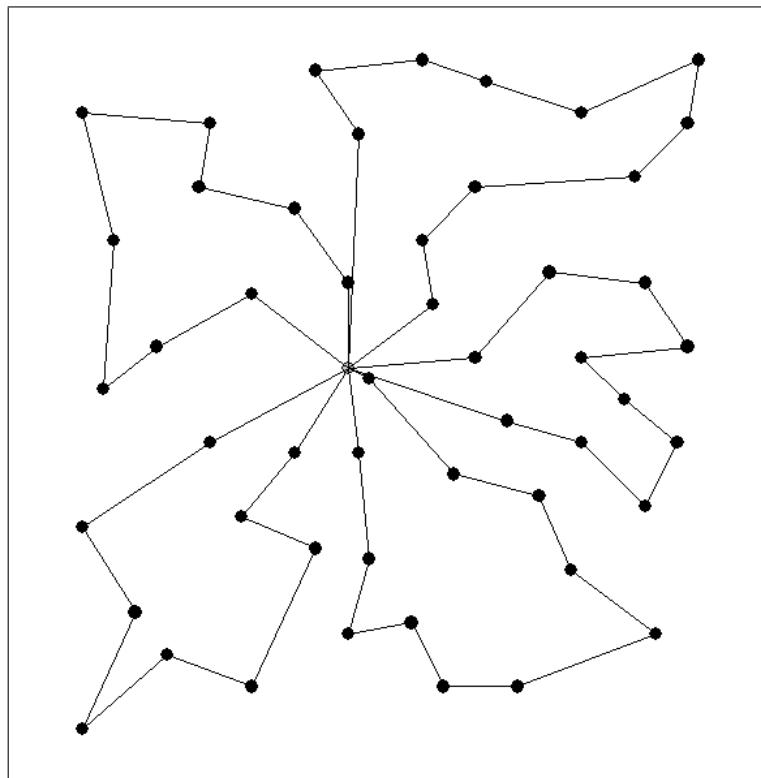


Abbildung 2.1: Beste bekannte Lösung zu VRP-Testproblem C1

2.2 Überblick über Varianten von Tourenplanungsproblemen

2.2.1 Gängige Varianten

Um einen Einblick in den Variantenreichtum von Tourenplanungsproblemen zu geben, werden die bekanntesten nachfolgend aufgezeigt.

Zeitfenster

Eine bedeutende Erweiterung des räumlich orientierten Tourenplanungsproblems ist die Integration zeitlicher Aspekte. Im *Tourenplanungsproblem mit Zeitfenstern* (Vehicle Routing Problem with Time Windows, VRPTW) kann ein Kunde ausschließlich während eines gegebenen Zeitintervalls, z.B. während den Öffnungszeiten oder den Stunden vor der Öffnung eines Ladens, be-

dient werden. Beispiele finden sich bei der Belieferung von Banken, der Postzustellung, der industriellen Abfallentsorgung, der Planung von Schulbus-Routen und bei Situationen, in denen ein Kunde Zugang, Verifikation oder Zahlung bei Erhalt eines Produkts oder einer Leistung bereitstellen muss. Zeitfenster können hierbei „hart“ oder „weich“ sein. Im Fall harter Zeitfenster muss ein Fahrzeug, welches zu früh eintrifft, bis zu Beginn des Kunden-Zeitfensters warten. Eine Ankunft beim Kunden nach dem spätmöglichen Beginnzeitpunkt ist hierbei unzulässig. Im Gegensatz dazu können im Fall weicher Zeitfenster die Kunden-Zeitfenster kostenpflichtig verletzt werden. Wegen der hohen Bedeutung dieses Aspekts ist dem VRPTW sehr viel Aufmerksamkeit zugekommen. Für einen Überblick¹³ wird verwiesen auf Cordeau et al. [Cor02c], Bräysy und Gendreau [Brä01a, Brä04a, Brä04b], Bergmann [Ber98] und Desrosiers et al. [Des95].

Periodizität

Reale Planungssituationen verlangen oftmals neben einer täglichen Planung auch eine mehrtägige, wie z.B. wöchentliche Planung, der Fahrten. Beispiele sind die Auslieferung von Öl, Benzin und industriellen Gasen, die Müllabholung, die Distribution von Getränken und die Sammlung von Rohmilch. Das entsprechende Tourenplanungsproblem wird als *periodisches Tourenplanungsproblem* (Periodic Vehicle Routing Problem, PVRP) bezeichnet. Hierbei gilt es, Fahrtrouten für alle Tage eines gegebenen mehrtägigen Planungshorizonts unter Einhaltung gegebener Restriktionen zu bestimmen. Einen detaillierten Überblick zum PVRP gibt Kapitel 2.3.1.

Depotvielfalt

Beim *Mehrdepot Tourenplanungsproblem* (Multi-Depot Vehicle Routing Problem, MDVRP) operieren Fahrzeuge ausgehend von mehreren Depots. Jedes

¹³ In der englischsprachigen Literatur werden Tourenplanungsprobleme ohne Zeitrestriktionen oftmals als Vehicle Routing Probleme bezeichnet, wohingegen man bei Vorhandensein fester Zeitvorgaben von einem (reinen) *Vehicle Scheduling Problem* spricht. Das VRPTW wird dementsprechend teilweise auch als *Vehicle Routing and Scheduling Problem* bezeichnet [Bod83, Dom97].

Fahrzeug ist dabei fest einem Depot zugeordnet und muss zu diesem Depot zurückkehren. Auch Versionen mit „offenen“ Depots, bei denen das Start-Depot nicht mit dem End-Depot übereinstimmen muss und Varianten ohne a priori Depotzuordnung der Fahrzeuge sind denkbar. MDVRP-Probleme werden in Kapitel 2.3.2 ausführlich betrachtet.

Heterogener Fuhrpark

Obwohl in den meisten theoretischen Modellen eine homogene Fahrzeugflotte angenommen wird, ist diese in der Praxis selten gegeben. Unterschiede finden sich z.B. in den Ausstattungen, Ladekapazitäten sowie Fahr- und Servicezeiten verschiedener Fahrzeuge. Am häufigsten wird eine Unterscheidung nach der Kapazität der Fahrzeuge vorgenommen. Dies wird beim *Tourenplanungsproblem mit heterogenen Fahrzeugen* (Vehicle Routing Problem with Heterogeneous Vehicles, VRPHE) und *Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem* (FSMVRP)¹⁴ berücksichtigt. Wohingegen beim VRPHE die Anzahl an verfügbaren Fahrzeugen je Typ begrenzt ist und die beste Nutzung eines vorhandenen Fuhrparks im Vordergrund steht, ist die Zielsetzung beim FSMVRP einen Fuhrpark aus einer Menge gegebener Fahrzeugtypen optimal zusammenzustellen. Abhängig von der Problemstellung werden dabei differenzierte Kostenstrukturen betrachtet. Das VRPHE mit heterogenen variablen Kosten und ohne Fixkosten je Fahrzeugtyp wurde von Taillard [Tai96a] vorgestellt. Ein neuerer Lösungsansatz stammt z.B. von Tarantilis, Kiranoudis und Vassiliadis [Tar04a]. Das FSMVRP wurde in seiner bekanntesten Form mit heterogenen Fixkosten und ohne Differenzierung der variablen Kosten erstmalig in der Arbeit von Golden et al. [Gol84] behandelt. Salhi et al. [Sal92] erweiterten den Ansatz und betrachteten eine Unterscheidung der variablen Kosten je Fahrzeugtyp. Neuere Ansätze zum FSMVRP stammen z.B. von Wassen und Osman [Was02], Renaud und Boctor [Ren02], Han und Cho [Han02], Liu und Shen [Liu99], Gendreau et al. [Gen99], Ochi et al. [Och98a, Och98b] und Osman und Salhi [Osm96c].

¹⁴ In der einschlägigen Literatur finden sich abhängig von den Kostenstrukturen alternative Bezeichnungen für diese Problemstellung, vgl. z.B. Wassen und Osman [Was02] und Gendreau et al. [Gen99].

Kundenspezifische Fahrzeugwahl

Das *ortsabhängige Tourenplanungsproblem* (Site Dependent Vehicle Routing Problem, SDVRP) betrachtet ebenfalls einen heterogenen Fuhrpark, jedoch können bei dieser Problemstellung die Kunden nur von einer Teilmenge der gegebenen Fahrzeugtypen angefahren werden. Probleme dieser Art treten beispielsweise auf beim Einsatz von Fahrzeugen mit speziellen Be- und Entladevorrichtungen, wie Hebebühnen oder Pumpen für Flüssigkeiten, Zusatzausstattungen oder Vorrichtungen für den Krankentransport. Die Arbeiten von Rochat und Semet [Roc94] und Sniezek et al. [Sni02] unterstreichen die hohe Praxisrelevanz dieses Problemtyps, dem in der Forschung bislang jedoch nur relativ wenig Aufmerksamkeit gewidmet wurde. Das SDVRP wurde erstmals von Nag, Golden und Assad [Nag88] untersucht und bekannte Lösungsverfahren stammen von Chao, Golden und Wasil [Cha98, Cha99] und Cordeau und Laporte [Cor01b]. Letztere zeigen insbesondere, wie sich das PVRP, MDVRP und SDVRP ineinander überführen lassen und geben einen einheitlichen Lösungsansatz zu diesen Problemen.

Als Variante des SDVRP (bzw. auch des VRPHE) kann das *Tourenplanungsproblem bei restringierendem Anhängereinsatz* (Truck and Trailer Routing Problem, TTRP) gesehen werden, bei dem Fahrzeuge einen Anhänger mitführen. Eine Teilmenge der Kunden kann dabei ausschließlich ohne Anhänger angefahren werden, was das Abkoppeln von Anhängern erzwingt. Probleme dieser Art treten z.B. im innerstädtischen Bereich oder in bergigen Gegenden auf. Eine ausführliche Beschreibung des Problems findet sich in Kapitel 2.3.3.

Mehrfacheinsatz von Fahrzeugen

Bei Tourenplanungsproblemen mit *Mehrfacheinsatz der Fahrzeuge* (Multi-Trip Vehicle Routing Problem, MTVRP) kann ein Fahrzeug mehrere Touren ausgehend vom Depot fahren, wobei eine Gesamteinsatzdauer des Fahrzeuges nicht überschritten werden darf. Ein Mehrfacheinsatz von Fahrzeugen erlaubt eine verbesserte zeitliche Fahrzeugauslastung und unter Umständen eine Einsparung einzelner Transportmittel. Dabei sind neben reinen Fahrt- und Bedienzeiten ggf. noch Aufenthaltszeiten im Depot zur Vor- und Nachbereitung der Fahrzeuge für jede weitere Tour zu berücksichtigen. Im Unter-

schied zu *Vehicle Scheduling Problemen*, bei denen die Touren fix gegeben sind und die Reihenfolgeplanung und Zuordnung der Touren zu Fahrzeugen im Vordergrund steht, betrachtet das MTVRP eine simultane Planung und Zusammenstellung der Touren. Probleme dieser Art treten häufig in der Praxis auf, z.B. bei der Auslieferung von Baustoffen an nahe gelegene Baustellen, dem Einsammeln von Rohmilch von nahe am Verarbeitungswerk gelegenen Milcherzeugern oder der Distribution von Gütern in Fahrzeugen geringer Kapazität, z.B. bei der Versorgung von Lebensmittelmärkten im Innenstadtbereich. Obwohl dies in der Realität gängige Praxis ist, finden sich in der Literatur relativ wenig Beiträge zu diesem Gebiet. Lösungsansätze stammen z.B. von Fleischmann [Fle90], Taillard, Laporte und Gendreau [Tai96b], Golden, Laporte und Taillard [Gol97], Steckhan [Ste97b], Brandão und Mercer [Bra97, Bra98], Prins [Pri02], Petch und Salhi [Pet03] und im Rahmen einer Fallstudie von Tung und Pinnoi [Tun00].

Kantenorientierte Probleme

Im Vergleich zu den geläufigeren *knotenorientierten* Problemen werden die Kunden bei *kantenorientierten* Problemen der Tourenplanung (Arc Routing Problems) als Kanten eines Graphen modelliert. Ziel ist die Ermittlung einer kostenminimalen Bedienung aller Kanten eines Graphen unter Einhaltung verschiedener Restriktionen. Probleme dieser Art finden sich z.B. bei der Abholung von Haushaltsmüll, der Postzustellung oder der Schneeräumung. Auch Mischformen aus knoten- und kantenorientierten Problemen sind bekannt. Siehe Assad und Golden [Ass95], Dror [Dro00], Ghiani, Hertz und Laporte [Ghi02] und Hertz [Her02] für einen Überblick zu Lösungsverfahren für diese Problemklasse.

Pickup and Delivery Probleme / Auslieferung mit Rückfuhr

Anders als im VRP wird bei *Pickup and Delivery* Problemen eine Transport-Nachfrage durch Angabe der Standorte für Abholung (Pickup) und Ablieferung (Delivery) eines Gutes spezifiziert. Jede Ladung muss dabei von einem Fahrzeug direkt vom Ursprungsort zum Zielort transportiert werden. Bezieht sich der Transport auf Personen, so spricht man von einem *Dial-a-Ride* Pro-

blem. Zu diesem Problem vgl. Desaulniers et al. [Des02] und Cordeau und Laporte [Cor02d].

Beim Tourenplanungsproblem mit *Backhauls* wird die Kundenmenge in zwei Teilmengen unterteilt. Die erste Menge (linehaul customers) muss mit einem Produkt beliefert werden, wohingegen die zweite Menge (backhaul customers) ein Produkt zur Abholung bereitstellt. Aus praktischen Gesichtspunkten wird zumeist gefordert, dass die Auslieferung auf einer Route zeitlich stets vor Beginn der Abholung abgeschlossen sein muss. Einen Überblick zu dieser Variante geben Toth und Vigo [Tot02c], Osman und Wassan [Osm02] und Casco, Golden und Wasil [Cas88].

Tourenplanung mit Lagerhaltung

Die Geschäftspraxis des *Vendor Managed Inventory* findet sich bei vielen industriellen Unternehmen. Darunter wird eine Situation verstanden, in der ein Lieferant das Lager seines Kunden führt, den Lagerbestand überwacht und den Zeitpunkt und die Menge der Lagerauffüllung bestimmt. Die Aufgabe, ein damit verbundenes Distributionssystem zu entwickeln, wird als *Inventory Routing* bezeichnet. Insbesondere gilt es zu beachten, dass hier nicht die Kunden, sondern die mit der Lagerhaltung beauftragte, ausliefernde Firma die Entscheidungen über Zeit- und Menge der Belieferung trifft, wobei der Mindestlagerbestand eines Kunden stets sichergestellt sein muss. Das Inventory Routing Problem beinhaltet also die Integration und Koordination zweier Komponenten der logistischen Wertschöpfungskette: Lagerhaltung und Tourenplanung. Campbell, Clarke und Savelsberg [Cam02] und Campbell et al. [Cam98] geben einen Überblick zu Lösungsansätzen für diese Problemstellung.

Dynamische und stochastische Tourenplanung

Die meisten VRP Varianten betrachten Probleme deterministischer bzw. statischer Natur. Die zunehmende Bedeutung von Online-Diensten und Echtzeit-Anwendungen haben zu einem Anstieg an Fracht- und Flottenmanagement Systemen geführt, die unter dynamischen Konditionen operieren müssen. Beispiele hierfür sind der Einsatz von Rettungswagen und Taxis oder

ein dringlicher Service im Rahmen von Vendor Managed Inventory Systemen. Müssen Entscheidungen getroffen werden, bevor die notwendigen Informationen vollständig vorliegen, so handelt es sich um *dynamische, real-time* bzw. *stochastische Tourenplanungsprobleme*. Die stochastische Natur dieser Probleme kann hierbei verschiedene Formen annehmen. So können z.B. die Fahrtzeiten zwischen den Kunden, die Servicezeit, der Ort und die Menge eines Kunden variieren. Die Anpassung von a priori erstellten Tourenplänen erfolgt zumeist kontinuierlich durch rollierende Einplanung. Einen Überblick über Lösungsverfahren für diese Klasse von Tourenplanungsproblemen geben Psaraftis [Psa88, Psa95], Gendreau, Laporte und Séguin [Gen96], Gendreau und Potvin [Gen98b] und Ghiani et al. [Ghi03].

Kombinierte Standort- und Tourenplanung

Das *kombinierte Standort- und Tourenplanungsproblem* ist eine Agglomeration zweier schwer lösbarer Probleme, nämlich dem Problem der Auswahl von Depotstandorten aus einer Menge von möglichen Standorten und dem Mehrdepot-Tourenplanungsproblem, falls die Depotstandorte bekannt sind. Beide Probleme sind interdependent, da die Wahl der Depotstandorte die Tourenplanung maßgeblich beeinflusst und umgekehrt [Nag99]. Probleme dieser Art treten z.B. auf bei der Bestimmung neuer Auslieferungszentren im Konsumgüterbereich oder bei der Planung von Zustellbasen der Paketpost. Um einen Einblick in Lösungsansätze zu diesem Problemtyp zu erlangen, wird verwiesen auf Laporte [Lap88a], Min, Jayaraman und Srivastava [Min98], Bruns [Bru98], Tuzun und Burke [Tuz99], Nagy und Salhi [Nag99], Klose [Klo01] und Ghiani und Laporte [Ghi01].

Asymmetrie

In der Realität sind v.a. im städtischen Bereich die Verbindungen zwischen den Kunden sowie den Kunden und dem Depot selten durchwegs symmetrisch. Oft ergeben sich ungleiche Verbindungskosten aufgrund von Einbahnstraßen, Abbiegeverböten oder ähnlichen Verkehrsregelungen. Zu *asymmetrischen Tourenplanungsproblemen* wird verwiesen auf Toth und Vigo [Tot98a], Vigo [Vig96] und Bodin, Maniezzo und Mingozzi [Bod99].

Multiple Restriktionen

Eine Kombination verschiedener Restriktionen findet sich häufig bei realen Anwendungsproblemen. Einen Einblick in die Komplexität praxisbezogener Anwendungen geben Golden und Wasil [Gol87], Rochat und Semet [Roc94], Golden, Assad und Wasil [Gol02], Snizek et al. [Sni02], Campbell, Clarke und Savelsberg [Cam02], Hadjiconstantinou und Roberts [Had02] sowie das Buch von Golden und Assad [Gol88]. Weitere Beispiele sind u.a. auch der Bibliographie zu Tourenplanungsproblemen von Laporte und Osman [Lap95] zu entnehmen.

2.2.2 Klassifikationsansätze

Um die Vielzahl an Varianten von Tourenplanungsproblemen zu systematisieren, wurden verschieden Klassifikations- und Überblicksschemen vorgeschlagen. Häufig herangezogen wird die grundlegende Taxonomie von Bodin et al. [Bod83] bzw. Bodin und Golden [Bod81], die elf Ausprägungscharakteristika vorsieht. Dazu zählen u.a. Größe der Fahrzeugflotte, Fahrzeugtypen, Standorte der Fahrzeuge, Art und Ort der Nachfrage, zugrunde liegendes Netzwerk und Zielsetzung der Planung. Für jede Ausprägung werden die Ausprägungsformen noch weiter verfeinert. Vergleichbare Aufstellungen finden sich z.B. bei Van Breedam [Bre95], Röscher [Rös93], Elchner [Elc89], Assad [Ass88], Hellmann [Hel84], Reichardt [Rei80] und Matthäus [Mat78]. Die aufgeführten Schemen unterscheiden sich v.a. in den zugrunde gelegten Kategorisierungsmerkmalen und bieten vorwiegend einen Überblick über mögliche Ausprägungsformen von Tourenplanungsproblemen.

Desrochers, Lenstra und Savelsbergh [Des90] hingegen schlagen ein formalisiertes Klassifikationsschema vor, das sich an der mathematischen Modellstruktur von Tourenplanungsproblemen orientiert. Dieses Schema wird z.B. bei Desaulniers et al. [Des99] zugrunde gelegt. Vier Hauptcharakteristika werden unterschieden: Depot und Kunden, Fahrzeuge, Problem- oder Zusatzcharakteristik sowie vorgegebene Zielsetzung. Jede dieser Charakteristika besitzt eine Menge von Attributen mit verschiedenen Ausprägungen. Das Schema erreicht wohl als einziges der hier genannten den Status eines wirklichen Klassifikationsschemas, da es eine eindeutige Bestimmung eines Problems

durch Angabe der Attributausprägungen ermöglicht. Zur Beschreibung wird von den Autoren eine Kurzschreibweise mittels eines 4-Tupels vorgeschlagen (vgl. Desrochers, Lenstra und Savelsbergh [Des90] und Domschke [Dom97]).

2.3 Fokussierte Varianten von Tourenplanungsproblemen

2.3.1 Periodische Tourenplanung (PVRP)

2.3.1.1 Problembeschreibung inklusive mathematischer Formulierung

Das periodische Tourenplanungsproblem (Periodic Vehicle Routing Problem, PVRP) erweitert den Planungshorizont des Standardproblems von einem auf t Tage ($t > 1$). Jeder Kunde i spezifiziert dabei eine Bedienfrequenz e_i und eine Menge C_i zulässiger Bedienmuster (Visit Day Combination¹⁵, VDC). Ein Bedienmuster gibt hierbei an, an welchen Tagen der Periode eine Lieferung zu erfolgen hat [Cor97]. Beispielsweise gelte für einen Kunden i bei einem fünftägigen Planungshorizont $e_i = 2$ und $C_i = \{\{1, 3\}, \{2, 4\}, \{2, 5\}\}$. Kunde i muss dann an genau zwei Tagen bedient werden und die Bedienung muss an den Tagen 1 und 3 oder an den Tagen 2 und 4 oder an den Tagen 2 und 5 stattfinden. Analog zum VRP darf ein Kunde an einem Tag immer nur maximal einmal von genau einem Fahrzeug bedient werden. Kunden fragen stets die gleiche Menge nach (bzw. bieten diese an, aber nicht beides) und Fahrzeuge sind auf maximal einen Einsatz pro Tag beschränkt.

Diese Form der Darstellung ist die am häufigsten und auch in dieser Arbeit verwendete. Eine Erweiterung dieses Schemas hinsichtlich verschiedener Liefermengen je Tag bzw. je Tag und Bedienmuster ist möglich (vgl. Ball [Bal88]). Eine andere Darstellungsmöglichkeit der Bedienmuster ist die Beschreibung über die Anzahl der von einem Kunden geforderten Besuche in der Planungsperiode und die Angabe der Bedingungen bzgl. der zeitlichen

¹⁵ Auch als *Delivery Combination* bezeichnet, vgl. Tan und Beasley [Tan84] oder Gaudioso und Paletta [Gau92].

Mindest- und Maximalabstände der Belieferungen [Kab97]. Diese Modellierungsform hat jedoch gegenüber der oben dargestellten Form den Nachteil, dass die vom Kunden gewünschten Bedienmuster nicht immer exakt abgebildet werden können. Im obigen Beispiel wäre bei einem Mindestabstand von einem und einem Maximalabstand von zwei Tagen z.B. auch eine Bedienung an den Tagen 1 und 4 zulässig.

Das PVRP wird von Ball [Bal88] als *Allocation/Routing Problem* bzw. von Chao [Cha95b] als *mehrstufiges Tourenplanungsproblem* (Multilevel Problem) spezifiziert. Probleme dieser Art enthalten zusätzlich zu „normalen“ Tourenplanungsproblemen eine weitere Zuordnungskomponente. So muss beim PVRP zuerst jedem Kunden ein zulässiges Bedienmuster zugeordnet werden, damit abgeleitet werden kann, welche Kunden an welchen Tagen zu bedienen sind. Für jeden einzelnen Tag der Planungsperiode kann dann ein „normales“ VRP gelöst werden. Die Zielsetzung ist die Minimierung der insgesamt über alle Tage des Planungshorizonts zurückzulegenden Entfernungen.

Um einen besseren Einblick in die Problemstellung zu geben, wird nachfolgend -unter Verwendung der tourenplanungsspezifischen Notation aus Kapitel 2.1- das Modell von Cordeau, Gendreau und Laporte [Cor97] für das sog. Standard-PVRP skizziert:

Sei $G = (N, A)$ ein Multigraph¹⁶ mit Knotenmenge $N = \{0, 1, \dots, n\}$ und Kantenmenge $A = \{(i, j)^{ks} \mid i, j \in N, i \neq j; k = 1, \dots, m; s = 1, \dots, t\}$, wobei k die Fahrzeugnummer und s den Tag der Bedienung bezeichne, und c_{ij}^{ks} die mit Kante $(i, j)^{k,s}$ assoziierten Fahrtkosten des Fahrzeuges k von Knoten i zu Knoten j am Tag s . Die binäre Konstante a_{rs} gebe an, ob Tag s zur Besuchskombination $r \in C_i$ des Kunden i gehört ($a_{rs} = 1$) oder nicht ($a_{rs} = 0$). Weiterhin werde die binäre Entscheidungsvariable z_{ir} definiert, die 1 sei, falls und nur falls die Besuchskombination $r \in C_i$ dem Kunden i zugewiesen ist und 0 sonst. Die binäre Entscheidungsvariable x_{ij}^{ks} sei gleich 1, falls und nur falls Fahrzeug k am Tag s direkt von Knoten i zu Knoten j fährt und 0 sonst. Knoten 0 referenziert das Depot und es gelte für dessen Servicezeit $d_0 = 0$ und Menge $q_0 = 0$. Das PVRP kann dann wie folgt formuliert werden:

¹⁶ Da die gleiche Verbindung mehrere Male genutzt werden kann, wird das PVRP auf einem Multigraphen definiert.

(PVRP)

$$\text{minimiere} \quad \sum_{s=1}^t \sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_{ij}^{ks} x_{ij}^{ks} \quad (0)$$

u.d.B.:

$$\sum_{r \in C_i} z_{ir} = 1 \quad i = 1, \dots, n; \quad (1)$$

$$\sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^m x_{ij}^{ks} = \sum_{r \in C_i} a_{rs} z_{ir} \quad i = 1, \dots, n; \quad s = 1, \dots, t; \quad (2)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ih}^{ks} = \sum_{j=0}^n x_{hj}^{ks} \quad h = 0, \dots, n; \quad k = 1, \dots, m; \quad s = 1, \dots, t; \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{0j}^{ks} \leq 1 \quad k = 1, \dots, m; \quad s = 1, \dots, t; \quad (4)$$

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n q_i x_{ij}^{ks} \leq Q_k \quad k = 1, \dots, m; \quad s = 1, \dots, t; \quad (5)$$

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n (c_{ij}^{ks} + d_i) x_{ij}^{ks} \leq D_k \quad k = 1, \dots, m; \quad s = 1, \dots, t; \quad (6)$$

$$\sum_{i \in B} \sum_{j \in B} x_{ij}^{ks} \leq |B| - 1 \quad k = 1, \dots, m; \quad s = 1, \dots, t; \quad (7)$$

$$B \subseteq N \setminus \{0\}; \quad |B| \geq 2;$$

$$x_{ij}^{ks} \in \{0, 1\} \quad i = 0, \dots, n; \quad j = 0, \dots, n; \quad (8)$$

$$k = 1, \dots, m; \quad s = 1, \dots, t;$$

$$z_{ir} \in \{0, 1\} \quad i = 1, \dots, n; \quad r \in C_i; \quad (9)$$

Nebenbedingung (1) spezifiziert, dass jedem Kunden genau eine zulässige VDC zugewiesen wird und Restriktion (2), dass jeder Kunde nur an den Bedientagen der gewählten VDC und dann genau einmal angefahren wird. Bedingung (3) stellt sicher, dass ein Fahrzeug, das an einem bestimmten Tag einen Kunden anfährt, auch am gleichen Tag wieder von diesem abfährt. Ein Mehrfacheinsatz eines Fahrzeuges an einem Tag ist unzulässig (4). Die Beschränkungen für Gesamtkapazität und Gesamteinsatzdauer¹⁷ eines Fahrzeuges k sind in Gleichungen (5) und (6) abgebildet. Nebenbedingung (7) fordert, dass jede Fahrzeugtour zusammenhängend sein muss (Subtour Elimination Constraints, vgl. Toth und Vigo [Tot02b]). Die Variablendefinitionen sind in (8) und (9) angegeben.

Soweit die Fahrzeugflotte homogen ist, kann $D_k = D$ und $Q_k = Q$ ($k = 1, \dots, m$) gesetzt werden. Sind die Fahrtkosten zwischen den Kunden unabhängig vom verwendeten Fahrzeug und dem Tag der Bedienung, so gilt $c_{ij}^{ks} = c_{ij}$ ($k = 1, \dots, m; s = 1, \dots, t$). Für $t = 1$ reduziert sich der Planungshorizont auf einen Tag und es resultiert das Standard-VRP. Ein Spezialfall gilt für $m = 1$ und $D_1 = Q_1 = \infty$, wodurch das PVRP auf das periodische Handlungsreisendenproblem (Periodic Traveling Salesman Problem, PTSP)¹⁸ reduziert wird.

2.3.1.2 Benchmarkprobleme

In der Literatur werden für das (Standard-)PVRP zumeist 23 Benchmarkprobleme¹⁹ (P1 bis P23) zu Vergleichszwecken herangezogen. Die Probleme P1 bis P10 wurden von Eilon, Watson und Christofides [Eil71] für das VRP generiert und von Christofides und Beasley [Chr84] für das PVRP adaptiert. Datensatz P11 wurde von Russell und Igo [Rus79] vorgestellt. Der ursprüngliche Datensatz zu P11 umfasste eine Periode von sechs Tagen und enthielt genau einen Kunden mit Belieferung an Tag 6. Christofides und Beasley [Chr84] modifizierten den Datensatz auf einen 5-Tage Horizont und die Be-

¹⁷ Die mit den Kanten assoziierten Fahrtzeiten seien proportional zu den Entfernungen.

¹⁸ Vgl. Paletta [Pal92, Pal02], Chao, Golden und Wasil [Cha95a] und Bertazzi, Paletta und Speranza [Ber04].

¹⁹ Die Datensätze sind beziehbar über das Internet unter <http://www.hec.ca/chairedistributique/data/> (Abruf am 7.10.2003).

dienung des entsprechenden Kunden auf genau einen der fünf Tage.²⁰ Die Testprobleme P12 und P13 stammen von Russell und Gribbin [Rus91] und die Datensätze P14 bis P32 von Chao, Golden und Wasil [Cha95b] bzw. von Chao [Cha93a]. Die Testdaten haben zwischen 20 und 417 in der Ebene verteilte Kunden mit verschiedenen Bedienmustern, einen Planungshorizont zwischen zwei und zehn Tagen und ein bis neun homogene Fahrzeuge, welche an jedem Tag zur Einplanung zur Verfügung stehen.²¹ Alle Probleme enthalten einen homogenen Fuhrpark und keine Beschränkung der Gesamteinsatzzeit, d.h. es gilt stets $D_k = D = \infty$ ($k = 1, \dots, m$). Die Charakteristika der einzelnen Benchmarkprobleme sind in Tabelle 2.2 auf Seite 31 aufgeführt. Beispielhaft ist der beste bekannte Tourenplan zu Testproblem P21 mit Gesamtdistanz 2177,35 in Abbildung 2.2 dargestellt. Details hierzu sind Anhang E zu entnehmen.

Weitere PVRP-Testprobleme stammen von Cordeau, Gendreau und Laporte [Cor97]²². Sie enthalten zwischen vier und sechs Tage, 48 und 288 Kunden und zwei bis zwölf Fahrzeuge je Tag. Jeder Datensatz hat ein Limit für die maximale tägliche Gesamteinsatzzeit eines Fahrzeuges. Bisher wurde -neben dem von Cordeau, Gendreau und Laporte [Cor97] vorgestellten Algorithmus- lediglich das Verfahren von Angelelli und Speranza [Ang02] auf diesen Problemen getestet.

²⁰ Im Original-Datensatz P11 von Russell und Igo [Rus79] ist die Belieferungsmenge der Kunden 1, 3 und 4 abhängig vom Tag der Belieferung. Da jeder Kunde genau ein mögliches Besuchsmuster hat, können die genannten Kunden durch eine Menge von Kunden mit gleichen Koordinaten ersetzt werden. Hierbei wird für jeden Tag des ursprünglichen Bedienmusters ein Kunde mit der entsprechenden Bedienmenge für diesen Tag eingefügt. Dadurch kann das Testproblem in die Form des vorgestellten PVRP-Modells überführt werden [Cor97].

²¹ Ausnahme bildet Testdatensatz P1, bei dem am ersten Tag zwei und am zweiten Tag drei Fahrzeuge zur Verfügung stehen. Um bei diesem Datensatz vereinfachend mit einer konstanten Fahrzeuganzahl (von drei Fahrzeugen) pro Tag des zweitägigen Planungshorizonts rechnen zu können, wird -wie von Cordeau, Gendreau und Laporte [Cor97] vorgeschlagen- ein fiktiver Kunde mit Standort Depot und einer Menge gleich der Fahrzeugkapazität hinzugefügt und dessen Bedienung an Tag 1 erzwungen.

²² Die Datensätze sind beziehbar über das Internet unter <http://www.hec.ca/chairedistributique/data/> (Abruf am 7.10.2003).

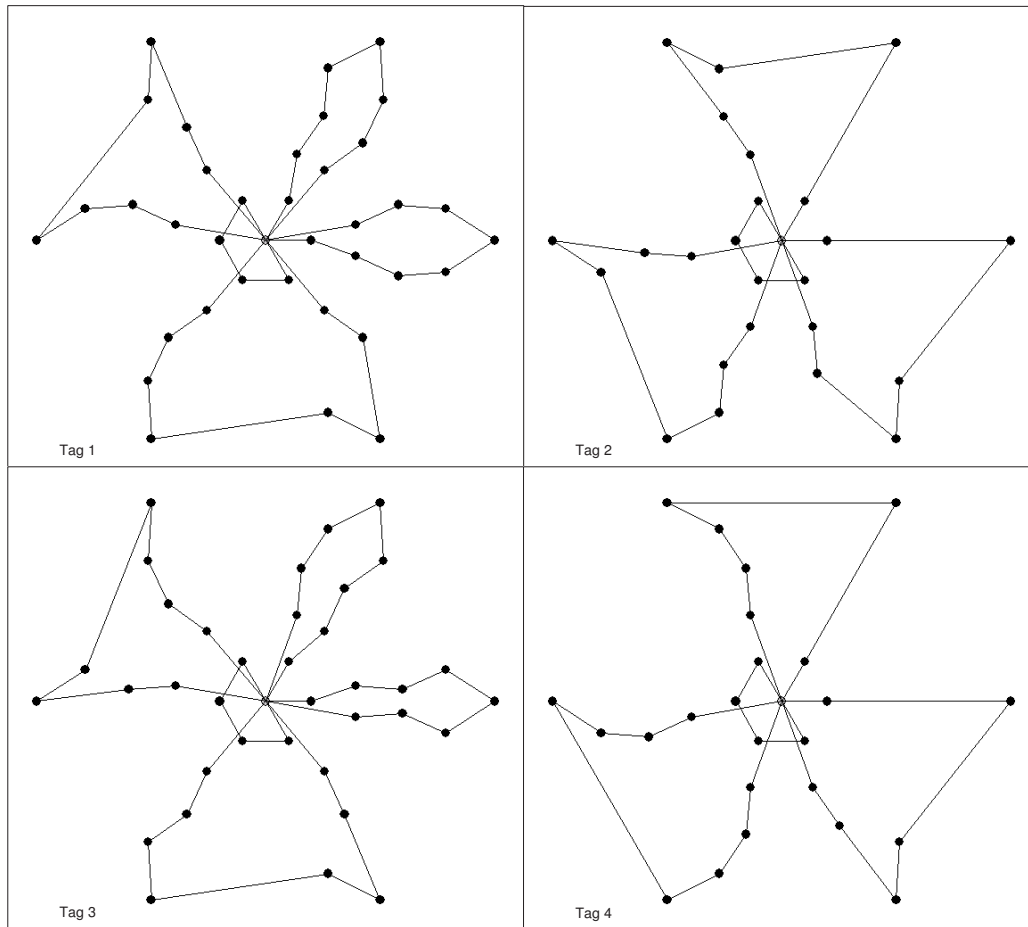


Abbildung 2.2: Beste bekannte Lösung zu PVRP-Testproblem P21

2.3.1.3 Literaturüberblick

Die ersten bekannten Anwendungen des PVRP stammen aus dem Bereich der Abfallbeseitigung (Beltrami und Bodin [Bel74]; Russell und Igo [Rus79]) und Lebensmitteldistribution (Golden und Wasil [Gol87]). Neuere Anwendungsbereiche umfassen die Wäschezustellung in Krankenhäusern (Banerjea-Brodeur et al. [Ban98]), den Einsatz von Montagepersonal (Hadjiconstantinou und Baldacci [Had98]) oder die Altpapiersammlung (Baptista, Oliveira und Zúquete [Bap02]). Für die meisten dieser Anwendungsprobleme wurden problemspezifische Heuristiken entwickelt. Bekannte heuristische Lösungsansätze für das Standard-PVRP stammen von Christofides und Beasley [Chr84], Tan und Beasley [Tan84], Russell und Gribbin [Rus91] sowie neuere metaheuristische Lösungsansätze von Chao, Golden und Wasil [Cha95b], Cordeau,

Gendreau und Laporte [Cor97] und Drummond, Ochi und Vianna [Dru01]. In den letzten Jahren wurden auch vermehrt Erweiterungen des PVRPs betrachtet. Zu nennen sind hier v.a. die Erweiterung um mehrere Depots (Hadjiconstantinou und Baldacci [Had98]; Yang und Chu [Yan00]), um Zeitfenster (Cordeau, Laporte und Mercier [Cor01a, Cor03a]) und um Zwischenlager (Angelelli und Speranza [Ang02]). Genannt werden muss auch ein Ansatz von Gaudio und Paletta [Gau92], bei dem ein Mehrfacheinsatz der Fahrzeuge zulässig ist und vorrangig die Anzahl der maximal pro Tag einzusetzenden Fahrzeuge minimiert wird.

Tabelle 2.1 gibt -ohne einen Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben- einen chronologischen Überblick über relevante Arbeiten auf dem Gebiet der periodischen Tourenplanung und enthält insbesondere auch Ansätze zu Varianten des PVRP mit zusätzlichen Restriktionen (in der letzten Spalte von Tabelle 2.1 gekennzeichnet mit (E), falls es sich um einen Lösungsansatz für eine Erweiterung des PVRP handelt, z.B. das PVRP mit Zeitfenster, und mit (A), falls die Arbeit auf einer praxisbezogenen Anwendung beruht). Das zum PVRP verwandte Inventory Routing Problem²³, wird an dieser Stelle nicht weiter behandelt. Für Ansätze zu diesem Problemtyp wird verwiesen auf Campbell, Clarke und Savelsbergh [Cam02], Dror und Ball [Dro87] und Carter et al. [Car96].

Im Folgenden sollen die bekanntesten Verfahren für das Standard-PVRP genauer betrachtet werden:

Christofides und Beasley [Chr84] stellten das erste formale Modell für das Standard-PVRP vor und entwickeln zwei Heuristiken bestehend aus einer Initialisierungs- und einer Verbesserungsphase. Beide Heuristiken relaxieren das PVRP auf ein einfacher zu lösendes Ersatzproblem, dessen Minimierung zugleich die Gesamtentfernung des PVRP minimieren soll. Die erste Heuristik nutzt als Ersatzproblem ein p -Median Problem²⁴ und weist jedem Tag genau ein Zentrum zu. Ziel ist eine optimale Auswahl der Belieferungsmuster aller Kunden, so dass die Summe der Distanzen von den Kunden zu den durch ihre Belieferungsmuster bestimmten Zentren minimiert wird. Die zweite Heuristik relaxiert das PVRP auf ein periodisches Rundreiseproblem

²³ Vgl. Kapitel 2.2.1.

²⁴ Vgl. Current, Daskin und Schilling [Cur02, S. 90].

Tabelle 2.1: Arbeiten zur periodischen Tourenplanung

Jahr	Autor(en)	Referenz	Anmerkung ^a
1974	Beltrami und Bodin	[Bel74]	(A) Abfallbeseitigung
1979	Russell und Igo	[Rus79]	(A) Abfallbeseitigung
1984	Christofides und Beasley	[Chr84]	(S)
1984	Tan und Beasley	[Tan84]	(S)
1987	Golden und Wasil	[Gol87]	(A) Getränkedistribution
1988	Ball	[Bal88]	(S) Formulierung
1991	Russell und Gribbin	[Rus91]	(S)
1992	Gaudioso und Paletta	[Gau92]	(E) Fahrzeugminimierung, Mehrfacheinsatz
1995	Chao, Golden und Wasil	[Cha95b]	(S)
1997	Kabath	[Kab97]	(S)
1997	Cordeau, Gendreau und Laporte	[Cor97]	(S)
1998	Banerjea-Brodeur et al.	[Ban98]	(A) Krankenhaus-Management
1998	Hadjiconstantinou und Baldacci	[Had98]	(A) Mehrere Depots, Personaleinsatzplanung
2000	Yang und Chu	[Yan00]	(E) Mehrere Depots
2001	Drummond, Ochi und Vianna	[Dru01]	(S)
2001	Cordeau, Laporte und Mercier	[Cor01a]	(E) Zeitfenster
2002	Angelelli und Speranza	[Ang02]	(E) Zwischenlager
2002	Baptista, Oliveira und Zúquete	[Bap02]	(A) Altpapier-Sammlung
2003	Teixeira, Antunes und de Sousa	[Tei04]	(A) Abfallbeseitigung
2003	Cordeau, Laporte und Mercier	[Cor03a]	(E) Zeitfenster

^a (S) Standard-PVRP, (E) Erweiterung, (A) Anwendung.

(Periodic Traveling Salesman Problem, PTSP), bei dem an jedem Tag ein Rundreiseproblem anstelle eines VRPs gelöst werden muss. Ziel ist wiederum eine optimale Zuordnung der Belieferungsmuster, so dass die Gesamtdistanz der Rundreiseprobleme aller Tage des Planungshorizonts minimal ist. Beide Heuristiken versuchen im Anschluss an eine initiale Zuordnung durch Austausch der Bedienmuster die Ersatzprobleme weiter zu verbessern. Abschließend wird für jeden Tag des Planungshorizonts ein VRP gelöst. Die PTSP-basierende Heuristik konnte im Vergleich die besseren Ergebnisse erzielen [Chr84].

Tan und Beasley [Tan84] adaptierten ein Verfahren von Fisher und Jaikumar²⁵ [Fis81] für das VRP zur Lösung des PVRP. Hierzu werden in einem

²⁵ Vgl. Kapitel 3.2.3.

ersten Schritt für *jeden* Tag des Planungshorizonts m Seed-Punkte gewählt und eine Zuordnung der Belieferungsmuster bestimmt. Die Zuordnung erfolgt mit Hilfe eines linearen Programms und die Kosten der Zuordnung von einem Kunden zu einem Seed-Punkt werden als die anfallenden Zusatzkosten bei Einfügung des Kunden in eine Pendelroute vom Depot zum Seed-Punkt approximiert. Nach der Wahl der Belieferungsmuster wird ein VRP für jeden Tag des Planungshorizonts mit dem Verfahren von Fisher und Jaikumar [Fis81] gelöst.

Russell und Gribbin [Rus91] entwickelten ein fünfstufiges Verfahren. Im ersten Schritt wird für jeden Kunden ein initiales Belieferungsmuster mittels eines generalisierten Netzflussmodells gewählt. In der zweiten Phase findet die auf dem PTSP-Ersatzproblem basierende Verbesserungsheuristik von Christofides und Beasley [Chr84] Verwendung.²⁶ Die dritte Phase nutzt eine zu Christofides und Beasley [Chr84] analoge Austauschheuristik, arbeitet jedoch direkt auf den eigentlichen Fahrzeugtouren des PVRP. Beide Verbesserungsheuristiken arbeiten hierbei stets mit einer Teilmenge der Kunden. Die Verbesserungsheuristik der vierten Phase betrachtet hingegen alle Kunden simultan und versucht mittels Lösung eines binären linearen Programms die Gesamtdistanz durch Veränderung der Bedienmuster weiter zu verbessern.

Chao, Golden und Wasil [Cha95b] stellen eine zweistufige Heuristik für das PVRP vor. In einer ersten Stufe werden den Kunden initiale Bedienmuster so zugewiesen, dass die Kundenmengen über die einzelnen Tage des Planungshorizonts möglichst gleichmäßig verteilt sind. Im Anschluss wird für jeden Tag ein VRP gelöst. Die zweite Stufe basiert auf der von Dueck [Due93] vorgestellten Record-To-Record-Metaheuristik, bei der in einer Verbesserungsphase auch verschlechternde Lösungen akzeptiert werden, solange die Verschlechterung eine Toleranzschwelle nicht überschreitet. Die Suche evaluiert das Verschieben jeweils eines Kunden an alternative Positionen, wobei auch eine Änderung seines Bedienmusters betrachtet wird (sog. „one-point movement“). Wird eine Verbesserung gefunden, wird diese sofort umgesetzt. Des Weiteren wird die Fahrzeugkapazität ausgewählter Fahrzeuge relaxiert, was ggf. einen zusätzlichen Schritt zur Zulässigkeits-Konvertierung erforderlich

²⁶ Russell und Gribbin verwenden das TSP-Verbesserungsverfahren von Lin und Kernighan [Lin73] anstelle der von Christofides und Beasley [Chr84] genutzten 2-opt-Heuristik [Rus91, S. 754].

macht.²⁷ Die Heuristik durchläuft mehrere Zyklen²⁸ und enthält u.a. auch diversifizierende Reinitialisierungsschritte und intensivierende lokale Verbesserungsschritte.

Cordeau, Gendreau und Laporte [Cor97] entwickelten eine einheitliche Tabusuche zur Lösung des PVRP und MDVRP. Diese wurde später auch erfolgreich auf das SDVRP angewendet (vgl. Cordeau und Laporte [Cor01b]). Die Heuristik wird in Kapitel 4.2.10 im Rahmen von Tabusuche-Heuristiken für Tourenplanungsprobleme ausführlich betrachtet.

Drummond, Ochi und Vianna [Dru01] präsentieren eine evolutionäre Metaheuristik zur Lösung des PVRP. Diese Art von Heuristiken arbeitet auf einer Menge von Lösungen, genannt Population. Durch Kombination von Lösungen der aktuellen Population werden neue Lösungen erzeugt und die aktuelle Population um die besten gefundenen Lösungen aktualisiert. Bekannte populationsbasierte Heuristiken sind z.B. Genetische Algorithmen und Scatter Search.²⁹ Im Ansatz von Drummond, Ochi und Vianna [Dru01] wird eine initiale Population von zulässigen Lösungen erstellt und es erfolgt die Kombination von Lösungen durch eine Form der klassischen Crossover- und Mutations-Operatoren³⁰. Bei der Kombination werden jedoch keine Tourenpläne, sondern ausschließlich die Bedienmuster der Kunden sowie die maximale tägliche Gesamtkapazität der vorhandenen Fahrzeuge betrachtet. Zur Bestimmung des Zielfunktionswertes ist daher für jeden Tag des Planungshorizonts stets ein VRP zu lösen, wozu die Autoren eine Savings-Heuristik³¹ verwenden. Die Suche erfolgt parallel auf mehreren Prozessoren, welche untereinander kommunizieren und die jeweils beste gefundene Lösung austauschen.³²

Tabelle 2.2 zeigt -soweit verfügbar- die Ergebnisse der vorgestellten Verfahren für die 32 klassischen PVRP-Benchmarkprobleme³³. Die ersten Spalten geben

²⁷ Vgl. Chao, Golden und Wasi [Cha95b, S. 35].

²⁸ Vgl. Tabelle III in Chao, Golden und Wasi [Cha95b, S. 29].

²⁹ Für eine Einführung in die genannten populationsbasierten Metaheuristiken vgl. Reeves [Ree93b, Ree03] und Glover, Laguna und Martí [Glo03b].

³⁰ Vgl. Reeves [Ree03, S. 68].

³¹ Vgl. Kapitel 3.2.1.

³² Zu Details vgl. Drummond, Ochi und Vianna [Dru01, S. 382].

³³ Vgl. Kapitel 2.3.1.2.

Tabelle 2.2: Vergleich ausgewählter PVRP-Verfahren

ID	n	m	t	Q	[Chr84] c(s)	[Tan84] c(s)	[Rus91] c(s)	[Cha95b] c(s)	T ^a	[Cor97] c(s)	T ^b	[Dru01] c(s)	T ^c	OPT ^d c(s ^{**})
P1	50	3	2	160	547,4		537,3	524,6	1,1	524,61	3,39	1310,25	0,61	524,61 C
P2	50	3	5	160	1443,1	1481,3	1355,4	1337,2	6,8	1330,09	4,06			1291,10 D
P3	50	1	5	160	546,7			524,6	0,6	524,61	3,73	555,07	0,09	524,61 C
P4	75	5	2	140	843,9		867,8	860,9	7,7	837,94	5,19	884,55	1,76	835,43 C
P5	75	6	5	140	2187,3	2192,5	2141,3	2089,0	5,4	2061,36	7,48	2103,84	2,77	2027,99 C
P6	75	1	10	140	938,2			881,1	3,0	840,30	7,84	786,70	0,27	770,82 D
P7	100	4	2	200	839,2		833,6	832,0	5,5	829,37	7,63	884,72	6,04	826,14 C
P8	100	5	5	200	2151,3	2281,8	2108,3	2075,1	13,5	2054,90	10,70	2129,73	10,11	2034,15 C
P9	100	1	8	200	875,0			829,9	4,6	829,45	10,03	839,76	3,39	826,14 C
P10	100	4	5	200	1674,0	1833,7	1638,5	1633,2	14,7	1629,96	9,68	1705,82	15,84	1595,84 C
P11	126	4	5	235	847,3	878,5	820,3	791,3 ^e	205,4	817,56	14,17	779,73	23,59	775,89 D
P12	163	3	5	140			1312,0	1237,4	11,9	1239,58	18,37	1227,00	97,41	1195,88 C
P13	417	9	7	2000			3638,1	3629,8	33,7	3602,76	59,98	4626,11	2,82	3511,62 C
P14	20	2	4	20				954,8	0,2	954,81	1,15	904,32	0,07	864,06 D
P15	38	2	4	30				1862,6	0,5	1862,63	2,58	1792,14	0,34	1792,14 D
P16	56	2	4	40				2875,2	0,3	2875,24	4,28	2780,30	1,45	2749,68 D
P17	40	4	4	20				1614,4	5,3	1597,75	3,01	1623,47	0,57	1597,75 C
P18	76	4	4	30				3217,7	11,1	3159,22	6,46	3161,84	3,59	3143,23 D
P19	112	4	4	40				4846,5	60,6	4902,64	11,90	4792,15	20,09	4792,15 D
P20	184	4	4	60				8367,4	150,5	8367,40	23,44	8378,77	90,73	8299,71 D
P21	60	6	4	20				2216,1	0,1	2184,04	5,20			2184,04 C ⁺
P22	114	6	4	30				4436,4	13,6	4307,19	11,46			4271,11 C
P23	168	6	4	40				6769,0	70,0	6620,50	19,58			6602,59 C
P24	51	3	6	20				3773,0	3,3	3704,11	4,26			3687,46 C
P25	51	3	6	20				3826,0	0,3	3781,38	4,34			3777,15 C
P26	51	3	6	20				3834,0	1,1	3795,32	4,26			3795,33 C ⁺
P27	102	6	6	20				23401,6	2,0	23017,45	11,31			21956,46 C
P28	102	6	6	20				23105,1	2,9	22569,40	11,13			22934,71 C ⁺
P29	102	6	6	20				24248,2	1,1	24012,92	11,22			22909,36 C ⁺
P30	153	9	6	20				80982,1	4,5	77179,33	20,72			75016,58 C
P31	153	9	6	20				80279,1	5,9	79382,35	20,30			78179,89 C
P32	153	9	6	20				83838,7	3,4	80908,95	20,62			80479,20 C

^a Zeit in Minuten auf einer Sun 4/370.^b Zeit in Minuten auf einer Sun Sparcstation 10.^c Zeit in Minuten auf einem Workstation Cluster mit 4 RISC/6000 Prozessoren.^d Beste bekannte Lösung: C [Cor97], D [Dru01].^e Angegebene Lösung ist unzulässig [Cor97].

+ Bisher beste bekannte Lösung. Eine neue beste Lösung konnte gefunden werden, vgl. Kapitel 8.2.3 und Anhang E.

die Problemcharakteristika und die letzte Spalte (OPT) die Gesamtdistanz der besten bekannten Lösung s^{**} wieder. Die einem Verfahren zugehörigen Spalten sind mit der Bibliotheksreferenz gekennzeichnet. Für die Verfahren von Christofides und Beasley [Chr84], Tan und Beasley [Tan84] und Russell und Gribbin [Rus91] wurde aus Platzgründen auf die Angabe der Rechenzeiten T verzichtet. Die Gesamtdistanz der besten gefundenen Lösung wird mit $c(s)$ bezeichnet. Für Christofides und Beasley [Chr84] sind die Ergebnisse des PTSP-Ersatzverfahrens dargestellt.³⁴ Ein Vergleich der Heuristiken gestaltet sich schwierig, da die einzelnen Algorithmen auf unterschiedlichen Rechnern getestet wurden³⁵ und z.T. nur eine Teilmenge der Testdaten verwendet wurde. Die metaheuristischen Verfahren von Chao, Golden und Wasil [Cha95b], Cordeau, Gendreau und Laporte [Cor97] und Drummond, Ochi und Vianna [Dru01] zeigen sich den einfachen Heuristiken überlegen, wenngleich sie auch tendenziell mehr Zeit zur Lösungsfindung benötigen. Insgesamt scheint das Verfahren von Cordeau, Gendreau und Laporte [Cor97] die derzeit beste Heuristik für diesen Problemtyp darzustellen. Das Verfahren wurde insbesondere auch auf Testproblemen mit Gesamtzeitbeschränkung für die Fahrzeuge³⁶ erfolgreich angewendet und erwies sich auch bei modifizierter Problemstellung³⁷ als robust.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass im Rahmen der vorliegenden Arbeit für vier der 32 Benchmarkprobleme eine neue beste Lösung gefunden werden konnte.³⁸ Die neuen besten Lösungen sind in Anhang E wiedergegeben und die betreffenden Testprobleme in der letzten Spalte von Tabelle 2.2 mit einem „+“ gekennzeichnet.³⁹

³⁴ Die Anzahl der Nachkommastellen entspricht den Angaben in den Originalquellen.

³⁵ Vgl. Drummond, Ochi und Vianna [Dru01] verwenden ein Workstation Cluster mit 4 Prozessoren.

³⁶ Vgl. Kapitel 2.3.1.2.

³⁷ Vgl. z.B. Cordeau, Laporte und Mercier [Cor01a].

³⁸ Vgl. Kapitel 8.2.3.

³⁹ Es gilt zu beachten, dass in der letzten Spalte der Zielfunktionswert der bisher besten bekannten Lösung angegeben ist, wie er von Cordeau, Gendreau und Laporte [Cor97] ermittelt wurde.

2.3.2 Mehrdepot-Tourenplanung (MDVRP)

2.3.2.1 Problembeschreibung inklusive Rekurs auf die PVRP-Formulierung

Beim Mehrdepot-Tourenplanungsproblem (Multi-Depot Vehicle Routing Problem, MDVRP) können die Kunden von mehreren Depots aus bedient werden. Das Standardproblem der Tourenplanung wird dabei um eine zusätzliche Entscheidungsstufe erweitert, nämlich der Zuordnung der Kunden zu den Depots. Es handelt sich daher wie auch beim PVRP um ein *mehrstufiges Tourenplanungsproblem* [Cha93b]. Insbesondere gilt es auch hier die Interdependenz der einzelnen Teilprobleme Zuordnung Kunde-Depot, Zuordnung Kunde-Fahrzeug und Reihenfolgeplanung für die Kunden eines Fahrzeuges zu beachten. Nur falls eine eindeutige Zuordnung Kunde-Depot für alle Kunden vorliegt, kann getrennt für jedes Depot ein VRP gelöst werden.

Auch bei diesem Problemtyp sind mehrere Varianten denkbar. So sind gegebenenfalls für die einzelnen Depots Kapazitätsrestriktionen zu beachten oder eine fixe Kunde-Depot-Zuordnung ist für eine Teilmenge der Kunden a priori gegeben. Die Anzahl an Fahrzeugen je Depot kann, muss aber keiner Beschränkung unterliegen. Falls eine Obergrenze an verfügbaren Fahrzeugen existiert, so kann sich bereits das Auffinden einer zulässigen Lösung schwierig gestalten. Liegt jedoch keine Beschränkung vor, so existiert eine triviale zulässige Lösung, in welcher jeder Kunde von einem anderen Fahrzeug angefahren wird. Kann eine Route auch an einem anderen Depot als dem Ausgangsdepot enden oder andere Depots im Verlauf der Route beinhalten, so spricht man von einem *offenen* MDVRP (OMDVRP). Im Unterschied zur Standort- bzw. kombinierten Standort- und Tourenplanung sind beim MDVRP jedoch Fragen der Öffnung und Schließung einzelner Depots nicht Gegenstand des Entscheidungsproblems.

An dieser Stelle soll ein in der Literatur häufig behandeltes Standard-MDVRP skizziert werden. Hierbei sind d ($d > 1$) Depots vorhanden und jedem Depot fix m homogene Fahrzeuge zugeordnet. Jede Fahrzeugroute muss im gleichen Depot starten und enden und darf keine anderen Depots beinhalten. Ein Mehrfacheinsatz eines Fahrzeuges ist unzulässig. Die Depots

unterliegen keiner Kapazitätsbeschränkung und jeder Kunde kann allen Depots zugeordnet werden. Es gilt einen Tourenplan zu entwickeln, so dass jeder Kunde genau einem Depot und genau einem Fahrzeug zugeordnet ist, die Fahrzeugkapazität und Gesamteinsatzdauer eines Fahrzeuges nicht überschritten wird und die Gesamtdistanz über alle Routen minimiert wird.

Erwähnenswert ist eine Beschreibung dieses Problems durch ein für das PVRP und MDVRP einheitliches lineares Programm, wie es von Cordeau, Gendreau und Laporte [Cor97] vorgestellt wurde. Die Autoren bilden die MDVRP-Problemstellung durch das für das PVRP in Kapitel 2.3.1.1 vorgestellte lineare Programm ab, indem die Depots mit den Tagen des Planungshorizonts assoziiert werden, d.h. es gilt $d = t$. Weiterhin habe jeder Kunde i ($i = 1, \dots, n$) eine Bedienfrequenz $e_i = 1$ und die Menge $C_i = \{\{1\}, \{2\}, \dots, \{t\}\}$ an zulässigen Bedienmustern. Letzteres bedeutet, dass jeder Kunde genau einem Depot (respektive Tag) zugewiesen werden muss. Die Kosten c_{ij}^{ks} seien die Fahrtkosten von Knoten i zu Knoten j ($i, j = 0, \dots, n$) mit Fahrzeug k ($k = 1, \dots, m$) ausgehend von Depot s ($s = 1, \dots, t$). Wie von Cordeau und Laporte [Cor01b] gezeigt, lässt sich auch das SDVRP durch dieses lineare Programm abbilden.

2.3.2.2 Benchmarkprobleme

Für das MDVRP existieren 23 klassische Testprobleme⁴⁰, bezeichnet als MD1 bis MD23. Die Probleme MD1 bis MD11 stammen von Gillett und Johnson [Gil76] und ihnen liegen Ein-Depot-Probleme von Christofides und Eilon [Chr69] und Gillett und Miller [Gil74] zugrunde.⁴¹ Die Benchmarkprobleme MD12 bis MD23 wurden von Chao, Golden und Wasil [Cha93b] bzw. Chao [Cha93a] vorgeschlagen. Die Charakteristika der einzelnen Datensätze können der Tabelle 2.4 auf Seite 41 entnommen werden. Die Probleme enthalten zwischen 50 und 360 Kunden, zwei bis neun Depots und eine unbeschränkte Anzahl homogener Fahrzeuge je Depot. Von 23 Testdatensätzen enthalten zwölf ein Limit für die Gesamteinsatzdauer eines Fahrzeuges. Bei diesen Da-

⁴⁰ Die Datensätze sind beziehbar über das Internet unter

<http://www.hec.ca/chairedistributique/data/> (Abruf am 7.10.2003).

⁴¹ In den Testdatensätzen MD8 bis MD11 sind die Original-Koordinaten von Kunde 245 auf (70, -80) zu ändern [Cha93a, S. 110].

tensätzen stimmen die Fahrtzeiten mit den Entfernungen überein und die Kunden haben keine Bedienzeiten.⁴²

Beispielhaft ist der beste bekannte Tourenplan zu Testproblem MD10 mit vier Depots (graue Punkte), 249 Kunden (schwarze Punkte) und Gesamtdistanz 3655,18 in Abbildung 2.3 dargestellt. Details hierzu sind Anhang D zu entnehmen.

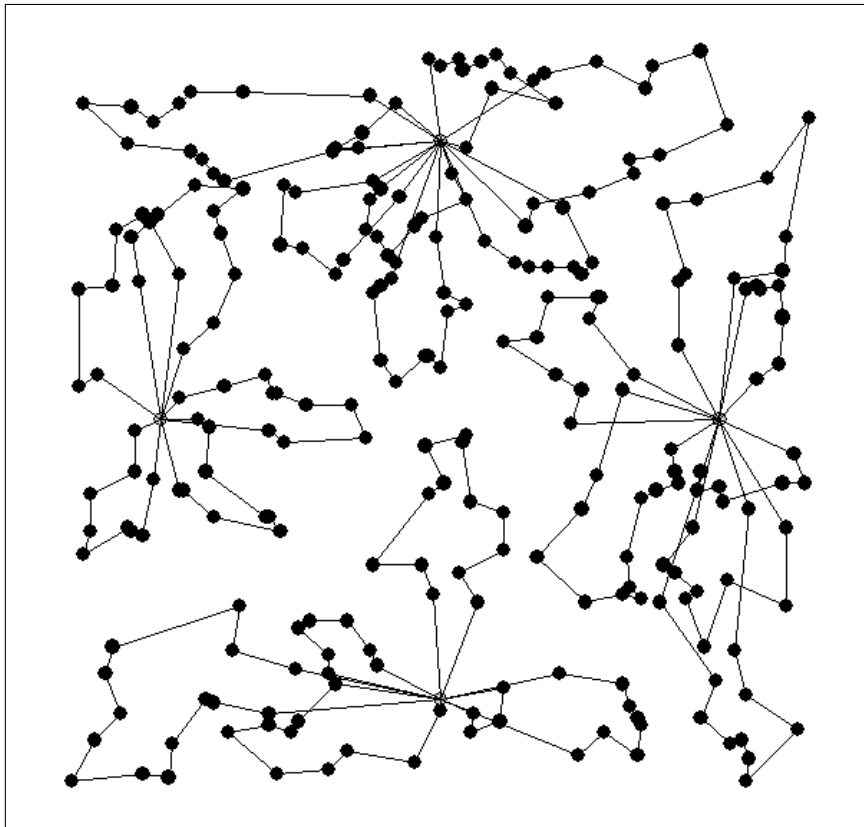


Abbildung 2.3: Beste bekannte Lösung zu MDVRP-Testproblem MD10

Weitere MDVRP-Testprobleme stammen von Cordeau, Gendreau und Laporte [Cor97]⁴³. Sie enthalten zwischen vier und sechs Depots, 48 und 288 Kunden und zwei bis zwölf Fahrzeuge je Depot. Jeder Datensatz hat ein Li-

⁴² Cordeau, Gendreau und Laporte [Cor97] setzen eine Obergrenze für die Anzahl an Fahrzeugen je Depot. Die von den Autoren verwendeten Werte können den Datensätzen im Internet unter <http://www.hec.ca/chairedistributique/data/> (Abruf am 7.10.2003) entnommen werden.

⁴³ Die Datensätze sind beziehbar über das Internet unter <http://www.hec.ca/chairedistributique/data/> (Abruf am 7.10.2003).

mit für die maximale Gesamteinsatzzeit eines Fahrzeuges. Außer der von den Autoren vorgestellten Heuristik wurde bis dato kein weiteres Verfahren auf diesen Problemen getestet.

2.3.2.3 Literaturüberblick

Zur Lösung von Mehrdepot-Tourenplanungsproblemen sind in der Literatur eine Vielzahl an Arbeiten zu finden. Wohingegen sich die ersten MDVRP-Studien primär auf Lösungsverfahren für das Standard-MDVRP konzentrierten, gewann das MDVRP mit zusätzlichen Nebenbedingungen in den letzten Jahren verstärkt an Interesse. Beispiele hierfür sind eine Erweiterung um Zeitfenster (Cordeau, Laporte und Mercier [Cor01a, Cor03a], Polacek et al. [Pol03], Engeler [Eng02] und Rich [Ric99]), einem periodischen Planungshorizont (Yang und Chu [Yan00] und Hadjiconstantinou und Baldacci [Had98]), Pickup and Deliveries (Irnich [Irn00] und Rego und Roucairol [Reg95]) oder einem heterogenen Fuhrpark (Sahli und Sari [Sal97b]).

Tabelle 2.3 gibt einen Überblick über Arbeiten zum MDVRP und zu verschiedenen Erweiterungen. Es sei darauf hingewiesen, dass die Tabelle aufgrund der Vielzahl an in der Literatur bekannten Studien zum MDVRP keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben kann. Beispielsweise enthalten kombinierte Standort- und Tourenplanungsprobleme⁴⁴ (Location-Routing Probleme) das MDVRP als Subproblem und können auf das MDVRP reduziert werden, soweit die geöffneten Standorte (Depots) bekannt sind. In den meisten Heuristiken für diesen Problemtyp kommen daher auch MDVRP-Verfahren zum Einsatz. Location-Routing Probleme werden an dieser Stelle nicht weiter betrachtet. Für Lösungsansätze zu dieser Problemstellung wird verwiesen auf Laporte [Lap88a], Min, Jayaraman und Srivastava [Min98], Bruns [Bru98], Klose [Klo01] und Ghiani und Laporte [Ghi01]. Die Problemstellung des MDVRP kann weiterhin auch bei Anwendungen vorkommen, welche auf den ersten Blick nicht direkt mit Problemen der Tourenplanung in Verbindung gebracht werden, wie z.B. der Optimierung von Bestückungsautomaten⁴⁵ (Printed Circuit Board Manufacturing). Die Berücksichtigung die-

⁴⁴ Vgl. Kapitel 2.2.1.

⁴⁵ Vgl. Crama, van de Klundert und Spieksma [Cra02] und Kazaz und Altinkemer [Kaz03].

Tabelle 2.3: Arbeiten zur Mehrdepot-Tourenplanung

Jahr	Autor(en)	Referenz	Anmerkung ^a
1969	Tillman	[Til69]	(S)
1971	Tillman und Hering	[Til71]	(S)
1972	Tillman und Cain	[Til72]	(S)
1972	Wren und Holliday	[Wre72]	(S)
1972	Cassidy und Bennett	[Cas72]	(A) Lebensmitteldistribution
1975	Ashour und Bhatt	[Ash75]	(S)
1976	Gillett und Johnson	[Gil76]	(S)
1977	Golden, Magnanti und Nguyen	[Gol77]	(S)
1978	Matthäus	[Mat78]	(S)
1978	Nagel	[Nag78]	(S)
1981	Paessens	[Pae81]	(S)
1982	Raft	[Raf82]	(S,E) u.a. Mehrfacheinsatz
1983	Weuthen	[Weu83]	(S)
1983	Ball et al.	[Bal83]	(A) Distribution chem. Produkte
1984	Laporte, Nobert und Arpin	[Lap84]	(E) Fahrzeuganzahl beschränkt
1984	Hellmann	[Hel84]	(S)
1987	Perl	[Per87]	(E) Depotkapazität
1987	Esswein	[Ess87]	(E) spezielles OMDVRP
1988	Laporte, Nobert und Taillefer	[Lap88b]	(S,E) Location Routing
1990	Li und Simchi-Levi	[Li90]	(S) Worst Case Analyse
1992	Min, Current und Schilling	[Min92]	(E) Backhauls
1993	Chao, Golden und Wasil	[Cha93b]	(S)
1995	Rego und Roucairol	[Reg95]	(A) Pickup and Delivery
1995	Sumichrast und Markham	[Sum95]	(E) OMDVRP
1996	Renaud, Laporte und Boctor	[Ren96a]	(S)
1997	Cordeau, Gendreau und Laporte	[Cor97]	(S)
1997	Salhi, Thangiah und Rahman	[Sal97a]	(E) Minimierung der Fahrzeuge
1997	Sahli und Sari	[Sal97b]	(S,E) Heterogener Fuhrpark
1998	Hadjiconstantinou und Baldacci	[Had98]	(E,A) Periodisch, Personaleinsatz
1999	Salhi und Nagy	[Sal99]	(E) Auslieferung mit Rückfuhr
1999	Rich	[Ric99]	(E) Zeitfenster, Mittagspause
2000	Irnich	[Irn00]	(E) Pickup and Delivery
2000	Yang und Chu	[Yan00]	(E) Periodisch
2000	Amberg, Domschke und Voss	[Amb00]	(E) Kantenorientiert
2001	Cordeau, Laporte und Mercier	[Cor01a]	(E) Zeitfenster
2001	Thangiah und Salhi	[Tha01]	(E) Minimierung der Fahrzeuge
2002	Giosa, Tansini und Viera	[Gio02]	(E) Depotzuordnung, Zeitfenster
2002	Engeler	[Eng02]	(E) Zeitfenster
2002	Tarantilis und Kiranoudis	[Tar02a]	(A) OMDVRP
2003	Tansini, Urquhart und Viera	[Tan03]	(E) Depotzuordnung
2003	Polacek et al.	[Pol03]	(E) Zeitfenster
2003	Cordeau, Laporte und Mercier	[Cor03a]	(E) Zeitfenster

^a (S) Standard-MDVRP, (E) Erweiterung, (A) Anwendung.

ser Problemstellung sowie weiterer potenzieller Einsatzgebiete steht jedoch nicht im Fokus dieser Arbeit und wird hier ebenfalls aus der Betrachtung ausgeklammert.

Heuristische Lösungsansätze zum MDVRP lassen sich untergliedern in einstufige und zweistufige Verfahren sowie Verbesserungsverfahren.

Die einstufigen bzw. simultanen Verfahren basieren zumeist auf dem Savingsgedanken des von Clarke und Wright [Cla64] für das VRP konzipierten Savings-Algorithmus⁴⁶. Es wird davon ausgegangen, dass zunächst jeder Kunde einzeln vom nächstgelegenen Depot aus angefahren wird. Anschließend werden jeweils zwei Routen, soweit dies zulässig ist, miteinander verbunden und die neue Route einem Depot zugeordnet, solange dabei eine Verbesserung (Savings) des Tourenplans erzielt wird. Die Reihenfolge der Routen-Verschmelzung orientiert sich an der Höhe des Savings, wobei auch die Entfernung zu den Depots berücksichtigt werden kann. Die ersten Verfahren dieser Art stammen von Tillman [Til69], Tillman und Hering [Til71], Tillman und Cain [Til72], Golden, Magnanti und Nguyen [Gol77] und Matthäus [Mat78].

Bei den zweistufigen Verfahren wird in einer ersten Stufe eine Zuordnung der Kunden zu den Depots vorgenommen und in einer zweiten Stufe die entsprechenden Ein-Depot-Probleme gelöst. Das Verfahren von Gillet und Johnson [Gil76] oder das Verfahren von Ashour und Bhatt⁴⁷ [Ash75] nutzen diese Vorgehensweise.

Ausgehend von einem existierenden Tourenplan können durch Austausch von Kunden zwischen den Touren des gleichen, aber auch unterschiedlicher Depots, Verbesserungen generiert werden. Die Verfahren von Wren und Holliday [Wre72], Gillett und Johnson [Gil76] und Nagel [Nag78] enthalten beispielsweise solche Verbesserungsschritte.

Eine umfassende Übersicht über die genannten (klassischen) Heuristiken zum MDVRP findet sich bei Matthäus [Mat78], Esswein [Ess87], Chao, Golden und Wasil [Cha93b] und Renaud, Laporte und Boctor [Ren96a].

⁴⁶ Vgl. Kapitel 3.2.1.

⁴⁷ Die Originalschrift von Ashour und Bhatt ist unveröffentlicht. Eine Darstellung des Verfahrens findet sich bei Matthäus [Mat78, S. 203-205].

Neuere heuristische Ansätze zum Standard-MDVRP stammen von Chao, Golden und Wasil [Cha93b], Renaud, Laporte und Boctor [Ren96a], Cordeau, Gendreau und Laporte [Cor97] und Sahli und Sari [Sal97b]. Für eine Beschreibung der Verfahren von Renaud, Laporte und Boctor [Ren96a] und Cordeau, Gendreau und Laporte [Cor97] wird auf Kapitel 4.2.6 bzw. 4.2.10 verwiesen. Sie verwenden jeweils eine Tabusuche-Metaheuristik zur Lösung des MDVRP. Die Verfahren von Chao, Golden und Wasil [Cha93b] und Sahli und Sari [Sal97b] sollen im Folgenden genauer betrachtet werden:

Chao, Golden und Wasil [Cha93b] ordnen zunächst die Kunden den nächstgelegenen Depots zu und lösen danach für jedes Depot ein VRP mittels des modifizierten Savings-Algorithmus von Golden, Magnanti und Nguyen [Gol77]. Diese Lösung wird anschließend weiter verbessert, wobei jeweils ein Kunde in eine andere Route des gleichen oder eines anderen Depots verschoben wird. Das Verbesserungsverfahren basiert hierbei auf dem Record-To-Record-Verfahren von Dueck [Due93], das im Verlauf der Suche auch Verschlechterungen bis zu einer gewissen Toleranzschwelle zulässt, wodurch das Überwinden lokaler Optima möglich ist.⁴⁸ Das Verfahren beinhaltet weiterhin intensivierende, routenverbessernde Schritte sowie diversifizierende Reinitialisierungsphasen.

Sahli und Sari [Sal97b] stellen eine dreistufige Heuristik zur Lösung des Standard-MDVRP und des MDVRP bei heterogenem Fuhrpark vor. Jede Stufe übernimmt dabei die beste Lösung der Vorstufe als Ausgangslösung. Auf Stufe 1 wird eine initiale MDVRP-Lösung konstruiert, indem ein Teil der Kunden dem jeweils nächstgelegenen Depot zugeordnet werden und ein VRP⁴⁹ für jedes Depot gelöst wird. Die verbleibenden Kunden (sog. „borderline customers“) werden nach einem Opportunitätskosten-basierten Auswahlkriterium in die vorhandenen Routen eingefügt. Auf Stufe 2 wird auf jedes Depot getrennt eine Verbesserungsheuristik angewendet. Zur Lösungsverbesserung nutzen die Autoren eine Vielzahl an Austausch- und Verschiebeoperatoren, die einen Teil der Kunden in andere Routen verschieben, solange

⁴⁸ Um einem Zyklus im Suchverlauf entgegen zu wirken, wird die erste gefundene Verbesserung sofort umgesetzt (First Best Accept-Strategie) und Reinitialisierungen durchgeführt. Vgl. auch Jacobi [Jac99, S. 46].

⁴⁹ Die Darstellung bezieht sich auf das Standard-MDVRP. Eine analoge Heuristik wird bei heterogenem Fuhrpark verwendet.

dabei eine Verbesserung erzielt werden kann. Insbesondere die große Anzahl an möglichen Transformationsschritten (Nachbarschaften) ermöglicht es, eine im Vergleich zu einfacheren Heuristiken sehr gute Lösung zu generieren.⁵⁰ Kann keine weitere Verbesserung erreicht werden, tritt Stufe 3 in Kraft, in der alle Depots simultan betrachtet werden und die analog zu Stufe 2 abläuft. Wurde Stufe 3 beendet, erfolgt ein neuer Durchlauf beginnend mit Stufe 1. Pro Durchlauf wird die Anzahl der *borderline customers* in Stufe 1 verkleinert. Ausgefeilte Implementierungstechniken und weitere heuristische Reduktionsstrategien können das Verfahren deutlich beschleunigen (vgl. Sahli und Sari [Sal97b, S. 102]).

Es sei an dieser Stelle noch auf das genetische Clusterverfahren von Than-giah und Salhi [Tha01] hingewiesen, das primär die Anzahl der Fahrzeuge und zweitrangig die Gesamtdistanz minimiert. Das Verfahren scheint sehr gute Ergebnisse zu liefern, kann jedoch aufgrund der unterschiedlichen Zielfunktion nur eingeschränkt mit den anderen Verfahren verglichen werden, weswegen es hier nicht weiter behandelt wird.

Ein Vergleich der Verfahren von Chao, Golden und Wasil [Cha93b], Renaud, Laporte und Boctor [Ren96a], Cordeau, Gendreau und Laporte [Cor97] und Sahli und Sari [Sal97b] erfolgt in Tabelle 2.4 anhand der 23 klassischen MDVRP-Benchmarkprobleme⁵¹. Die ersten Spalten geben die Problemcharakteristika und die letzte Spalte (OPT) die Gesamtdistanz der besten bekannten Lösung s^{**} wieder. Die einem Verfahren zugehörigen Spalten sind mit der Bibliotheksreferenz gekennzeichnet. Für jedes Verfahren und Testproblem wird die Gesamtdistanz $c(s)$ der besten gefunden Lösung und die zur Lösung aufgewendete Zeitdauer T (in Minuten) angegeben⁵². Die drei metaheuristischen Verfahren von Chao, Golden und Wasil [Cha93b], Renaud, Laporte und Boctor [Ren96a] und Cordeau, Gendreau und Laporte [Cor97] liefern durchwegs eine deutlich bessere Lösung im Vergleich zu einfacheren

⁵⁰ Da ein lokales Optimum bezüglich einer bestimmten Nachbarschaft kein lokales Optimum bezüglich einer anderen Nachbarschaft sein muss, ist das Überwinden lokaler Optima bzgl. einer der verwendeten Nachbarschaften solange möglich, solange die vorliegende Lösung kein lokales Optimum für alle der verwendeten Nachbarschaften darstellt, vgl. Kapitel 4.1.1.

⁵¹ Vgl. Kapitel 2.3.2.2.

⁵² Die Anzahl der Nachkommastellen entspricht den Angaben in den Originalquellen.

Tabelle 2.4: Vergleich ausgewählter MDVRP-Verfahren

ID	n	d	D	Q	[Cha93b]		[Ren96a]		[Cor97]		[Sal97b]		OPT ^d c(s ^{**})
					c(s)	T ^a	c(s)	T ^b	c(s)	T ^b	c(s)	T ^c	
MD1	50	4	∞	80	582,4	1,1	576,87	3,2	576,87	3,24	587,8	<0,1	576,87 C
MD2	50	4	∞	160	476,6	1,2	476,66	4,8	473,87	3,46	484,6	<0,1	463,15 T
MD3	75	2	∞	140	641,2	1,8	645,14	5,8	645,15	5,66	645,9	0,1	641,19 C
MD4	100	2	∞	100	1026,9	2,2	1016,13	11,4	1006,66	7,79	1047,9	1,3	1001,47 C ⁺
MD5	100	2	∞	200	756,6	2,4	754,2	12,8	753,34	8,21	777,20	0,3	750,03 C
MD6	100	3	∞	100	883,6	2,1	876,5	8,4	877,84	7,65	888,60	0,3	876,50 C
MD7	100	4	∞	100	898,5	4,8	897,86	6,8	891,95	7,71	918,9	1,9	885,80 C ⁺
MD8	249	2	310	500	4511,6	24,1	4500,48	69,4	4482,44	25,43	4511,6	14,1	4437,68 C ⁺
MD9	249	3	310	500	3950,9	20,9	3969,31	41,2	3920,85	26,73	4005,3	7,1	3900,22 C ⁺
MD10	249	4	310	500	3815,6	7,2	3720,88	43,0	3714,65	25,50	3824,7	4,5	3663,02 C ⁺
MD11	249	5	310	500	3733,0	16,7	3670,25	36,4	3580,84	25,91	3714,3	4,1	3554,18 C
MD12	80	2	∞	60	1327,3	2,8	1318,95	5,4	1318,95	5,57	1326,8	0,3	1318,95 C
MD13	80	2	200	60	1345,9	0,7	1318,95	4,8	1318,95	5,58	1318,9	0,3	1318,95 C
MD14	80	2	180	60	1372,5	1,3	1365,69	2,6	1360,12	5,44	1360,1	0,3	1360,12 C
MD15	160	4	∞	60	2610,3	2,3	2551,46	15,5	2534,13	14,06	2586,7	1,1	2505,42 C
MD16	160	4	200	60	2605,3	6,1	2572,23	11,1	2572,23	14,05	2584,5	1,1	2572,23 C
MD17	160	4	180	60	2816,6	6,5	2731,37	5,8	2720,23	13,70	2720,2	0,7	2709,09 C
MD18	240	6	∞	60	3877,4	8,6	3789,96	23,2	3710,49	24,85	3853,3	1,9	3702,85 C ⁺
MD19	240	6	200	60	3863,9	22,3	3827,06	22,0	3827,06	25,20	3867,9	1,9	3827,06 C
MD20	240	6	180	60	4272,0	14,6	4097,06	10,0	4058,07	24,72	4074,8	1,4	4058,07 C
MD21	360	9	∞	60	5791,5	78,5	5678,50	48,7	5535,99	48,16	5788,5	3,6	5474,84 C
MD22	360	9	200	60	5857,4	132,4	5718,00	33,5	5716,01	48,90	5742,6	3,7	5702,16 C
MD23	360	9	180	60	6494,6	24,4	6145,58	17,3	6139,73	47,86	6106,6	3,3	6095,46 C

^a Zeit in Minuten auf einer Sun 4/370.^b Zeit in Minuten auf einer Sun Sparcstation 10.^c Zeit in Minuten auf einer VAX 4000-500.^d Beste bekannte Lösung (bzgl. Gesamtdistanz): C [Cor97], T [Tha01].

+ Bisher beste bekannte Lösung. Eine neue beste Lösung konnte gefunden werden, vgl. Kapitel 8.2.2 und Anhang D.

ein- oder zweistufigen Heuristiken, benötigen dafür aber z.T. deutlich längere Rechenzeiten. Die im Durchschnitt besten Ergebnisse konnte das Verfahren von Cordeau, Gendreau und Laporte [Cor97] erzielen, mit dem fast alle besten bekannten Lösungen (bzgl. Gesamtdistanz) ermittelt werden konnten. Ein Vergleich der Rechenzeiten ist auch hier aufgrund der unterschiedlichen Testumgebungen nur schwer möglich. Es scheint jedoch, als würde das Verfahren von Cordeau, Gendreau und Laporte [Cor97] die längste Rechenzeit in Anspruch nehmen. Das mehrstufige Verbesserungsverfahren von Sahli und Sari [Sal97b] stellt einen guten Kompromiss zwischen Lösungsqualität und Rechenzeit dar und könnte aufgrund der relativ kurzen Rechenzeiten auch in metaheuristische Verfahren integriert werden [Sal97b, S. 111].

Es sei darauf hingewiesen, dass im Rahmen der vorliegenden Arbeit für sechs der 23 Benchmarkprobleme eine neue beste Lösung gefunden werden konnte.⁵³ Die neuen besten Lösungen sind in Anhang D wiedergegeben und die betreffenden Testprobleme in der letzten Spalte von Tabelle 2.4 mit einem „+“ gekennzeichnet.⁵⁴

2.3.3 Tourenplanung bei restringierendem Anhänger-einsatz (TTRP)

2.3.3.1 Problembeschreibung inklusive neuer mathematischer Formulierung

Ein in der Literatur nur unzureichend behandelter, in der Praxis jedoch wichtiger Gesichtspunkt ist der Einsatz von Anhängern bei der Tourenplanung. Das Tourenplanungsproblem bei restringierendem Anhängereinsatz (Truck and Trailer Routing Problem, TTRP) widmet sich diesem Aspekt. Nachfolgend soll das Modell von Chao [Cha02] skizziert werden, das als Standardproblem für Tourenplanungsprobleme bei restringierendem Anhängereinsatz betrachtet werden kann.

⁵³ Vgl. Kapitel 8.2.2.

⁵⁴ Es gilt zu beachten, dass für diese Probleme der Zielfunktionswert der bisher besten bekannten Lösung angegeben ist, wie er von Cordeau, Gendreau und Laporte [Cor97] ermittelt wurde.

Beim TTRP wird von einem m Zugfahrzeuge umfassenden Fuhrpark bestehend aus m_1 Zugfahrzeugen mit Anhängern und $m - m_1$ Zugfahrzeugen ohne Anhänger ausgegangen ($1 \leq m_1 \leq m$). Ein Zugfahrzeug mit Anhänger wird als *Complete Vehicle* und ein Zugfahrzeug ohne Anhänger als *Pure Truck* bezeichnet. Zugfahrzeuge sowie Anhänger werden als homogen angenommen. Sei Q^Z die Zugfahrzeugkapazität und Q^A die Anhängerkapazität, so ergibt sich die Gesamtkapazität eines Complete Vehicles entsprechend als $Q^Z + Q^A$ bzw. die eines Pure Trucks als Q^Z . Es wird weiterhin vereinfachend angenommen, dass die Fahrtkosten⁵⁵ (bzw. variablen Kosten) für alle Fahrzeuge gleich sind, d.h. unabhängig davon, ob ein Anhänger mitgeführt wird oder nicht. Fixkosten der Fahrzeuge werden vernachlässigt und eine optimale Einplanung eines existierenden Fuhrparks betrachtet. Jedem Kunden i ist eine nichtnegative Nachfragemenge q_i und Servicezeit d_i sowie ein eindeutiger Kundentyp zugeordnet. Das TTRP betrachtet hierbei zwei Ausprägungsformen für die Kundentypen: ein Kunde wird als *Vehicle Customer* (VC) bezeichnet, falls er sowohl mit als auch ohne Anhänger anfahrbar ist und als *Truck Customer* (TC), falls er zwingend ohne Anhänger angefahren werden muss. Beispiele für TC-Kunden sind Kunden im innerstädtischen Bereich, in bergigen Gegenden oder an Stellen, an denen ein Wenden oder eine Zufahrt mit Anhänger nicht möglich ist. Für den Fall, dass alle Kunden den Kundentyp TC zugeordnet haben, kann das entsprechende Tourenplanungsproblem als VRP gelöst werden, wobei der Einsatz von Anhängern komplett entfällt. Gleiches gilt, falls alle Kunden vom Typ VC sind.⁵⁶ In letzterem Fall ist die Einplanung eines Fahrzeuges mit angekoppeltem Anhänger zu bevorzugen, da dadurch eine größere Gesamtkapazität zur Verfügung steht. Ein An- und Abkoppeln des Anhängers ist dabei jedoch nicht notwendig (da keine TC-Kunden vorhanden sind) und würde tendenziell nur zu einer Erhöhung der Gesamtdistanz führen. Treten jedoch -wie in der Realität häufig anzutreffen- beide Kundentypen auf, so muss bei der Gestaltung der Routen für Complete Vehicles ein An- und Abkoppeln der Anhänger an gegebenen Parkplätzen berücksichtigt werden. Ein Complete Vehicle kann z.B. eine Route mit angekoppeltem Anhänger vom Depot aus beginnen und im Anschluss eine Reihe von VC-

⁵⁵ Distanzen und Fahrtzeiten werden hierbei als proportional angenommen.

⁵⁶ Falls gilt $m_1 < m$ muss ein Tourenplanungsproblem mit heterogenen Fahrzeugen betrachtet werden, da ein Teil der Fahrzeuge Anhänger mitführt.

Kunden bedienen. Dieser Teil der *Complete Vehicle Route* (CVR), bei dem ein Anhänger angekoppelt ist, wird als *Maintour* bezeichnet.⁵⁷ Eine CVR-Maintour stellt eine Rundreise mit Beginn und Ende im Depot dar, auf der jedoch ausschließlich VC-Kunden bedient werden können. Im Verlauf einer CVR ist es aber weiter möglich, dass das Fahrzeug den Anhänger an einem Parkplatz abstellt und von dort aus eine sog. *Subtour* fährt. Auf einer Subtour können sowohl VC- als auch TC-Kunden angefahren werden, da dabei kein Anhänger mitgeführt wird. Subtouren beginnen und enden am Parkplatz des Anhängers, um diesen für eine Weiterfahrt auf der Maintour wieder aufzunehmen. Besonders hervorzuheben gilt es, dass es keine Beschränkung für die Anzahl an Subtouren einer CVR gibt. Eine CVR kann daher aus genau einer Maintour⁵⁸ und keiner, einer oder beliebig vielen Subtouren bestehen. Insgesamt darf die auf einer CVR gesammelte⁵⁹ Menge die Gesamtkapazität $Q^Z + Q^A$ des Complete Vehicles nicht übersteigen. Ebenso darf die Zugfahrzeugkapazität Q^Z auf einer Subtour nicht überschritten werden. Es wird dabei davon ausgegangen, dass das Umladen von Ladung vom Zugfahrzeug auf den Anhänger⁶⁰ möglich ist und es sich um homogene Güter, wie z.B. Flüssigkeiten, handelt. Im Gegensatz zu Complete Vehicles können Pure Trucks stets beide Kundentypen bedienen, da die Fahrzeuge keinen Anhänger besitzen. Die zugehörige Route wird als *Pure Truck Route* (PTR) bezeichnet und stellt eine (einfache) Rundreise mit Beginn und Ende im Depot dar. Eine PTR enthält keine Subtouren und ist durch die Zugfahrzeugkapazität Q^Z limitiert. Es sei darauf hingewiesen, dass Chao [Cha02] explizit einen dritten Routentyp, genannt Pure Vehicle Route, definiert. Dieser Typ ist jedoch ein Spezialfall einer CVR, bei dem keine Subtouren vorkommen.

Der Start- und Endknoten einer Tour wird als *Root* (Wurzel) dieser Tour bezeichnet. Der Root einer CVR-Maintour und einer PTR ist stets das Depot. Für Subtouren einer CVR ist der Root der entsprechende Parkplatz, von

⁵⁷ Vgl. Kapitel 2.1.1 für die Definition der Begriffe Tour und Route im Rahmen dieser Arbeit.

⁵⁸ Eine Maintour enthält stets das Depot an erster und letzter Position der Rundreise. Sie gilt als leer, falls keine VC-Kunden enthalten sind.

⁵⁹ Die Darstellung erfolgt für ein Sammelproblem. Bei Lieferproblemen gelten die Aussagen analog.

⁶⁰ Bzw. vom Anhänger auf das Zugfahrzeug für den Fall eines Lieferproblems.

dem die Subtour ausgeht. Dem Modell von Chao [Cha02] folgend kann jeder VC-Kunde und das Depot als Parkplatz gewählt werden. Die Mehrfachnutzung eines VC-Kunden als Parkplatz in *verschiedenen* Routen wird ausgeschlossen. Ein Parkplatz kann jedoch als Ausgangspunkt für mehrere (zeitlich direkt aufeinander folgende) Subtours der *gleichen* CVR genutzt werden. Der entsprechende VC-Kunde selbst wird dabei einmalig in der Maintour der CVR eingeplant. Es ist genau ein Depot vorhanden, welches Bestandteil jeder Route ist und stets als Parkplatz zur Verfügung steht. Der Planungshorizont umfasst genau einen Tag und ein Fahrzeug kann genau eine Route fahren. Eine exemplarische CVR-Route ist in Abbildung 2.4 dargestellt. Sie umfasst eine Maintour und zwei Subtours.

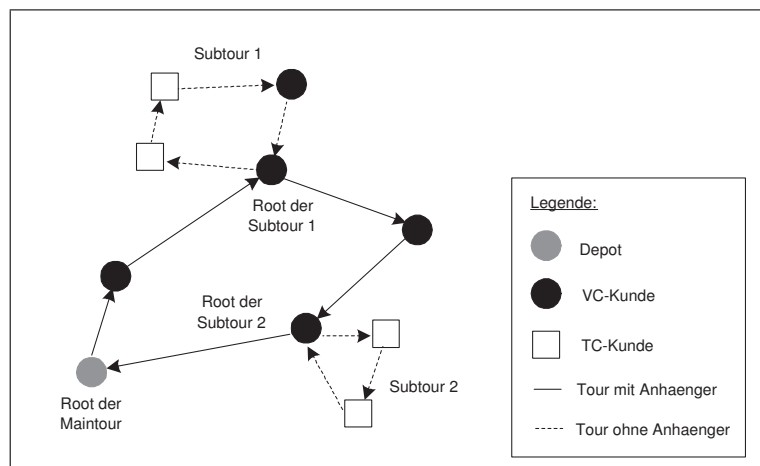


Abbildung 2.4: Exemplarische CVR-Route

Die Zielsetzung des TTRP besteht nun darin, unter Einhaltung der oben genannten Restriktionen einen Tourenplan zu finden, der die zurückgelegte Gesamtentfernung (über alle Touren aller Fahrzeuge) minimiert. Die Problemstellung erweitert das VRP insbesondere um die zusätzliche Bestimmung der optimalen Anzahl an Subtours pro Route, die Ermittlung der zugehörigen Parkplätze für die Anhänger und die Zuordnung der Kunden zu Touren, in denen sie zulässig angefahren werden können.

Um eine präzise Beschreibung des TTRP zu geben, wurde ein neues mathematisches Modell entwickelt. Das TTRP-Modell weicht von der Formulierung

des „Partial Accessibility Constrained VRP“ von Semet [Sem95] v.a. dahingehend ab, dass mehrere Subtouren pro Root möglich sind und vom Depot mehrere Touren je Route ausgehen können.⁶¹

Folgende Notation wird verwendet:

$G = (N, A)$ sei ein gerichteter, gewichteter Graph mit

$N = N_1 \cup N_2$ Knoten, wobei

$N_1 = \{0, 1, \dots, n_1\}$ die Menge der VC-Kunden $(1, \dots, n_1)$ einschließlich des Depots repräsentiere und das Depot als Kunde 0 bezeichnet wird.

$N_2 = \{n_1 + 1, \dots, n\}$ die Menge der TC-Kunden repräsentiere.

$N_1^* = N_1 \setminus \{0\}$ und $N^* = N \setminus \{0\}$.

$A = \{(i, j) \mid i, j \in N; i \neq j\}$ Kanten für alle möglichen Verbindungen zwischen zwei Knoten.

$C = (c_{ij})$ sei eine Kostenmatrix für die Kantengewichte. Hierbei seien c_{ij} die für alle Fahrzeuge einheitlichen Fahrtkosten von Knoten i zu Knoten j , für alle $(i, j) \in A$. Die Dreiecksungleichung sei stets erfüllt: $c_{ij} + c_{jl} \geq c_{il} \forall i, j, l \in N$.

$K = K_1 \cup K_2$ repräsentiere den verfügbaren Fuhrpark, mit

$K_1 = \{1, \dots, m_1\}$ sei die Menge an Zugfahrzeugen mit Anhänger und

$K_2 = \{m_1 + 1, \dots, m\}$ sei die Menge an Zugfahrzeugen ohne Anhänger.⁶²

$Q^Z \geq 0$ sei die Kapazität eines Zugfahrzeuges und

$Q^A \geq 0$ sei die Kapazität eines Anhängers.

$D \geq 0$ sei die maximale Gesamteinsatzdauer eines Fahrzeuges.

$q_i > 0$ sei die Angebots- bzw. Nachfragemenge von Kunde $i \in N^*$.

$d_i \geq 0$ sei die benötigte Servicezeit für Kunde bzw. Depot $i \in N$.

⁶¹ Dies erfordert u.a. die Aufnahme einer weiteren Indexvariablen v .

⁶² Existieren keine Fahrzeuge ohne Anhänger, so ist im Rahmen dieses Modells ein künstliches Fahrzeug mit $Q^Z = 0$ in K_2 aufzunehmen, um die Variablendefinition zu gewährleisten ($|K_1|, |K_2| \geq 1$). Analog für Fahrzeuge mit Anhänger.

Die Entscheidungsvariablen werden wie folgt definiert:

Es sei x_{ij}^k eine Binärvariable für die Angabe, ob Fahrzeug $k \in K_1$ mit angekoppeltem Anhänger direkt von Kunde $i \in N_1$ zu Kunde $j \in N_1$ fährt ($x_{ij}^k = 1$) oder nicht ($x_{ij}^k = 0$). Mit Hilfe dieser Variablen werden die Maintouren von CVR-Routen beschrieben und die Variablen sind daher nur für auf Maintouren zugängliche VC-Kunden einschließlich des Depots, also Kunden in N_1 definiert. Weiterhin sei y_{ij}^{klv} eine Binärvariable die angibt, ob Fahrzeug $k \in K$ ohne Anhänger von Kunde $i \in N$ zu Kunde $j \in N$ auf der von Root-Kandidat $l \in N_1$ ausgehenden v -ten ($v = 1, \dots, n$) Subtour fährt ($y_{ij}^{klv} = 1$) oder nicht ($y_{ij}^{klv} = 0$). Für $l = 0$ ist die zugehörige Tour eine Subtour einer CVR mit Root gleich Depot ($k \in K_1$) oder eine PTR-Route ($k \in K_2$). Für $l \in N_1^*$ ist der Root ein VC-Kunde, was jedoch nur bei CVR-Routen, also den Routen der Fahrzeuge $k \in K_1$, sein kann. Auf Touren ohne Anhänger sind alle Kunden in N zugänglich. Um den Sachverhalt abbilden zu können, dass für CVR-Routen beliebig viele, jedoch maximal so viele Subtouren wie Kunden n von einem Root-Kandidaten $l \in N_1$ ausgehen können, werden für jeden Root-Kandidaten $l \in N_1$ genau n Subtouren⁶³ je Fahrzeug $k \in K$ angelegt.⁶⁴

Das TTRP kann somit wie folgt formuliert werden:

⁶³ Um die Darstellung nicht zu verkomplizieren, werden auch PTR-Routen als Subtouren bezeichnet.

⁶⁴ Es gilt zu beachten, dass von Root-Kunden $l \in N_1^*$ ausgehende Subtouren keine TC-Kunden enthalten müssen, d.h. ausschließlich VC-Kunden enthalten können. Eine Auflösung dieser Subtouren und eine Integration der entsprechenden VC-Kunden in die Maintour liefert jedoch stets eine Kostenersparnis. In einem optimalen Tourenplan gilt daher, dass in jeder Subtour zu einem Root-Kunden $l \in N_1^*$ mindestens ein TC-Kunde enthalten sein muss. Vgl. hierzu auch die Definition der Tabusuche-Nachbarschaft in Kapitel 5.1.2, wo dieser Punkt bei der Evaluierung neuer Subtouren berücksichtigt wurde.

(TTRP)

$$\text{minimiere} \quad \sum_{i=0}^{n_1} \sum_{j=0}^{n_1} \sum_{k=1}^{m_1} c_{ij} x_{ij}^k + \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^m \sum_{l=0}^{n_1} \sum_{v=1}^n c_{ij} y_{ij}^{klv} \quad (0)$$

u.d.B.:

$$\sum_{j=0}^{n_1} \sum_{k=1}^{m_1} x_{ij}^k + \sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^m \sum_{\substack{l=0 \\ l \neq i}}^{n_1} \sum_{v=1}^n y_{ij}^{klv} = 1 \quad i = 1, \dots, n_1; \quad (1)$$

$$\sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^m \sum_{l=0}^{n_1} \sum_{v=1}^n y_{ij}^{klv} = 1 \quad i = n_1 + 1, \dots, n; \quad (2)$$

$$\sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^{n_1} \sum_{v=1}^n y_{0j}^{klv} = 0 \quad (3)$$

$$\sum_{j=0}^n y_{lj}^{klv} \leq 1 \quad k = 1, \dots, m; \quad l = 0, \dots, n_1; \quad v = 1, \dots, n; \quad (4)$$

$$y_{lj}^{klv} \leq \sum_{i=0}^{n_1} x_{il}^k \quad j = 1, \dots, n; \quad k = 1, \dots, m_1; \quad l = 1, \dots, n_1; \quad v = 1, \dots, n; \quad (5)$$

$$y_{ij}^{klv} \leq \sum_{p=0}^n y_{lp}^{klv} \quad i, j = 0, \dots, n; \quad k = 1, \dots, m_1; \quad l = 0, \dots, n_1; \quad v = 1, \dots, n; \quad (6)$$

$$y_{ij}^{klv} = 0 \quad i, j = 0, \dots, n; \quad k = m_1 + 1, \dots, m; \quad l = 1, \dots, n_1; \quad v = 1, \dots, n; \quad (7)$$

$$\sum_{v=1}^n \sum_{j=1}^n y_{0j}^{k0v} \leq 1 \quad k = m_1 + 1, \dots, m; \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^{n_1} x_{0j}^k \leq 1 \quad k = 1, \dots, m_1; \quad (9)$$

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq l}}^n \sum_{j=0}^n q_i y_{ij}^{klv} \leq Q^Z \quad k = 1, \dots, m; \quad l = 0, \dots, n_1; \\ v = 1, \dots, n; \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=0}^{n_1} q_i x_{ij}^k + \sum_{l=0}^{n_1} \sum_{v=1}^n \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq l}}^n \sum_{j=0}^n q_i y_{ij}^{klv} \leq Q^Z + Q^A \quad k = 1, \dots, m_1; \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=0}^{n_1} d_i x_{ij}^k + \sum_{l=0}^{n_1} \sum_{v=1}^n \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq l}}^n \sum_{j=0}^n d_i y_{ij}^{klv} + \\ + \sum_{i=0}^{n_1} \sum_{j=0}^{n_1} c_{ij} x_{ij}^k + \sum_{l=0}^{n_1} \sum_{v=1}^n \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_{ij} y_{ij}^{klv} \leq D - d_0 \quad k = 1, \dots, m_1; \quad (12)$$

$$\sum_{v=1}^n \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n (d_i + c_{ij}) y_{ij}^{k0v} \leq D \quad k = m_1 + 1, \dots, m; \quad (13)$$

$$\sum_{i=0}^n y_{ij}^{klv} = \sum_{p=0}^n y_{jp}^{klv} \quad j = 0, \dots, n; \quad k = 1, \dots, m; \\ l = 0, \dots, n_1; \quad v = 1, \dots, n; \quad (14)$$

$$\sum_{i=0}^{n_1} x_{ij}^k = \sum_{p=0}^{n_1} x_{jp}^k \quad j = 0, \dots, n_1; \quad k = 1, \dots, m_1; \quad (15)$$

$$\sum_{i \in B} \sum_{j \in B} x_{ij}^k \leq |B| - 1 \quad k = 1, \dots, m_1; \\ \forall B \subseteq N_1^* : |B| \geq 2; \quad (16)$$

$$\sum_{i \in B} \sum_{j \in B} y_{ij}^{klv} - \sum_{i \in B \cap N_1} \sum_{j \in N_1 \setminus B} x_{ij}^k \leq |B| - 1 \quad k = 1, \dots, m_1; \\ l = 0, \dots, n_1; \quad v = 1, \dots, n; \\ \forall B \subseteq N^* : |B| \geq 2; \quad (17)$$

$$\sum_{i \in B} \sum_{j \in B} y_{ij}^{k0v} \leq |B| - 1 \quad k = m_1 + 1, \dots, m; \ v = 1, \dots, n;$$

$$\forall B \subseteq N^* : |B| \geq 2; \quad (18)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\} \quad i, j = 0, \dots, n_1; \ k = 1, \dots, m_1; \quad (19)$$

$$y_{ij}^{klv} \in \{0, 1\} \quad i, j = 0, \dots, n; \ l = 0, \dots, n_1;$$

$$k = 1, \dots, m; \ v = 1, \dots, n; \quad (20)$$

Das Modell kann wie folgt beschrieben werden:

Die Zielfunktion (0) minimiert die Distanzen über alle Maintouren und alle Subtouren, wobei im Rahmen dieses Modells auch PTR-Routen für Fahrzeuge in K_2 als Subtouren zum Depot erachtet werden.

Kundenspezifische Restriktionen (1)-(6):

Im TTRP-Modell müssen VC-Kunden genau einmal auf einer Maintour oder auf einer Subtour, die nicht von ihnen selbst ausgeht, angefahren werden (1).⁶⁵ TC-Kunden müssen hingegen genau einmal auf einer Subtour angefahren werden (2). Eine Bedienung auf einer Maintour ist für TC-Kunden nicht zulässig (vgl. Variablendefinition (19)). Das Depot darf in keiner Subtour enthalten sein, die von einem VC-Kunden ausgeht (3). Für jede Tour gilt, dass das zugehörige Fahrzeug maximal einmal von dem Root der Tour wegfahren kann (4). Im Gegensatz zum Depot steht ein VC-Kunde nur dann als Root-Kandidat zur Verfügung, wenn er auf einer Maintour angefahren wird (5). Nur falls ein Root-Kandidat tatsächlich als Root genutzt wird, können andere Kunden in dessen zugehörige Subtour eingeplant werden (6).

Fahrzeugspezifische Restriktionen (7)-(13):

Für Fahrzeuge ohne Anhänger existiert keine Maintour. Es kann für sie insbesondere maximal eine Subtour mit Root gleich Depot, respektive eine PTR-

⁶⁵ Es sei angemerkt, dass das Modell von Semet [Sem95] die Einplanung eines VC-Kunden in eine Maintour und zugleich dessen Einplanung in eine dieser Route zugehörigen *fremden* Subtour ermöglicht, obwohl dies nicht zulässig ist. Vgl. die Restriktionen (1), (8) und insbesondere (6) im Modell von Semet.

Route (ohne Mehrfacheinsatz des Fahrzeuges) geben (7)(8). Für Fahrzeuge mit Anhänger ist die Subtourenanzahl nicht limitiert, jedoch kann maximal eine Maintour gefahren werden (9). Hierbei gilt es zu beachten, dass durchaus Subtouren zum Depot existieren können, selbst wenn die Maintour des entsprechenden Fahrzeuges keine Kunden enthält und dass anders als im Modell von Semet [Sem95] mehrere Touren einer Route vom Depot ausgehen können.

Auf einer Tour ohne Anhänger darf die Zugfahrzeugkapazität (10) und auf einer CVR-Route die Gesamtkapazität des Fahrzeuges einschließlich des Anhängers (11) nicht überschritten werden. Ebenso ist eine Überschreitung der maximalen Gesamteinsatzdauer eines Fahrzeuges unzulässig (12)(13).⁶⁶ Die von Chao [Cha02, S. 35] formulierte Restriktion „For every route, there is a restriction on tour length“ erscheint im Kontext der Aufgabenstellung unzutreffend und es wurde Bedingung (12) bzw. (13) analog zu bekannten VRP-Gesamtzeitbeschränkungen formuliert.⁶⁷ Insbesondere ist hierbei anzumerken, dass keine weiteren Zeitfaktoren, wie z.B. Zeiten für das An- und Abkoppeln des Anhängers oder für das Umladen von Ladung, angesetzt sind, um das Modell nicht zu stark zu verkomplizieren. Faktoren dieser Art sind in der Modellformulierung jedoch problemlos integrierbar. Die Be- bzw. Entladezeit eines Fahrzeuges im Depot ist mit d_0 angesetzt.

Formulierungsspezifische Restriktionen (14)-(20):

Restriktionen (14) und (15) geben an, dass ein Fahrzeug, das einen Kunden anfährt auch wieder von diesem abfahren muss. Restriktionen (16), (17) und (18) verhindern das Bilden von Kurzzyklen, d.h. Subgraphen ohne Anbindung an einen Root-Kunden oder das Depot (sog. *Subtour Elimination Constraints*, wobei hier dem Begriff Subtour eine andere Bedeutung zukommt, vgl. Toth und Vigo [Tot02b, S. 16] bzw. Nemhauser und Wolsey [Nem88, S. 273]). Bedingung (16) bezieht sich auf Maintouren, Bedingung (17) auf CVR-Subtouren und Bedingung (18) auf PTR-Routen. Bei CVR-Subtouren mit Root ungleich dem Depot, muss der Root explizit berücksichtigt wer-

⁶⁶ Die Fahrtzeit zwischen zwei Punkten wird hierbei proportional zur Entfernung der Punkte angenommen.

⁶⁷ Die Testdatensätze von Chao enthalten keine entsprechende Beschränkung. Daher ist ein Vergleich der Verfahren trotz alternativer Auslegung dieser Restriktion möglich.

den.⁶⁸ Die Variablendefinitionen sind in (19) und (20) spezifiziert.

Das TTRP ist wie auch das PVRP und das MDVRP ein *mehrstufiges Tourenplanungsproblem* [Cha02]. Die Entscheidungsstufen beinhalten die Zuordnung der Kunden zu den Fahrzeugen, die Zuordnung der Kunden abhängig von ihrem Kundentyp zu Touren der zugehörigen Fahrzeugroute einschließlich Festlegung der Anhänger-Parkplätze und schließlich die Bestimmung der kostenminimalen Bedienreihenfolge der Kunden einer Tour.

Interessant als Studienobjekt ist das TTRP, da es u.a. auch als ein spezielles *kombiniertes Standort- und Tourenplanungsproblem*⁶⁹ (Location-Routing Problem) angesehen werden kann. Hierbei besteht die Standortkomponente in der Bestimmung der optimalen Parkplätze für die CVR-Routen und die Tourenplanungskomponente in der Ermittlung der optimalen Touren ausgehend von den Anhänger-Parkplätzen und dem Depot einschließlich der An- und Abfahrten zu den Parkplätzen. Die beiden Komponenten sind hierbei stark interdependent.

Weiterhin kann das TTRP als ein Tourenplanungsproblem mit *Mehrfacheinsatz eines Fahrzeuges*⁷⁰ (Multi-Trip Vehicle Routing Problem, MTVRP) gesehen werden, da eine CVR-Route mehrere Touren enthalten kann. Auch kann das TTRP in das Standard-MTVRP⁷¹ überführt werden, indem ausschließlich Complete Vehicles mit limitierender Zugfahrzeugkapazität, aber unendlicher Anhängerkapazität zugrunde gelegt werden und alle Kunden vom Typ TC sind. Jede Subtour einer CVR beginnt und endet dann im Depot und die zugehörige CVR-Route beschreibt eine entsprechende MTVRP-Fahrzeugroute mit Mehrfacheinsatz für das Zugfahrzeug.

⁶⁸ Es sei darauf hingewiesen, dass die Zusammenhangsbedingung (13) im Modell von Semet [Sem95] fehlerhaft ist. Sei z.B. Teilmenge B eine Auswahl von Kunden, welche *nicht* in einer Tour des *betrachteten* Fahrzeuges k eingeplant sind, so ist die linke Seite der Nebenbedingung null und die Gleichung stets verletzt. Auch darf das Depot nicht in B enthalten sein. Dies wird deutlich, betrachtet man für B die Auswahl genau aller Kunden eines Fahrzeuges k einschließlich des Depots. In diesem Fall ist die Restriktion auch bei Zulässigkeit der Routenstruktur des Fahrzeuges k stets verletzt.

⁶⁹ Vgl. Kapitel 2.2.1.

⁷⁰ Vgl. Kapitel 2.2.1.

⁷¹ Vgl. Brandão und Mercer [Bra98] und Taillard, Laporte und Gendreau [Tai96b].

Schließlich enthält das TTRP Eigenschaften des *ortsabhängigen Tourenplanungsproblems*⁷² (Side Dependent Vehicle Routing Problem, SDVRP) und des *Tourenplanungsproblems mit heterogenen Fahrzeugen*⁷³. Elemente des SDVRP wegen der Einschränkung der TC-Kunden auf Fahrzeuge ohne Anhänger sowie Elemente des Tourenplanungsproblems mit heterogenen Fahrzeugen wegen dem aus Fahrzeugen mit und ohne Anhänger bestehenden Fuhrpark (und den damit verbundenen unterschiedlichen Gesamtkapazitäten) und den verschiedenen maximalen Gesamtkapazitäten für CVR- und PTR-Routen sowie CVR-Subtouren.

2.3.3.2 Benchmarkprobleme

Chao [Cha02] kreierte 21 neue Testprobleme für das TTRP, bezeichnet als T1 bis T21, basierend auf sieben (C1 bis C5, C11 und C12) der bekannten Christofides, Mingozzi und Toth [Chr79b] Benchmarkprobleme für das VRP⁷⁴. Jedes der klassischen VRP-Probleme wurde in drei TTRP Probleme konvertiert, indem jeweils 25%, 50% und 75% aller Kunden als TC-Kunden ausgewiesen werden. Die verbleibenden Kunden werden als VC-Kunden angesehen. Die Auswahl der TC-Kunden erfolgte aufsteigend nach ihrer Entfernung zum nächstgelegenen Kunden (und zum Depot) beginnend mit dem Kunden, der die geringste Distanz aufweist. Bei Mehrdeutigkeit wurden Kunden mit kleinerer ID bevorzugt.⁷⁵ Jeder Datensatz enthält eine Menge von m homogenen Zugfahrzeugen und m_1 homogenen Anhängern. In allen Datensätzen gilt $m > m_1$ und die Zugfahrzeugkapazität Q^Z ist stets größer oder gleich der Anhängerkapazität Q^A . Das Verhältnis von gesamter Angebotsmenge zu maximaler Fahrzeugkapazität (Ratio of demand to capacity, RDC) ist stets größer als 90%, was bereits das Auffinden einer zulässigen Lösung schwierig gestaltet. Die Probleme enthalten kein Gesamtzeitlimit für die Fahrzeuge. Eine Übersicht gibt Tabelle 2.5.

⁷² Vgl. Kapitel 2.2.1.

⁷³ Vgl. Kapitel 2.2.1.

⁷⁴ vgl. Kapitel 2.1.2

⁷⁵ Um den Kundentyp eindeutig zu kennzeichnen, werden in den Lösungen in Anhang A die TC-Kunden in Fettdruck wiedergegeben.

Tabelle 2.5: Übersicht über die TTRP-Testdaten

ID	CMT*	Kunden			Fahrzeuge				RDC
		n	VC	TC	m	m_1	Q^Z	Q^A	
T1	C1	50	38	12	5	3	100	100	0,971
T2			25	25					
T3			13	37					
T4	C2	75	57	18	9	5	100	100	0,974
T5			38	37					
T6			19	56					
T7	C3	100	75	25	8	4	150	100	0,911
T8			50	50					
T9			25	75					
T10	C4	150	113	37	12	6	150	100	0,931
T11			75	75					
T12			38	112					
T13	C5	199	150	49	17	9	150	100	0,923
T14			100	99					
T15			50	149					
T16	C11	120	90	30	7	4	150	100	0,948
T17			60	60					
T18			30	90					
T19	C12	100	75	25	10	5	150	100	0,903
T20			50	50					
T21			25	75					

* Bezeichnung des Datensatzes von Christofides, Mingozzi und Toth [Chr79b].

Abbildung 2.5 zeigt die beste bekannte Lösung zu Testproblem T1 mit 38 VC-Kunden und zwölf TC-Kunden, drei CVRs und zwei PTRs. TC-Kunden sind mit weißen Quadraten und VC-Kunden mit schwarzen Punkten dargestellt. Durchgezogene Linien spezifizieren Maintouren und gestrichelte Linien Touren ohne Anhänger, d.h. Subtouren oder Pure Truck Routes. Der zugehörige Tourenplan mit einer Gesamtdistanz von 564,68 ist in Anhang A angegeben.

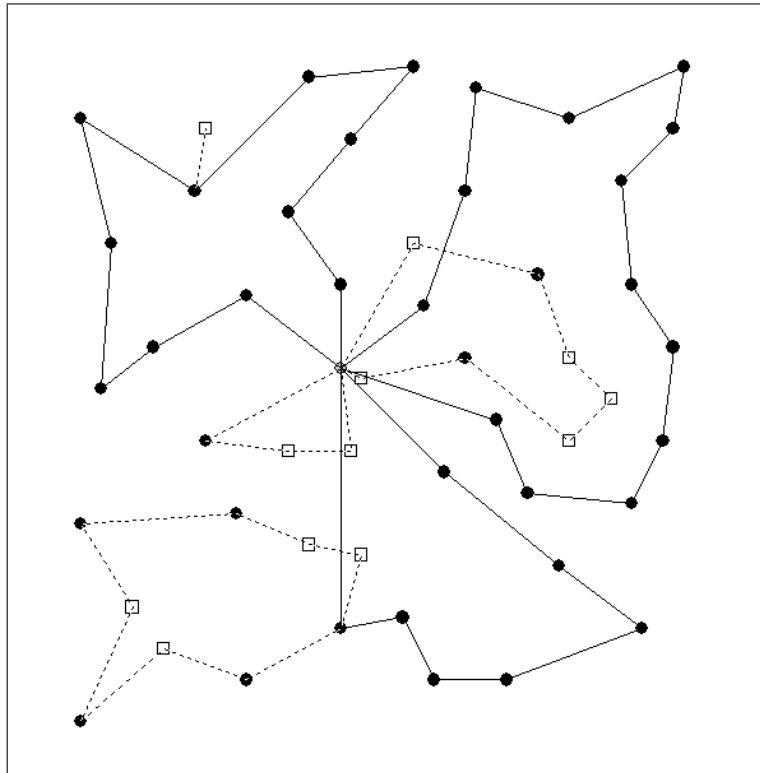


Abbildung 2.5: Beste bekannte Lösung zu TTRP-Testproblem T1

2.3.3.3 Literaturüberblick

Wohingegen dem VRP und einigen Varianten von Tourenplanungsproblemen viel Aufmerksamkeit in der Literatur zukam, wurden das TTRP und zum TTRP verwandte Problemstellungen selten behandelt.

Semet und Taillard [Sem93] betrachten ein reales Tourenplanungsproblem, das den Einsatz von Anhängern beinhaltet. Das von ihnen behandelte Problem unterscheidet sich jedoch vom TTRP, indem VC-Kunden (genannt „trailer-stores“) nicht in Subtours bedient werden dürfen und indem das Problem weitere Restriktionen, wie z.B. Zeitfenster oder fahrzeugspezifische variable Kosten, beinhaltet. Zur Lösung des Problems schlagen sie eine Konstruktionsheuristik und eine Tabusuche-Heuristik vor. Für eine Beschreibung der Verfahren wird verwiesen auf die Kapitel 3.3 und 4.2.2.

Semet [Sem95] modelliert ein verwandtes Problem, genannt „the Partial Accessibility Constrained Vehicle Routing Problem“. Das Modell ist dem des TTRP sehr ähnlich, außer dass die Anzahl an Subtours je Root auf ma-

ximal eine beschränkt ist und dass das Depot nur einmal in einer Route besucht werden kann. Weiterhin wird für die Lösung angenommen, dass alle Zugfahrzeuge eingesetzt werden und dass die Anzahl an einzusetzenden Anhängern bestimmt werden soll. Es wird eine auf der Heuristik von Fisher und Jaikumar [Fis81] basierende⁷⁶, zweistufige Heuristik vorgeschlagen. Die Arbeit konzentriert sich auf die erste Phase der Heuristik und präsentiert ein Branch-and-Bound Verfahren mit Lagrange-Relaxation zur Berechnung der unteren Schranken für das Zuordnungsproblem der Kunden und Anhänger zu den Fahrzeugen.

Gerdessen [Ger96] führte eine Studie zum „Vehicle Routing Problem with Trailers“ durch. Dieses Modell weicht vom vorgestellten TTRP-Modell in einigen grundlegenden Annahmen ab: alle Kunden besitzen eine (im Sinne eines Sammelproblems) einheitliche Angebotsmenge sowie Manövrierkosten für Anhänger anstelle der Zuordnung eines Kunden-Typs; jeder Kunde kann als Parkplatz genutzt werden; jeder Anhänger wird genau einmal abgestellt. Des Weiteren berücksichtigt das Modell unterschiedliche Fahrtkosten für den Einsatz mit und ohne Anhänger. Vier Konstruktionsheuristiken, die lokale Verbesserungsverfahren beinhalten, wurden für dieses Problem entwickelt. Das dieser Arbeit zugrunde liegende Modell des TTRP⁷⁷, wurde erstmalig von Chao [Cha02] vorgestellt. Er entwickelte eine Konstruktionsheuristik und ein Tabusuche-Verfahren für dieses Problem. Eine Beschreibung der Konstruktionsheuristik erfolgt in Kapitel 3.3 und der Tabusuche-Heuristik in Kapitel 4.2.12.

2.4 Formulierung neuer Tourenplanungsprobleme

Viele Varianten der Tourenplanung fanden in der einschlägigen Literatur Beachtung. Bisher unbehandelt hingegen sind das periodische Tourenplanungsproblem bei restringierendem Anhängereinsatz und das Mehrdepot-Tourenplanungsproblem bei restringierendem Anhängereinsatz. Probleme

⁷⁶ Vgl. Kapitel 3.2.3.

⁷⁷ vgl. Kapitel 2.3.3.1.

dieser Form wurden in verschiedenen Arbeiten⁷⁸ angesprochen, jedoch bisher nicht explizit betrachtet. Im Folgenden werden daher zunächst die Probleme genauer spezifiziert.

2.4.1 Periodische Tourenplanung bei restringierendem Anhängereinsatz (PTTRP)

2.4.1.1 Problembeschreibung inklusive neuer mathematischer Formulierung

Das periodische Tourenplanungsproblem bei restringierendem Anhängereinsatz (Periodic Truck and Trailer Routing Problem, PTTRP) erweitert den Planungshorizont des TTRP auf mehrere Tage. Hierbei wird analog zum PVRP jedem Kunden i zusätzlich eine Bedienfrequenz e_i und eine Menge zulässiger Bedienmuster C_i zugeordnet (vgl. Kapitel 2.3.1.1). Jedes Fahrzeug kann pro Tag genau eine Route fahren und steht an jedem Tag des Planungshorizonts zur Einplanung zur Verfügung. Ziel ist die Minimierung der Gesamtentfernungen über alle Routen aller Tage, wobei für jeden Kunden ein zulässiges Bedienmuster so zu wählen ist, dass der Kunde an den durch das Bedienmuster spezifizierten Tagen in genau einer Route eingeplant ist⁷⁹ und alle TTRP-Restriktionen eingehalten sind. Das PTTRP stellt somit ein äußerst komplexes Optimierungsproblem dar, da es dem bereits mehrstufigen TTRP eine weitere Restriktion hinzufügt.

Eine entsprechende Problemstellung der Tourenplanung findet sich beispielsweise im Bereich der Milchindustrie, wo bei der Sammlung von Rohmilch sowohl der Einsatz von Anhängern als auch (bei einer Rahmenplanung) zumeist ein zweitägiger Planungshorizont betrachtet werden muss. Hierbei wird den Milcherzeugern (Kunden) vereinfachend genau einer der beiden Kundentypen VC oder TC zugeordnet und eine tägliche Abholung der Rohmilch ($e_i = 2; C_i = \{\{1, 2\}\}$) oder eine Abholung nur an einem der beiden Tage ($e_i = 1; C_i = \{\{1\}, \{2\}\}$) gefordert [Ste97a, Stö87].

⁷⁸ Vgl. z.B. Steckhan [Ste97a] und Stöckl, Haisch und Betz [Stö87].

⁷⁹ Ein Kunde kann durchaus in mehreren Touren eingeplant sein, vgl. den Root einer Subtour. Dieser ist sowohl in der Maintour als auch in den von ihm ausgehenden Subtours eingeplant.

Da das PTTRP in der Literatur bisher noch nicht explizit behandelt wurde, wird im Folgenden ein Modell für ein Standard-PTTRP vorgestellt. Es wird dabei das binäre lineare Programm des TTRP aus Kapitel 2.3.3.1 um die periodische Problemstellung erweitert. Die Notation wird übernommen und die Erweiterung folgt dem Modell des PVRP von Cordeau, Gendreau und Laporte [Cor97]:

Neu hinzu kommt die Indexvariable s ($s = 1, \dots, t$), die die Tage des Planungshorizonts referenziert sowie die binäre Konstante a_{rs} , welche angibt, ob Tag s zum Bedienmuster $r \in C_i$ des Kunden i gehört ($a_{rs} = 1$) oder nicht ($a_{rs} = 0$). Weiterhin sei die Entscheidungsvariable z_{ir} definiert als 1, falls und nur falls das Bedienmuster $r \in C_i$ dem Kunden i zugewiesen ist und 0 sonst. Die Entscheidungsvariablen des TTRP-Grundmodells werden ebenfalls entsprechend erweitert auf x_{ij}^{ks} und y_{ij}^{klvs} und enthalten nun zusätzlich zur bisherigen Bedeutung die Information, ob die Einplanung am Tag s stattfindet oder nicht. Auch die Fahrtkosten zwischen zwei Knoten i und j werden abhängig vom Tag s als c_{ij}^s definiert.⁸⁰

Das PTTRP-Modell kann dann wie folgt formuliert werden:

⁸⁰ Die Fahrtkosten seien für alle Fahrzeuge gleich. Eine Unterscheidung der Fahrtkosten, Kapazitäten und Gesamteinsatzzeiten abhängig von den Fahrzeugen kann analog zum PVRP-Modell von Cordeau, Gendreau und Laporte [Cor97] vorgenommen werden.

(PTTRP)

$$\text{minimiere} \quad \sum_{i=0}^{n_1} \sum_{j=0}^{n_1} \sum_{k=1}^{m_1} \sum_{s=1}^t c_{ij}^s x_{ij}^{ks} + \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^m \sum_{l=0}^{n_1} \sum_{v=1}^n \sum_{s=1}^t c_{ij}^s y_{ij}^{klvs} \quad (0)$$

u.d.B.:

$$\sum_{j=0}^{n_1} \sum_{k=1}^{m_1} x_{ij}^{ks} + \sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^m \sum_{\substack{l=0 \\ l \neq i}}^{n_1} \sum_{v=1}^n y_{ij}^{klvs} = \sum_{r \in C_i} a_{rs} z_{ir} \quad i = 1, \dots, n_1; \\ s = 1, \dots, t; \quad (1)$$

$$\sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^m \sum_{l=0}^{n_1} \sum_{v=1}^n y_{ij}^{klvs} = \sum_{r \in C_i} a_{rs} z_{ir} \quad i = n_1 + 1, \dots, n; \quad s = 1, \dots, t; \quad (2)$$

$$\sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^{n_1} \sum_{v=1}^n y_{0j}^{klvs} = 0 \quad s = 1, \dots, t; \quad (3)$$

$$\sum_{j=0}^n y_{lj}^{klvs} \leq 1 \quad k = 1, \dots, m; \quad l = 0, \dots, n_1; \\ v = 1, \dots, n; \quad s = 1, \dots, t; \quad (4)$$

$$y_{lj}^{klvs} \leq \sum_{i=0}^{n_1} x_{il}^{ks} \quad j = 1, \dots, n; \quad k = 1, \dots, m_1; \\ l = 1, \dots, n_1; \quad v = 1, \dots, n; \\ s = 1, \dots, t; \quad (5)$$

$$y_{ij}^{klvs} \leq \sum_{p=0}^n y_{lp}^{klvs} \quad i, j = 0, \dots, n; \quad k = 1, \dots, m_1; \\ l = 0, \dots, n_1; \quad v = 1, \dots, n; \\ s = 1, \dots, t; \quad (6)$$

$$y_{ij}^{klvs} = 0 \quad i, j = 0, \dots, n; \quad k = m_1 + 1, \dots, m; \\ l = 1, \dots, n_1; \quad v = 1, \dots, n; \\ s = 1, \dots, t; \quad (7)$$

$$\sum_{v=1}^n \sum_{j=1}^n y_{0j}^{k0vs} \leq 1 \quad k = m_1 + 1, \dots, m; \quad s = 1, \dots, t; \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^{n_1} x_{0j}^{ks} \leq 1 \quad k = 1, \dots, m_1; \quad s = 1, \dots, t; \quad (9)$$

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq l}}^n \sum_{j=0}^n q_i y_{ij}^{klvs} \leq Q^Z \quad k = 1, \dots, m; \quad l = 0, \dots, n_1; \\ v = 1, \dots, n; \quad s = 1, \dots, t; \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=0}^{n_1} q_i x_{ij}^{ks} + \sum_{l=0}^{n_1} \sum_{v=1}^n \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq l}}^n \sum_{j=0}^n q_i y_{ij}^{klvs} \leq Q^Z + Q^A \quad k = 1, \dots, m_1; \\ s = 1, \dots, t; \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=0}^{n_1} d_i x_{ij}^{ks} + \sum_{l=0}^{n_1} \sum_{v=1}^n \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq l}}^n \sum_{j=0}^n d_i y_{ij}^{klvs} + \\ + \sum_{i=0}^{n_1} \sum_{j=0}^{n_1} c_{ij}^s x_{ij}^{ks} + \sum_{l=0}^{n_1} \sum_{v=1}^n \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_{ij}^s y_{ij}^{klvs} \leq D - d_0 \quad k = 1, \dots, m_1; \\ s = 1, \dots, t; \quad (12)$$

$$\sum_{v=1}^n \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n (d_i + c_{ij}^s) y_{ij}^{k0vs} \leq D \quad k = m_1 + 1, \dots, m; \quad s = 1, \dots, t; \quad (13)$$

$$\sum_{i=0}^n y_{ij}^{klvs} = \sum_{p=0}^n y_{jp}^{klvs} \quad j = 0, \dots, n; \quad k = 1, \dots, m; \\ l = 0, \dots, n_1; \quad v = 1, \dots, n; \\ s = 1, \dots, t; \quad (14)$$

$$\sum_{i=0}^{n_1} x_{ij}^{ks} = \sum_{p=0}^{n_1} x_{jp}^{ks} \quad j = 0, \dots, n_1; \quad k = 1, \dots, m_1; \\ s = 1, \dots, t; \quad (15)$$

$$\sum_{i \in B} \sum_{j \in B} x_{ij}^{ks} \leq |B| - 1 \quad k = 1, \dots, m_1; \ s = 1, \dots, t;$$

$$\forall B \subseteq N_1^* : |B| \geq 2; \quad (16)$$

$$\sum_{i \in B} \sum_{j \in B} y_{ij}^{klvs} - \sum_{i \in B \cap N_1} \sum_{j \in N_1 \setminus B} x_{ij}^{ks} \leq |B| - 1 \quad k = 1, \dots, m_1; \ s = 1, \dots, t;$$

$$l = 0, \dots, n_1; \ v = 1, \dots, n;$$

$$\forall B \subseteq N^* : |B| \geq 2; \quad (17)$$

$$\sum_{i \in B} \sum_{j \in B} y_{ij}^{k0vs} \leq |B| - 1 \quad k = m_1 + 1, \dots, m;$$

$$v = 1, \dots, n; \ s = 1, \dots, t;$$

$$\forall B \subseteq N^* : |B| \geq 2; \quad (18)$$

$$\sum_{r \in C_i} z_{ir} = 1 \quad i = 1, \dots, n; \quad (19)$$

$$x_{ij}^{ks} \in \{0, 1\} \quad i, j = 0, \dots, n_1; \ k = 1, \dots, m_1;$$

$$s = 1, \dots, t; \quad (20)$$

$$y_{ij}^{klvs} \in \{0, 1\} \quad i, j = 0, \dots, n; \ l = 0, \dots, n_1;$$

$$k = 1, \dots, m; \ v = 1, \dots, n;$$

$$s = 1, \dots, t; \quad (21)$$

$$z_{ir} \in \{0, 1\} \quad i = 1, \dots, n; \ r \in C_i; \quad (22)$$

Gegenüber dem TTRP-Modell wurden insbesondere die Restriktionen in (1) und (2) modifiziert. Hier wird eine Einplanung des Kunden i am Tag s dann und nur dann erzwungen, wenn Tag s in der dem Kunden i aktuell zugeteilten Besuchskombination enthalten ist. Ansonsten darf der Kunde an diesem Tag nicht eingeplant werden. Restriktion (19) wurde neu eingefügt und stellt sicher, dass jedem Kunden genau eine Besuchskombination aus der Menge seiner Bedienmuster zugewiesen wird. Die Variablendefinition von z_{ir} ist in

(22) wiedergegeben. Die anderen Restriktionen wurden der erweiterten Problemstellung entsprechend angepasst.

2.4.1.2 Entwicklung von Benchmarkproblemen

Da für das PTTRP in der Literatur noch keine Benchmarkprobleme bekannt sind, wurden 30 neue Testprobleme aufbauend auf den zehn PVRP-Testproblemen⁸¹ von Cordeau, Gendreau und Laporte [Cor97]⁸² kreiert, bezeichnet als PT1 bis PT30. Tabelle 2.6 gibt einen Überblick über die neuen Testprobleme. Folgende Modifikationen wurden durchgeführt:

- Jeder der zehn PVRP-Datensätze wurde analog dem Vorgehen von Chao [Cha02] zur Erzeugung der TTRP-Benchmarkprobleme in drei PTTRP-Testprobleme konvertiert, indem jeweils 25%, 50% und 75% aller Kunden als TC-Kunden ausgewiesen wurden. Die verbleibenden Kunden werden als VC-Kunden angesehen. Die Auswahl der TC-Kunden erfolgte aufsteigend nach ihrer Entfernung zum nächstgelegenen Kunden (einschließlich des Depots) beginnend mit dem Kunden, der die geringste Distanz aufweist. Bei Mehrdeutigkeit wurden Kunden mit kleinerer ID bevorzugt.⁸³
- Es wurden für jeden der zehn Testdatensätze (unter Beibehaltung der Anzahl an verfügbaren Fahrzeugen je Tag) alle Fahrzeuge durch Zugfahrzeuge mit Anhänger ersetzt. Die Gesamtkapazität der neuen Fahrzeuge stimmt dabei mit der Kapazität der Fahrzeuge im Original-Datensatz überein, jedoch verteilt sich diese auf Zugfahrzeug (Q^Z) und Anhänger (Q^A) wie in Tabelle 2.6 angegeben.
- Die Datensätze enthalten wie auch die bekannten TTRP-Testprobleme keine Beschränkung der Gesamteinsatzdauer eines Fahrzeuges.⁸⁴

⁸¹ Vgl. Kapitel 2.3.1.2.

⁸² Die Datensätze sind abgedruckt bei Cordeau, Gendreau und Laporte [Cor95] sowie beziehbar über das Internet unter <http://www.hec.ca/chairedistributique/data/> (Abruf am 7.10.2003).

⁸³ Um den Kundentyp eindeutig zu kennzeichnen, werden in den Lösungen in Anhang C die TC-Kunden in Fettdruck wiedergegeben.

⁸⁴ Die Original-Datensätze enthalten eine Beschränkung [Cor97].

Tabelle 2.6: Übersicht über die neuen PTTRP-Testdaten

ID	CGL*	Kunden			Fahrzeuge			Bedienmuster				t
		n	VC	TC	m	Q ^Z	Q ^A	e _i : t	t/2	t/3	1	
								C _i : 1	2	3	t	
PT1	a	48	36	12	2	100	100	12	12	-	24	4
PT2			24	24								
PT3			12	36								
PT4	b	96	72	24	4	95	100	24	24	-	48	4
PT5			48	48								
PT6			24	72								
PT7	c	144	108	36	6	95	95	36	36	-	72	4
PT8			72	72								
PT9			36	108								
PT10	d	192	144	48	8	90	95	48	48	-	96	4
PT11			96	96								
PT12			48	144								
PT13	e	240	180	60	10	90	90	60	60	-	120	4
PT14			120	120								
PT15			60	180								
PT16	f	288	216	72	12	85	90	72	72	-	144	4
PT17			144	144								
PT18			72	216								
PT19	g	72	54	18	3	100	100	18	18	18	18	6
PT20			36	36								
PT21			18	54								
PT22	h	144	108	36	6	95	95	36	36	36	36	6
PT23			72	72								
PT24			36	108								
PT25	i	216	162	54	9	90	90	54	54	54	54	6
PT26			108	108								
PT27			54	162								
PT28	j	288	216	72	12	85	85	72	72	72	72	6
PT29			144	144								
PT30			72	216								

* Bezeichnung in Cordeau, Gendreau und Laporte [Cor97].

Bis auf die genannten Modifikationen stimmen die Datensätze mit den zugrunde liegenden PVRP-Testproblemen überein. Bedienfrequenzen (e_i) und Bedienmuster (C_i) wurden ebenfalls ohne Änderung übernommen.

Abbildung 2.6 zeigt einen zulässigen Tourenplan zu PTTRP-Testproblem PT1 mit 36 VC-Kunden (schwarze Punkte) und zwölf TC-Kunden (weiße Quadrate) und einer Gesamtdistanz von 2318,52 über alle vier Tage des Planungshorizonts. Maintouren sind als durchgezogene Linien, Subtouren als gestrichelte Linien dargestellt. Der detaillierte Tourenplan ist in Anhang C wiedergegeben.

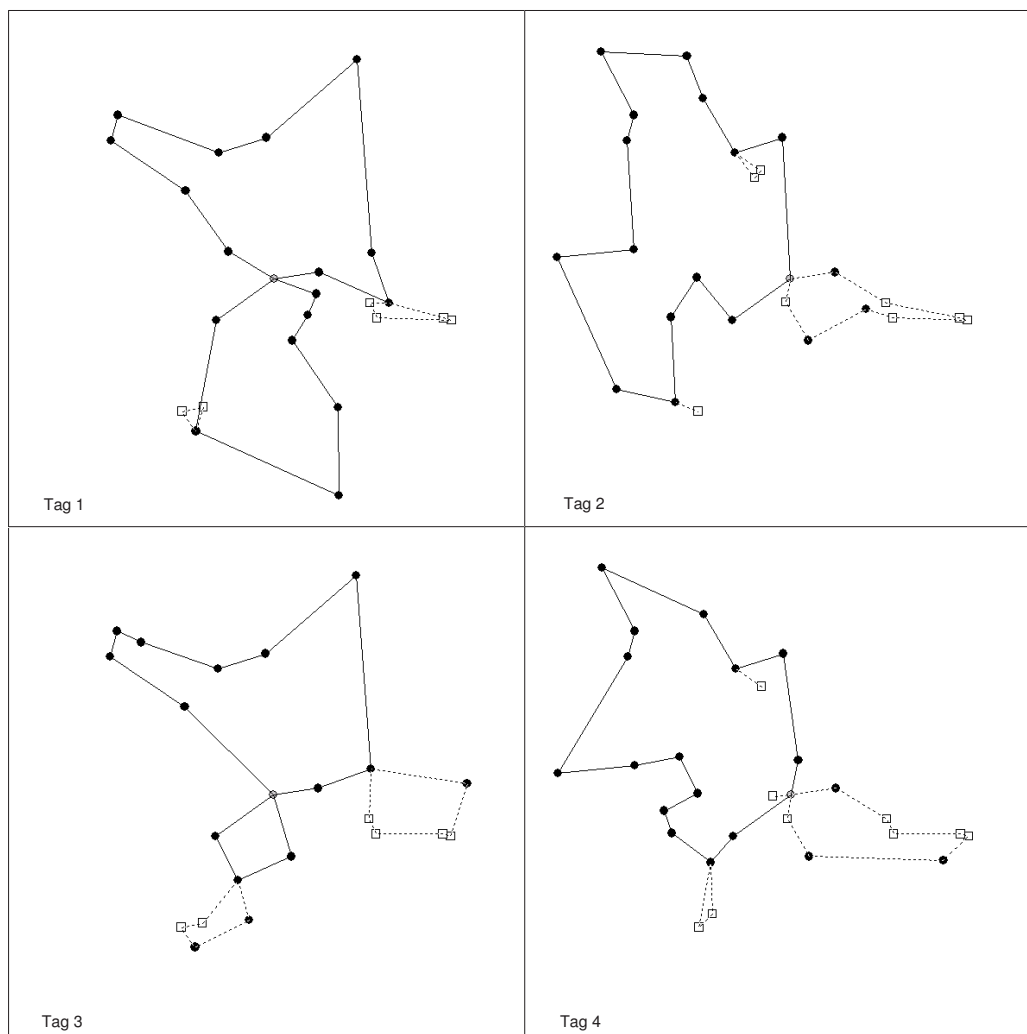


Abbildung 2.6: Beste bekannte Lösung zu PTTRP-Testproblem PT1

2.4.2 Mehrdepot-Tourenplanung bei restringierendem Anhängereinsatz (MDTTRP)

2.4.2.1 Problembeschreibung inklusive Rekurs auf die PTTRP-Formulierung

Das Mehrdepot-Tourenplanungsproblem bei restringierendem Anhängereinsatz (Multi-Depot Truck and Trailer Routing Problem, MDTTRP) betrachtet eine Erweiterung der TTRP-Problemstellung, bei der d ($d > 1$) Depots anstatt eines einzigen Depots existieren. Wie auch beim Standard-MDVRP, das die analoge Erweiterung des VRP darstellt, sind in jedem Depot m Fahrzeuge stationiert und jedes Fahrzeug kann genau eine Route ausführen. Im Verlauf einer Route darf kein anderes als das Ausgangsdepot angefahren werden und die Route muss wieder im Ausgangsdepot enden. Jeder Kunde kann ohne Einschränkung jedem Depot zugeordnet werden. Die Restriktionen des TTRP⁸⁵ müssen auch bei dieser erweiterten Problemstellung stets eingehalten werden.

Bei dieser Problemstellung handelt es sich ebenfalls um ein *mehrstufiges Tourenplanungsproblem*, da das bereits mehrstufige TTRP um eine weitere Entscheidungsstufe ergänzt wird, nämlich die Zuordnung der Kunden zu den Depots. Für $d = 1$ lässt sich das MDTTRP auf das TTRP reduzieren.

Ein entsprechendes Problem wurde in der einschlägigen Literatur bisher noch nicht behandelt. Um die Problemstellung eindeutig zu beschreiben, wird das lineare Programm aus Kapitel 2.4.1.1 herangezogen. Das Modell wurde für das PTTRP entwickelt, erlaubt aber ebenfalls eine Abbildung der MDTTRP-Problemstellung. Hierzu wird auch auf eine analoge Assoziation zwischen dem MDVRP und dem PVRP verwiesen, wie sie in Kapitel 2.3.2.1 geschildert ist. Es gelte $d = t$ und jedes Depot werde mit einem Tag des Planungshorizonts assoziiert. Jeder Kunde i ($i = 1, \dots, n$) habe eine Bedienfrequenz $e_i = 1$ und die Menge $C_i = \{\{1\}, \{2\}, \dots, \{t\}\}$ an zulässigen Bedienmustern. Letzteres bedeutet, dass jeder Kunde genau einem Depot (respektive Tag) zugewiesen werden muss. Die Kosten c_{ij}^s seien die für alle Fahrzeuge des Depots s ($s = 1, \dots, t$) einheitlichen Fahrtkosten von Knoten i zu Knoten j ($i, j = 0, \dots, n$).

⁸⁵ Vgl. Kapitel 2.3.3.1.

Wie auch bei Cordeau und Laporte [Cor01b] für das SDVRP gezeigt, lässt sich mit dem vorgestellten linearen Programm des PTTRP auch eine weitere praxisrelevante Problemstellung abbilden: das *Side Dependent Truck and Trailer Routing Problem*. Das Problem leitet sich aus der Verknüpfung des TTRP und des SDVRP⁸⁶ ab. Jeder Kunde wird dabei vom Typ VC oder TC angenommen und hat darüber hinaus eine SDVRP-spezifische Menge an für ihn zulässigen Fahrzeugtypen zugeordnet, wobei ein entsprechender Fuhrpark vorausgesetzt wird. Diese Problemstellung wird in dieser Arbeit nicht weiter vertieft. Das in Kapitel 7 vorgestellte neue Tabusuche-Verfahren kann jedoch auch zur Lösung dieses Problems verwendet werden.

2.4.2.2 Entwicklung von Benchmarkproblemen

Da -wie auch für das PTTRP- in der Literatur noch keine Benchmarkprobleme für das MDTTRP bekannt sind, wurden 30 neue Testprobleme basierend auf den zehn MDVRP-Testproblemen⁸⁷ von Cordeau, Gendreau und Laporte [Cor97]⁸⁸ kreiert, bezeichnet als MDT1 bis MDT30. Tabelle 2.7 gibt einen Überblick über die Charakteristika der neuen Datensätze. Die notwendigen Modifikationen wurden analog zur Erzeugung der PTTRP-Testprobleme durchgeführt und entsprechen den auf Seite 62 aufgeführten Schritten. Bis auf die genannten Änderungen stimmen die Datensätze mit den zugrunde liegenden MDVRP-Testproblemen überein. Die Datensätze enthalten keine Beschränkung der Gesamteinsatzdauer eines Fahrzeuges und es können alle Kunden von allen Depots aus bedient werden.

Abbildung 2.7 zeigt einen zulässigen Tourenplan zu MDTTRP-Testproblem MDT1 mit 36 VC-Kunden (schwarze Punkte) und zwölf TC-Kunden (weiße Quadrate) und einer Gesamtdistanz von 923,97. Durchgezogene Linien spezifizieren Maintouren, gestrichelte Linien Subtouren. Der detaillierte Tourenplan ist in Anhang B zu finden.

⁸⁶ Vgl. Kapitel 2.2.1.

⁸⁷ Vgl. Kapitel 2.3.2.2.

⁸⁸ Die Datensätze sind abgedruckt bei Cordeau, Gendreau und Laporte [Cor95] sowie beziehbar über das Internet unter <http://www.hec.ca/chairedistributique/data/> (Abruf am 7.10.2003).

Tabelle 2.7: Übersicht über die neuen MDTTRP-Testdaten

ID	CGL*	Kunden			Fahrzeuge			d
		n	VC	TC	m	Q^Z	Q^A	
MDT1	a	48	36	12	1	100	100	4
MDT2			24	24				
MDT3			12	36				
MDT4	b	96	72	24	2	95	100	4
MDT5			48	48				
MDT6			24	72				
MDT7	c	144	108	36	3	95	95	4
MDT8			72	72				
MDT9			36	108				
MDT10	d	192	144	48	4	90	95	4
MDT11			96	96				
MDT12			48	144				
MDT13	e	240	180	60	5	90	90	4
MDT14			120	120				
MDT15			60	180				
MDT16	f	288	216	72	6	85	90	4
MDT17			144	144				
MDT18			72	216				
MDT19	g	72	54	18	1	100	100	6
MDT20			36	36				
MDT21			18	54				
MDT22	h	144	108	36	2	95	95	6
MDT23			72	72				
MDT24			36	108				
MDT25	i	216	162	54	3	90	90	6
MDT26			108	108				
MDT27			54	162				
MDT28	j	288	216	72	4	85	85	6
MDT29			144	144				
MDT30			72	216				

* Bezeichnung in Cordeau, Gendreau und Laporte [Cor97].

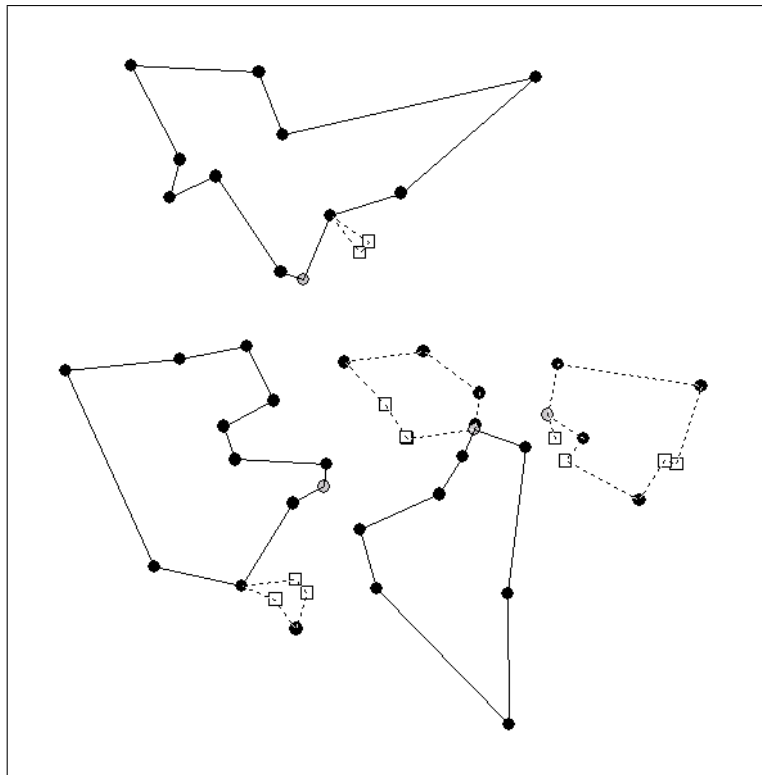


Abbildung 2.7: Beste bekannte Lösung zu MDTTRP-Testproblem MDT1

Kapitel 3

Entwicklung neuer Konstruktionsverfahren für das TTRP

In diesem Kapitel sollen zwei neu entwickelte Konstruktionsheuristiken für das TTRP, bezeichnet als *T-Cluster* (Kapitel 3.4) und *T-Sweep* (Kapitel 3.5), vorgestellt werden. Da die neuen Heuristiken bekannte Verbesserungsverfahren für das Rundreiseproblem beinhalten und auf bekannten Konstruktionsheuristiken für das VRP und TTRP aufbauen, werden diese zu Beginn des Kapitels aufgeführt. Ein Vergleich der TTRP-Konstruktionsheuristiken schließt das Kapitel ab.

3.1 Heuristiken für das Rundreiseproblem

Die Ermittlung einer optimalen Besuchsreihenfolge für die Kunden einer Tour entspricht einem Rundreise- bzw. Handlungsreisendenproblem¹ (Traveling Salesman Problem, TSP), welches als Subproblem im Standardproblem der Tourenplanung enthalten ist. Zur Lösung des TSP existiert eine Vielfalt an exakten und approximativen Lösungstechniken. Da jedoch im Rahmen von VRP-Heuristiken zumeist heuristische Lösungsverfahren für das TSP zum

¹ Vgl. Kapitel 2.1.1.

Einsatz kommen, beschränken sich die folgenden Ausführungen auf diese approximativen Techniken. Diese lassen sich in Konstruktions- und Verbesserungsverfahren sowie Kombinationsverfahren untergliedern. Einen Überblick über Lösungsansätze zum TSP geben z.B. Laporte [Lap92a], Lawler et al. [Law85], Reinelt [Rei94] sowie die Bibliographie von Laporte und Osman [Lap95].

Beispielhaft für Konstruktionsverfahren sei die *Nearest Neighbor-Heuristik* skizziert. Beginnend mit einem beliebigen Kunden wird derjenige noch unbesuchte Kunde zur Route hinzugenommen, der dem aktuellen bzw. zuletzt aufgenommenen Kunden am nächsten liegt. Am Ende wird die Tour durch Verbindung des letzten und des ersten Kunden geschlossen [Lap92a].

Bei TSP-Konstruktionsverfahren sind -neben der Wahl der Initialisierung- zwei grundsätzliche Entscheidungen zu treffen. Zum einen muss festgelegt werden, welcher ungeroutete Kunde als nächster Kunde in die aktuelle Teilroute aufgenommen wird und zum anderen, an welche Position der Teilroute der entsprechende Kunde eingefügt werden soll. Hierzu sind verschiedene Strategien denkbar. Eine häufig gewählte Strategie ist die Evaluierung mittels *cheapest insertion* [Joh85, Arc03]. Seien die Einfügekosten in die aktuelle Tour $T = (i_0, \dots, i_k)$ für einen Kunden $u \notin T$ definiert als

$$e(u, T) = \min_{0 \leq l \leq k-1} (c(i_l, u) + c(u, i_{l+1}) - c(i_l, i_{l+1}))$$

so wird derjenige Kunde u gewählt und entsprechend kostenminimal eingefügt, der die geringsten Einfügekosten $e(u, T)$ besitzt.

Repräsentativ für Verbesserungsverfahren für TSP-Probleme mit symmetrischen Distanzen seien die bekannten k -opt-Verfahren geschildert. Hierbei handelt es sich um lokale Suchverfahren² bei denen solange eine Transformation der Rundreise durchgeführt wird, bis keine Verbesserung mehr erzielt werden kann. Bei den k -opt-Verfahren besteht eine Transformation aus dem Ersetzen von bis zu k Kanten der Rundreise durch andere Kanten. Abhängig von k wird die Rundreise dann als k -optimal bezeichnet [Lin65]. Abbildung 3.1 zeigt einen exemplarischen 2-opt-Verbesserungsschritt. Hierbei werden die beiden Verbindungen (a, b) und (c, d) ersetzt durch neue Verbindungen

² Vgl. Kapitel 4.1.1.

(c, a) und (d, b) und es erfolgt eine Inversion von Teilstücken der Route. Da der Rechenaufwand mit zunehmendem k stark ansteigt, beschränkt man sich in der Regel auf Werte von $k = 2$ bzw. $k = 3$. Für eine detaillierte Beschreibung des Ablaufs mittels lexikographischer Suche siehe z.B. Kindervater und Savelsbergh [Kin97].

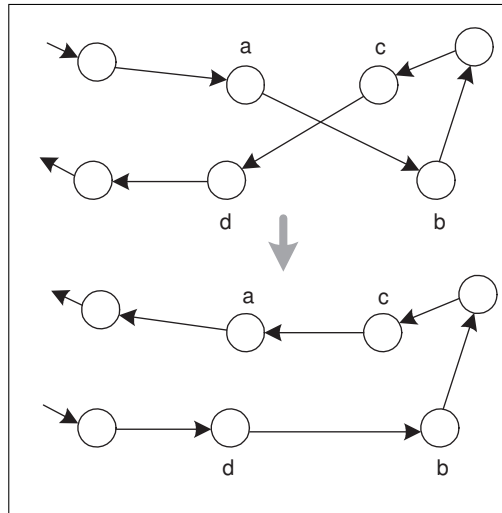


Abbildung 3.1: Exemplarischer 2-opt-Verbesserungsschritt

Eine Modifikation der 3-opt-Verfahren stellt das *Or-opt*-Verfahren dar, benannt nach Or [Or76]. Hierbei wird die Anzahl an Kunden in Teilstücken, die für eine Versetzung in Betracht gezogen werden, auf maximal drei benachbarte Kunden beschränkt und damit die Menge an möglichen Vertauschoperationen des 3-opt-Verfahrens stark eingeschränkt. Diese Reduktion erwies sich als vorteilhaft [Gol85]. Abbildung 3.2 zeigt hierzu ein Beispiel, bei dem das Teilstück (b, c) versetzt wird. Es werden dazu die Kanten (a, b) , (c, d) und (e, f) durch die Kanten (a, d) , (e, b) und (c, f) ersetzt. Eine Inversion der versetzten Teilstrecke kann, muss aber nicht evaluiert werden und wird v.a. bei asymmetrischen Distanzen oder Problemen mit Zeitfenstern aufgrund des Rechenaufwandes meist nicht durchgeführt.

Ein Verfahren, welches die Größe von k und damit die Zahl der zu ersetzenden Kanten bei einem k -opt-Verfahren im Laufe des Algorithmus variiert stammt

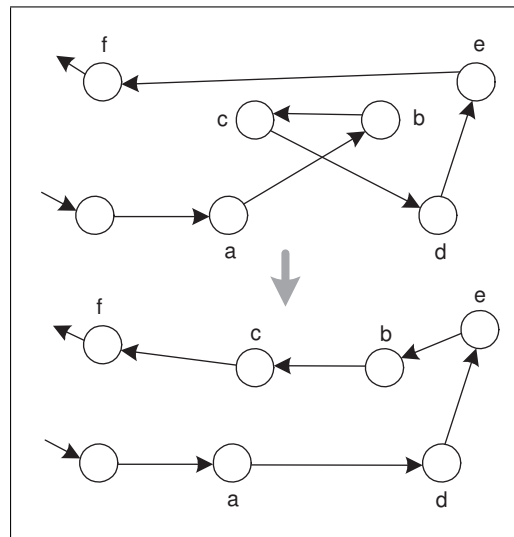


Abbildung 3.2: Exemplarischer Or-opt-Verbesserungsschritt

von Lin und Kernighan [Lin73]. Das Verfahren liefert sehr gute Ergebnisse [Joh97], wird jedoch im Rahmen von Metaheuristiken selten genutzt. Ein Grund hierfür könnte die schwierige Implementierung dieses Verfahrens sein. Auf eine Beschreibung sei an dieser Stelle verzichtet und auf die Originalquelle und z.B. Golden und Stewart [Gol85] verwiesen.

Als Repräsentant für Kombinationsverfahren sei das *GENIUS*-Verfahren von Gendreau, Hertz und Laporte [Gen92] genannt. Es untergliedert sich in einen Konstruktionsteil mit kombinierter Verbesserung GENI (Generalized Insertion) und einen anschließend durchgeführten Verbesserungsteil US (Unstringing). Anstelle der Evaluation einer Einfügung (wie z.B. bei cheapest insertion) lediglich zwischen zwei benachbarten Kunden der gegenwärtigen Tour, wird bei GENI eine Evaluierung zwischen zwei beliebigen, jedoch zum einzufügenden Kunden (in Bezug auf die Entfernung) benachbarten Kunden ausgeführt. Zugleich wird eine Auswahl von 4-opt-Verbesserungsschritten evaluiert. Nachdem eine initiale Rundreise konstruiert wurde, wird beim US-Verfahren ein Kunde temporär aus der Tour entfernt, ein Verbesserungsverfahren auf die reduzierte Tour angewendet und anschließend der entfernte Kunde erneut mittels GENI eingefügt. Nur falls dabei eine Verbesserung gefunden werden kann, wird die entstehende Tour tatsächlich umgesetzt. Das Verfahren endet, wenn alle Kunden evaluiert wurden und keine weitere Verbesserung erzielt werden kann.

Das GENIUS-Verfahren wurde in Gendreau et al. [Gen98a] für Probleme mit Zeitfenster erweitert und von Pesant, Gendreau und Rousseau [Pes97] mit Constraint Programming³ kombiniert, um eine Vielzahl von praxisnahen Restriktionen, wie z.B. multiple Zeitfenster oder Reihenfolge-Restriktionen der Kunden, berücksichtigen zu können. Für eine Beschreibung der z.T. komplexen Verfahren wird auf die Originalquellen verwiesen.

3.2 Bekannte Konstruktionsverfahren für das VRP

Im Folgenden werden die bekanntesten Konstruktionsheuristiken für das VRP geschildert. Für einen umfassenden Überblick zu diesem Themengebiet wird verwiesen auf Christofides [Chr85], Laporte [Lap92b], Fisher [Fis95], Domschke [Dom97], Laporte et al. [Lap00], Cordeau et al. [Cor02a], Laporte und Semet [Lap02] und Van Breedam [Bre02].

3.2.1 Savings-Algorithmus

Die wohl bekannteste VRP-Heuristik ist der *Savings*-Algorithmus von Clarke und Wright [Cla64]. Zu Beginn werden n Pendeltouren zwischen dem Depot und jedem Kunden gebildet. In jeder Iteration werden dann zwei Touren $T_1 = (v_0, \dots, v_i, v_0)$ und $T_2 = (v_0, v_j, \dots, v_0)$ zu einer Tour $T' = (v_0, \dots, v_i, v_j, \dots, v_0)$ verschmolzen solange die resultierende Tour T' zulässig ist und ein positiver Savings-Wert $s_{ij} = c(v_i, v_0) + c(v_0, v_j) - c(v_i, v_j)$ aus der Verschmelzung resultiert. Zwei Versionen des Verfahrens sind geläufig. In der *parallelen* Version wird jeweils die Verschmelzung mit dem größten Savings-Wert umgesetzt, in der *sequenziellen* Version werden Touren sukzessive aufgebaut. Üblicherweise wird ein 3-opt-Verfahren [Lin65] auf jede resultierende Tour angewendet. Laporte und Semet [Lap02] testeten diese Heuristik auf bekannten Benchmarkproblemen für das VRP und stellten

³ Zur Einführung in Techniken des Constraint Programming und dessen Verknüpfung mit Metaheuristiken wird verwiesen auf Focacci, Laburthe und Lodi [Foc03], De Backer et al. [Bac00] und Pesant und Gendreau [Pes99].

fest, dass das parallele Verfahren mit einer 3-opt Post-Optimierung deutlich bessere Ergebnisse erzielen kann, als die zugehörige sequenzielle Variante.

Verbesserungen des Verfahrens wurden z.B. von Nelson et al. [Nel85] und Paessens [Pae88] für die Speicherung der Savings-Werte vorgeschlagen. Auch empfehlen einige Autoren⁴ die Verwendung eines modifizierten Savings-Wertes der Form $s_{ij} = c(v_i, v_0) + c(v_0, v_j) - \gamma \cdot c(v_i, v_j)$ mit $\gamma \geq 0$, um die Bildung von peripheren, bogenförmigen Touren zu vermeiden, wie sie das Original-Verfahren tendenziell erzeugt [Cor02a]. Eine weitere Modifikation des Verfahrens besteht in der Verbesserung des Tour-Verschmelzungs-Prozesses mit Hilfe von *Matching*-Algorithmen. Vorschläge wurden hierzu von Desrochers und Verhoog [Des89], Altinkemer und Gavish [Alt91] und Wark und Holt [War94] gemacht. Letztere konnten deutliche Verbesserungen gegenüber der Original-Version des Savings Algorithmus erzielen, jedoch zu Lasten der Laufzeit und der Komplexität des Verfahrens.

Trotz den guten Ergebnissen die mit dem Savings-Algorithmus für das VRP erzielt werden können, liefert das Verfahren bei Vorliegen zusätzlicher Restriktionen nur Lösungen minderer Qualität [Sol87].

3.2.2 Sweep-Algorithmus

Eine weitere bekannte VRP-Heuristik ist der *Sweep*-Algorithmus, welcher allgemein Gillett und Miller [Gil74] zugesprochen wird, obwohl frühere Implementierungen bekannt sind (Wren [Wre71], Wren und Holliday [Wre72]). In diesem Verfahren werden Touren nacheinander konstruiert, indem die Kunden nach deren Polarwinkel zum Depot sortiert und dann nacheinander in der gegebenen Winkelreihenfolge zu einer Tour hinzugenommen werden, solange die Tour zulässig bleibt. Wird die Kapazität oder die Gesamtzeit der Tour überschritten, so wird eine neue Tour initialisiert, der zur Verletzung der Restriktion führende Kunde in diese neue Tour aufgenommen und mit der Einplanung fortgefahren bis alle Kunden einer Tour zugewiesen wurden. Die entstandenen Touren werden typischerweise mit einem 3-opt-Verfahren [Lin65] nachoptimiert. Gillett und Miller [Gil74] schlagen darüber hinaus vor,

⁴ Vgl. z.B. Gaskell [Gas67], Yellow [Yel70] sowie Golden, Magnanti und Nguyen [Gol77].

Kunden einer Tour auszutauschen, soweit damit eine Verbesserung erzielt werden kann. Die Sortierung der Kunden kann im oder gegen den Uhrzeigersinn und mit beliebig vielen, jedoch maximal n verschiedenen Startkunden ausgeführt werden. Das Verfahren liefert gute Ergebnisse für planare VRP-Probleme mit zentral gelegentlichem Depot, ist jedoch dem Savings-Algorithmus im Allgemeinen unterlegen [Cor02a].

Eine Erweiterung des Verfahrens stellen die so genannten *Petal*-Algorithmen dar, die eine Vielzahl von Touren unter Verwendung eines Sweep-Mechanismus generieren und daraus eine optimale Kombination mittels eines Set Partitioning-Algorithmus bilden (vgl. Foster und Ryan [Fos76], Ryan, Hjørting und Glover [Rya93] und Renaud, Boctor und Laporte [Ren96b]). Die Verfahren können gute Ergebnisse erzielen.

3.2.3 Generalized Assignment-Algorithmus

Die Generalized Assignment-Heuristik von Fisher und Jaikumar [Fis81] kann als zweistufiges Verfahren⁵ beschrieben werden. In einer ersten Phase werden Kunden durch Lösung eines Verallgemeinerten Zuordnungsproblems (Generalized Assignment Problem⁶, GAP) zu Cluster zusammengefasst und im Anschluss für jedes Cluster ein Rundreiseproblem gelöst. Die Anzahl an Cluster k entspricht den einzusetzenden Fahrzeugen und muss bei dieser Heuristik a priori vorgegeben werden. Zur Lösung eines GAP ist eine Kostenapproximation für die Zuordnung eines Kunden zu einem Cluster zu bestimmen. Fisher und Jaikumar [Fis81] schlagen hierfür eine geometrische Methode basierend auf der Aufteilung der Fläche in k Sektoren abhängig von den Kundengewichten vor. Seed-Punkte werden auf den Sektorhalbierenden gewählt und die Zuordnungskosten der Kunden zu den k Cluster bestimmen sich als die

⁵ Eine oftmals gewählte Klassifikation von VRP-Konstruktionsheuristiken unterscheidet cluster-first, route-second und route-first, cluster-second Verfahren, vgl. z.B. Laporte und Semet [Lap02] und Domschke [Dom97]. Da die Einstufung der Verfahren nicht immer eindeutig ist (vgl. z.B. Bem. 5.9 bei Domschke [Dom97, S. 241]), wird hier auf eine entsprechende Klassifikation der Algorithmen verzichtet. Das Verfahren von Fisher und Jaikumar [Fis81] wäre als cluster-first, route-second Verfahren einzustufen.

⁶ Vgl. z.B. Martello und Toth [Mar90] und Klose und Drexl [Klo02].

minimalen Einfügekosten in fiktive Pendeltouren vom Depot zu den Seed-Punkten. Das GAP wird mittels einer Lagrange-Heuristik⁷ und die zugehörigen Rundreiseprobleme mit einem exakten Verfahren gelöst.

Die Qualität des Verfahrens hängt stark von der Wahl der Seed-Punkte ab und es sind mehrere Durchläufe notwendig, um zufrieden stellende Ergebnisse zu erzielen [Cor02a]. Die von Fisher und Jaikumar [Fis81] auf bekannten Benchmarkproblemen erzielten Ergebnisse sind aufgrund unbekannter Rundungsgenauigkeiten nicht zu bestätigen⁸ [Cor02a]. Bramel und Simchi-Levi [Bra95] schlagen eine alternative Seed-Selektion vor, indem sie ein kapazitätsbeschränktes Standortproblem⁹ lösen. Dieser Ansatz unterliegt anderen Heuristiken hinsichtlich der erreichten Lösungsgüte [Lap00]. Baker und Sheasby [Bak99] erweitern die Heuristik, indem sie die gewählten Seed-Punkte adjustieren um den Zielfunktionswert des zugehörigen GAP zu minimieren. Damit konnten gute Ergebnisse erzielt werden, jedoch erfolgt lediglich ein Vergleich auf Testdaten mit reiner Kapazitätsbeschränkung. Wie eine mögliche Beschränkung der Gesamteinsatzzeit eines Fahrzeuges zu berücksichtigen ist, bleibt -wie auch bei Fisher und Jaikumar [Fis81] und Bramel und Simchi-Levi [Bra95]- unklar. Baker und Shealby [Bak99] schlagen vor, im Anschluss an die Heuristik zur Eliminierung verletzter Restriktionen eine lokale Nachbarschaftssuche¹⁰ durchzuführen. Ergebnisse werden jedoch nicht aufgeführt.

3.3 Bekannte Konstruktionsverfahren für das TTRP

In Kapitel 2.3.3.3 wurde ein Literaturüberblick zu Lösungstechniken für das TTRP und den zum TTRP verwandten Problemstellungen gegeben. In diesem Kapitel sollen die verwendeten Konstruktionsheuristiken -soweit sie auf

⁷ Zur Technik der Lagrange-Relaxation vgl. z.B. Beasley [Bea93].

⁸ Vgl. die mit Gesamtdistanz 848 angegebene Lösung zu Christofides, Mingozzi und Toth [Chr79b] Testproblem C14. Die derzeit beste, nachweisbar bekannte Lösung hat eine Gesamtdistanz von 866,37 [Tai93, Cor02a].

⁹ Vgl. Brandeau und Chiu [Bra89].

¹⁰ Vgl. Kapitel 4.1.1.

das TTRP übertragbar sind- geschildert werden. Da das Modell von Gerdesen [Ger96] stark vom TTRP abweicht, wird auf die zugehörigen Verfahren nicht weiter eingegangen. Für die Verfahren von Semet und Taillard [Sem93] und Semet [Sem95] wird an dieser Stelle noch einmal ausdrücklich auf die vom TTRP abweichenden Problemstellungen hingewiesen, vgl. Kapitel 2.3.3.3.

3.3.1 Verfahren von Semet und Taillard

Semet und Taillard [Sem93] skizzieren einen dreistufigen Ansatz zur Lösung des von ihnen behandelten Problems. In einem ersten Schritt werden alle VC-Kunden („trailer-stores“) in Maintouren eingeplant, indem für alle verfügbaren Anhänger (die in diesem Schritt mit Fahrzeuge assoziiert werden) ein VRP mittels der Fisher und Jaikumar-Heuristik¹¹ [Fis81] gelöst wird. Reicht die Anzahl der Anhänger nicht aus, um alle VC-Kunden bedienen zu können, so werden Zugfahrzeuge hinzugenommen, die den Anhängern zugeteilt werden. Im zweiten Schritt werden jedem VC-Kunden die nächstgelegenen¹² TC-Kunden („truck-stores“) initial zugeteilt. Es folgt eine lokale Nachbarschaftssuche¹³, die die Kapazitätsüberschreitungen¹⁴ von Subtouren abbauen soll, ohne dass zulässige Subtouren unzulässig werden. Es wird dabei ein clusterbasiertes Maß für die Nähe und Kompaktheit zweier Subtouren verwendet. In einem letzten Schritt wird für die noch unzugeordneten¹⁵ TC-Kunden ein VRP mit den verbleibenden Zugfahrzeugen gelöst. Die resultierenden Routen werden ohne Anhänger gefahren.

Die Aussage der Autoren, die Methode konstruiere stets eine zulässige Lösung wenn Zeitfenster außer Acht gelassen werden [Sem93, S. 472], kann aufgrund zum Teil ungenauer Angaben nicht bestätigt werden. Insbesondere da eine Obergrenze an maximal verfügbaren Zugfahrzeugen und Anhängern existiert, erscheint diese allgemeingültig formulierte Aussage fraglich.

¹¹ Die Autoren modifizieren die Wahl der Seed-Punkte und berücksichtigen die heterogene Fahrzeugflotte. Zur Originalheuristik vgl. Kapitel 3.2.3.

¹² Eine genauere Spezifikation wird von den Autoren nicht gemacht.

¹³ Vgl. Kapitel 4.1.1.

¹⁴ Aufgrund der heterogenen Fahrzeugflotte wird das größte Zugfahrzeug, das den zugehörigen Root anfahren kann, zugrunde gelegt.

¹⁵ Es wird angenommen, dass in Schritt 2 nur zulässige Routen gebildet werden. Es erfolgt hierzu keine Aussage.

3.3.2 Verfahren von Semet

Semet [Sem95] schlägt einen zweistufigen Ansatz basierend auf der Methode von Fisher und Jaikumar¹⁶ [Fis81] vor. In der ersten Phase erfolgt eine simultane Zuordnung der Kunden und Anhänger zu den Zugfahrzeugen, von denen angenommen wird, dass alle eingesetzt werden. In der zweiten Phase wird für jedes Fahrzeug mit Anhänger eine CVR sowie für jedes Fahrzeug ohne Anhänger eine Rundreise konstruiert.¹⁷ Der Artikel konzentriert sich auf die erste Phase dieses Ansatzes und beschreibt zur Lösung des Kunden- und Anhänger-Zuordnungsproblems einen Branch-and-Bound Algorithmus, bei dem untere Schranken mittels einer Lagrange-Relaxation bestimmt werden. Für eine genaue Beschreibung wird auf Semet [Sem95] verwiesen. An dieser Stelle sei lediglich die Wahl der Seed-Kunden und die Kostenapproximation für die Zuordnung der Kunden zu den Fahrzeugen skizziert.

Zu Beginn wird der am weitesten vom Depot entfernte VC-Kunde als Seed-Kunde gewählt und es wird sukzessive derjenige VC-Kunde in die Menge der Seed-Kunden S aufgenommen, der eine gewichtete Summe aus der Distanz zum nächstgelegenen Seed-Kunden in S und der durchschnittlichen Distanz zu allen anderen Seed-Kunden in S maximiert. Jeder Seed-Kunde steht dabei repräsentativ für ein Zugfahrzeug und es werden genau so viele Seed-Kunden wie vorhandene Zugfahrzeuge gewählt. Die Zuordnungskosten zu den Zugfahrzeugen werden abhängig vom Kundentyp festgelegt. Für VC-Kunden werden die minimalen Einfügekosten in fiktive Pendeltouren vom Depot zu den Seed-Punkten bestimmt. Ebenso für TC-Kunden bei Zuordnung zu Fahrzeugen ohne Anhänger. Soll ein TC-Kunde hingegen einem Fahrzeug mit Anhänger zugeordnet werden, so werden die Zuordnungskosten bestimmt, indem die Summe aus einer Pendeltour vom TC-Kunden zu einem Root-Kandidaten und der günstigsten Einfügung dieses Root-Kandidaten in eine fiktive Pendeltour vom Depot zum Seed-Kunden dieses Fahrzeuges evaluiert wird. Hierbei werden alle Root-Kandidaten (ohne den Seed-Kunden des Fahrzeuges) betrachtet und die minimal anfallenden Kosten gewählt. Für die Zuordnung eines TC-Kunden werden also höhere Kosten verrechnet, sobald

¹⁶ Vgl. Kapitel 3.2.3.

¹⁷ Zur Konstruktion der CVR-Routen verweist der Autor auf Heuristiken von Semet und Loewenton [Sem92].

der Einsatz eines Anhängers notwendig wird. Dadurch wird versucht, die Anzahl der einzusetzenden Anhänger zu minimieren.

3.3.3 Verfahren von Chao

Chao [Cha02] konstruiert einen TTRP-Tourenplan mittels eines dreistufigen Verfahrens, bestehend aus einer Zuordnung der Kunden zu Fahrzeugen, einer Bildung der Routen und einem Verbesserungsverfahren. Die ersten beiden Phasen folgen der Idee von Fisher und Jaikumar¹⁸ [Fis81]. Entsprechend wird auch in dieser Heuristik die einzusetzende Anzahl an Fahrzeugen vorausgesetzt und im Gegensatz zum Verfahren von Semet [Sem95] sind die verfügbaren Anhänger bereits fix einem Fahrzeug zugeordnet. Für jedes Fahrzeug mit und ohne Anhänger wird genau ein Kunde als Seed-Punkt der zugehörigen Route gewählt. Nach der Wahl eines initialen Seed-Kunden werden die weiteren Seed-Kunden sukzessive als diejenigen Kunden mit dem größten Abstand von allen bereits gewählten Seed-Kunden und dem Depot bestimmt. Eine Variation des ersten Seed-Kunden kann zu einer anderen Auswahl an Seed-Kunden und damit ggf. zu einer anderen Lösung führen. Diese Tatsache wird genutzt, um zehn verschiedene Lösungen zu generieren, aus denen die Beste gewählt wird.¹⁹ Als initialen Seed wählt Chao sukzessive den am weitesten vom Depot entfernten Kunden, den am zweitweitesten entfernten Kunden und so fort. Die Zuordnungskosten werden unabhängig vom Kundentyp, wie beim Verfahren von Fisher und Jaikumar [Fis81], angenommen. Das Zuordnungsproblem wird mit relaxierten Wertebereichen für die Variablen gelöst und heuristisch eine eindeutige Kundenzuordnung bestimmt. Dies kann zu Kapazitätsüberschreitungen einzelner Routen führen. Nach der Zuordnung erfolgt eine Konstruktion der Routen. Für Fahrzeuge ohne Anhänger werden Rundreiseprobleme über alle zugeteilten Kunden, für Fahrzeuge mit Anhänger lediglich über alle zugeteilten VC-Kunden gelöst. Die verbleibenden TC-Kunden eines Fahrzeuges mit Anhänger werden sukzessive in existierende oder neue Subtouren zu Root-Kandidaten der zugehörigen Main-

¹⁸ Vgl. Kapitel 3.2.3.

¹⁹ Chao [Cha02] gibt allerdings nur die Durchschnittswerte aus den zehn Durchläufen und nicht die beste Lösung an.

tour eingefügt. Hierbei werden Subtours (im Hinblick auf die Kapazität des Zugfahrzeuges) stets zulässig gehalten. Alle VC-Kunden einer CVR befinden sich nach diesem Schritt auf einer Maintour. Es schließt sich ein Verbesserungsverfahren²⁰ an, bei dem ein Kunde in eine andere existierende Tour verschoben oder mit einem Kunden einer anderen Tour ausgetauscht wird, sofern dies zu einer Verbesserung der Gesamtdistanz oder einer Reduktion der Gesamtüberkapazität führt und dabei kein Aufbau keine neuen bzw. eine Erhöhung einer existierenden Überkapazität in einer anderen Tour der Lösung erfolgt. Hierbei können VC-Kunden auch in Subtours, TC-Kunden jedoch nie in CVR-Maintours verschoben werden. Kann dadurch keine Verbesserung mehr erzielt werden, so wird für jede Subtour eine bessere Anbindung an einen alternativen Root-Kandidaten der eigenen CVR-Maintour evaluiert. Diese Verbesserungsschritte werden solange wiederholt, bis dabei keine Verbesserung mehr erzielt werden kann. Ansonsten wird auf jede existierende Tour eine 2-opt-Heuristik [Lin65] angewendet und das Verfahren endet.

3.4 Das neue TTRP-Konstruktionsverfahren T-Cluster

Das neue TTRP-Konstruktionsverfahren *T-Cluster* kann als ein clusterbasiertes sequenzielles Einfügeverfahren charakterisiert werden, bei dem Routen sukzessive bis zum Erreichen der Gesamtkapazitätsgrenze oder der maximalen Gesamtdauer aufgebaut werden. Eine neue Route wird immer mit dem noch unzugeordneten (Seed-)Kunden, der am weitesten vom Depot entfernt liegt und mit demjenigen noch unverplanten Fahrzeug, das die größte Gesamtkapazität aufweist, initialisiert. Hierbei sind Anhänger bereits fix den Zugfahrzeugen zugeordnet, so dass Fahrzeuge mit Anhänger immer Fahrzeugen ohne Anhänger bevorzugt werden. Der Seed-Kunde wird in eine Pendeltour zum Depot eingefügt. Diese ist für Fahrzeuge mit Anhänger die Maintour der CVR, falls der Seed-Kunde ein VC-Kunde ist und eine Subtour zum Depot, falls der Seed-Kunde vom Typ TC ist. Für Fahrzeuge ohne Anhänger

²⁰ Das Verbesserungsverfahren entspricht grundsätzlich der Descent-Phase in der Tabusuche von Chao [Cha02], vgl. Kapitel 4.2.12.

entfällt diese Unterscheidung. Nachdem eine Route durch den Seed-Kunden u initialisiert wurde, wird derjenige Kunde k aus allen noch unzugeordneten Kunden als nächstes eingefügt, der $e(k) = c_{ku} + c_{kf} - \pi \cdot c_{0k}$ minimiert. Dabei spezifiziert k den betrachteten Kunden, f den zu k nächstgelgenden und bereits dieser Route zugewiesenen Kunden und 0 das Depot. Für einen Kunden k kann die Funktion wie folgt interpretiert werden: Der erste Term misst die Entfernung zum Seed-Kunden u dieser Route. Diese Distanz sollte gering sein, um kompakte Routen zu gewährleisten. Der zweite Term stellt sicher, dass der Kunde nahe am „Rand“ der betrachteten Route liegt. Dies wurde insbesondere bei geclusterten Testdaten als wichtiger Bestandteil ermittelt, bei denen eine Route bevorzugt zuerst alle Kunden eines Clusters vollständig beinhalten soll, bevor eine (kostenintensive) Ausdehnung auf ein anderes Kunden-Cluster erfolgt. Der dritte Term kann als Diversifikations-Bestandteil erachtet werden. Eine Variation des Parameters π führt zu unterschiedlichen Auswahlstrategien: Je größer der Wert von π , desto größer ist die Tendenz, dass ein Kunde weiter entfernt vom Depot ausgewählt wird; es resultieren eher periphere Routen. Je kleiner der Wert, desto näher liegt der Kunde am Depot. Nachdem der als nächstes einzufügende Kunde bestimmt ist, wird für diesen Kunden eine zulässige Einfügung in die aktuelle Route mittels *cheapest insertion*²¹ evaluiert. Für Fahrzeuge mit Anhänger werden VC-Kunden stets in die (ggf. noch leere) CVR-Maintour und TC-Kunden stets in eine neue oder eine existierende Subtour eingefügt. Hierbei steht jeder sich aktuell auf der Maintour befindliche VC-Kunde und das Depot als Root-Kandidat für eine neue Subtour zur Verfügung. Eine Überschreitung der Zugfahrzeugkapazität ist bei Einfügung eines TC-Kunden in eine existierende CVR-Subtour (mit Ausnahme der letzten Route, s.u.) nicht zulässig. Für Fahrzeuge ohne Anhänger werden beide Kundentypen in die aufzubauende PTR-Route aufgenommen; Subtouren sind nicht möglich. Falls die Einfügung zu einer Verletzung der Gesamtkapazität oder der Gesamtdauer der Route führen würde, wird die Einfügung dieses Kunden verworfen und es wird eine neue Route initialisiert. Ansonsten wird der Kunde entsprechend kostenminimal eingefügt und es wird der nächste einzufügende Kunde bestimmt. Lediglich für die letzte Route (respektive für das letzte vorhandene Fahrzeug) werden die

²¹ Vgl. Kapitel 3.1.

Zulässigkeitsbedingungen hinsichtlich Gesamteinsatzdauer und Kapazitätsbeschränkung der Route (und der Subtouren im Falle einer CVR) relaxiert, um alle verbleibenden Kunden in diese letzte Route aufnehmen zu können. Alle anderen Routen sind laut Konstruktionsvorschrift stets zulässig. Nach jeder Einfügung in eine existierende Tour erfolgt eine Post-Optimierung der betroffenen Tour mittels eines 2-opt- und Or-opt-Verbesserungsverfahrens²² und es wird die Neuansbindung von Subtouren (Subtour Root Refining) evaluiert.

Das *Subtour Root Refining* versucht, für CVR-Subtouren eine bessere Anbindung an einen alternativen Root-Kandidaten der eigenen Maintour zu finden und kann infolgedessen nicht auf PTR-Routen angewendet werden. Im Rahmen der Konstruktionsheuristiken wird das Subtour Root Refining bei Einfügung eines VC-Kunden in die Maintour stets für alle existierenden Subtouren dieser Route evaluiert, um die bestmögliche Anbindung der Subtouren zu gewährleisten. Es wird hingegen lediglich auf die betroffene Subtour angewendet, wenn der eingefügte Kunde vom Typ TC ist. Das Subtour Root Refining vollzieht sich wie in Abbildung 3.3 dargestellt: Zuerst werden die beiden Verbindungen vom und zum aktuellen Root entfernt (Kanten (b,c) und (f,b)) und eine direkte Verbindung des resultierenden ersten und letzten Kunden der Subtour eingefügt (Kante (f,c)). Diese temporäre Subtour (c-d-e-f-c) wird aufgrund der Struktur als *Subtour-Ring* bezeichnet. Anschließend wird das Depot und jeder VC-Kunde der Maintour mit Ausnahme des ursprünglichen Roots als neuer Root evaluiert. Hierzu wird die beste Einfügeposition des Root-Kandidaten mittels cheapest insertion [Joh85] vor und nach jedem Kunden des Subtour-Rings betrachtet. Die beste alternative Anbindung wird realisiert, falls damit eine Reduktion der Gesamtdistanz (und damit auch der Gesamtdauer) der Route erzielt werden kann (vgl. Abbildung 3.3: Verbesserung durch Neuansbindung an Root-Kandidaten g). Die modifizierte Subtour wird mit einem 2-opt- und Or-opt-Verfahren²³ nachgebessert.

Die Heuristik ist als Multi-Start-Verfahren konzipiert. Hierbei wird das Verfahren für verschiedene Werte von π ausgeführt und die beste gefundene Lösung respektive die Lösung mit der geringsten Gesamtüberkapazität und

²² Vgl. Kapitel 3.1.

²³ Vgl. Kapitel 3.1.

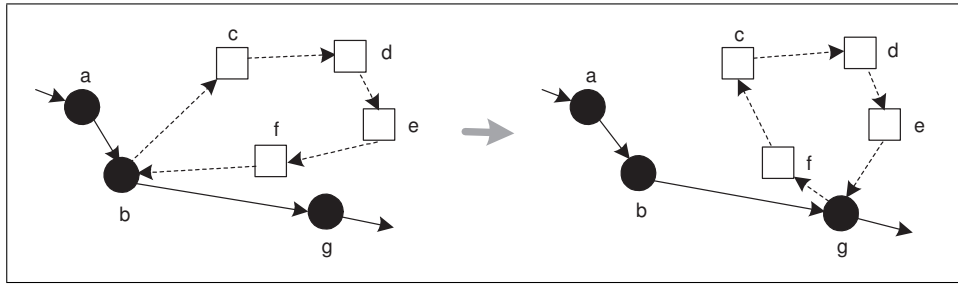


Abbildung 3.3: Exemplarisches Subtour Root Refining

bei Mehrdeutigkeit der geringsten Gesamtdistanz ausgewählt. Auf bekannten TTRP-Testdaten²⁴ wurden verschiedene Werte für π evaluiert. Die besten Ergebnisse konnten für Werte von π im Intervall $[-1,5 ; 3,0]$ erzielt werden. Hierbei wird das Verfahren beginnend mit $\pi = -1,5$, einem Inkrement von $+0,1$ und endend bei $\pi = +3,0$ insgesamt 46-mal durchlaufen.

3.5 Das neue TTRP-Konstruktionsverfahren T-Sweep

Die neue TTRP-Konstruktionsheuristik *T-Sweep* basiert auf dem klassischen Sweep Algorithmus für VRP-Probleme wie er in Kapitel 3.2.2 beschrieben ist. Das Verfahren konstruiert Routen, indem ein Strahl ausgehend vom Depot gegen den Uhrzeigersinn rotiert wird und graduell Kunden in der Reihenfolge ihrer Polarwinkel in die aktuelle Fahrzeugroute eingefügt werden. Wird die Gesamtkapazität oder die maximale Gesamteinsatzdauer eines Fahrzeuges überschritten, so wird mit dem einzufügenden Kunden und dem noch uneingeplanten Fahrzeug mit der größten Gesamtkapazität eine neue Route initialisiert. Anhänger sind hierbei fix den vorhandenen Fahrzeugen zugeordnet und Fahrzeuge mit Anhänger werden stets bevorzugt gewählt. Falls keine weiteren Fahrzeuge zur Verfügung stehen, so wird die aktuelle Route solange erweitert, bis alle Kunden zugeordnet sind. Ausschließlich die letzte Route kann hinsichtlich der Kapazitäts- und Zeitbeschränkungen unzulässig werden. Die Evaluation der Einfügepositionen, einschließlich der vom Kunden-

²⁴ Vgl. Kapitel 2.3.3.2.

typ abhängigen Einfügerestriktionen, und die Post-Optimierung nach einer Einfügung erfolgt in gleicher Weise wie beim T-Cluster-Verfahren²⁵.

T-Sweep wird n -mal gestartet²⁶, wobei jeder Kunde genau einmal als Seed-Kunde für die erste Route fungiert. Die beste der ermittelten Lösungen wird ausgewählt.

3.6 Vergleich der TTRP-Konstruktionsverfahren anhand bekannter Benchmarkprobleme

Zur Evaluierung der neuen TTRP-Konstruktionsheuristiken T-Cluster und T-Sweep wurden Testläufe auf Benchmarkproblemen aus der Literatur durchgeführt und die Lösungen mit dem Verfahren von Chao [Cha02] verglichen.²⁷ Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.1 zusammengestellt. Für die Konstruktionsheuristik von Chao²⁸ werden die Werte mit und ohne das im Anschluss an die ersten beiden Konstruktionsschritte durchgeführte Verbesserungsverfahren [Cha02, S. 48] angegeben. Für eine Beschreibung der Testprobleme wird auf Kapitel 2.3.3.2 verwiesen. Soweit verfügbar, ist für jedes Verfahren die Gesamtdistanz $c(s)$, die Überkapazität $q(s)$ und die Gesamtzeit T in Sekunden auf einem Pentium IV mit 1,5 GHz sowie in der äußersten rechten Spalte die Gesamtdistanz der besten bekannten Lösung $c(s^{**})$ für jedes der 21 TTRP-Testprobleme aufgeführt. Für die Verfahren von Chao [Cha02] sind keine Zeitangaben verfügbar. Die letzten beiden Zeilen zeigen die Durchschnittswerte (Avg) und die durchschnittliche relative prozentuale Abweichung (ARPD) zur besten bekannten Lösung. Es gilt anzumerken, dass Chao ausschließlich die durchschnittlichen Werte aus zehn Durchläufen angibt, wohingegen für T-Cluster und T-Sweep die Werte der besten Lösungen

²⁵ Vgl. Kapitel 3.4.

²⁶ Die Festlegung einer restriktiveren Obergrenze für die Anzahl an Durchläufen kann bei größeren Problem Datensätzen vorteilhaft sein, da die Laufzeit des Verfahrens dadurch reduziert wird.

²⁷ Für die Verfahren von Semet und Taillard [Sem93] und Semet [Sem95] liegen keine vergleichbaren Testergebnisse vor.

²⁸ Vgl. Kapitel 3.3.3.

aufgeführt sind, wie sie nach Durchführung der Multi-Starts²⁹ als Startlösung an die Tabusuche übergeben werden.³⁰ Weiterhin gilt es zu beachten, dass bei allen Konstruktionsverfahren die Einplanung der VC-Kunden in CVR-Maintouren oder PTR-Routen erzwungen wird, diese Restriktion im Verbesserungsverfahren von Chao allerdings aufgehoben ist.

Abbildung 3.4 zeigt die mit T-Cluster und T-Sweep ermittelten Lösungen für das TTRP-Testproblem T2. Beide Lösungen sind zulässig mit Gesamtdistanzen von 697,51 (T-Cluster, links) und 722,46 (T-Sweep, rechts). Alle VC-Kunden befinden sich laut Konstruktionsvorschrift auf einer PTR oder einer CVR-Maintour. Bei T-Cluster wurden die drei vorhandenen CVR-Routen mit dem (in dieser Reihenfolge) am weitesten vom Depot entfernten Kunden in der oberen rechten Ecke, in der unteren linken Ecke und der unteren rechten Ecke initialisiert und dann die beiden PTR-Routen beginnend mit der äußeren Route aufgebaut. Die Lösung, die mittels T-Sweep erzeugt wurde, zeigt die für den Sweep-Algorithmus typische Blütenblattstruktur der Routen und wurde als beste aus n Durchläufen ermittelt.

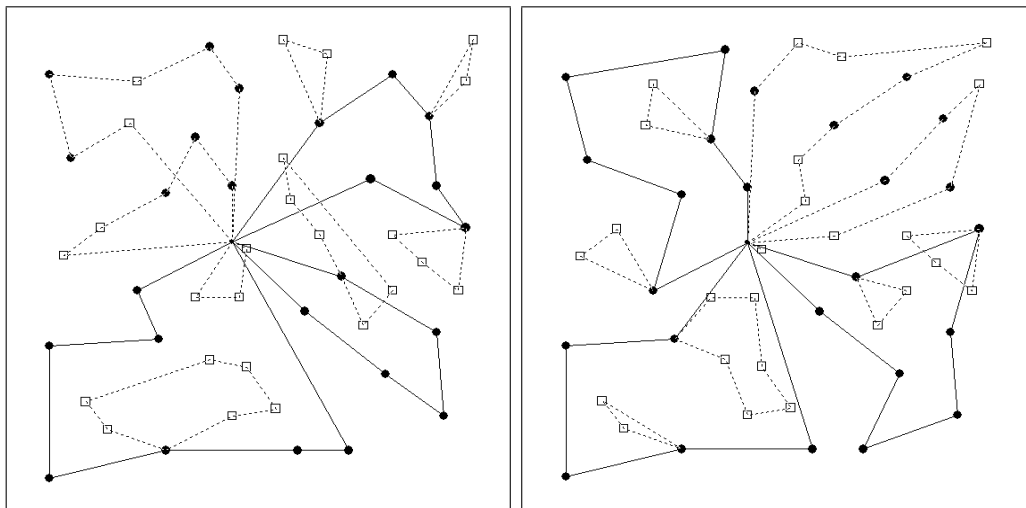


Abbildung 3.4: Lösungen der Heuristiken T-Cluster (links) und T-Sweep (rechts) zu TTRP-Testproblem T2

²⁹ T-Cluster wird 46-mal, T-Sweep n -mal durchlaufen, vgl. die Kapitel 3.4 und 3.5.

³⁰ Die Angabe der Mittelwerte wäre für die neuen Konstruktionsheuristiken unzutreffend, da sie speziell als Multi-Start-Verfahren konzipiert sind.

Tabelle 3.1: Vergleich der Konstruktionsheuristiken

ID	T-Cluster			T-Sweep			Chao ohne Verb.		Chao mit Verb.		$c(s^{**})$
	$c(s^*)$	$q(s^*)$	T	$c(s^*)$	$q(s^*)$	T	$c(s^*)$	$q(s^*)$	$c(s^*)$	$q(s^*)$	
T1	651,87	0,0	0,33	644,80	0,0	0,30	657,15	9,6	646,02	0,0	564,68
T2	697,51	0,0	0,27	722,46	0,0	0,23	739,04	13,9	739,90	0,0	612,75
T3	766,25	0,0	0,25	797,65	0,0	0,23	785,54	16,8	774,78	0,0	618,04
T4	979,79	0,0	0,45	901,78	26,0	0,56	937,82	26,0	943,47	0,0	798,53
T5	1037,50	0,0	0,42	1035,76	32,0	0,55	1108,87	22,9	1130,85	0,0	839,62
T6	1173,11	0,0	0,41	1171,99	52,0	0,55	1174,17	32,1	1236,69	0,0	933,26
T7	904,77	0,0	1,09	901,14	0,0	1,88	937,31	14,1	906,31	0,0	830,48
T8	965,90	0,0	1,00	1005,99	0,0	1,63	1004,45	18,5	971,60	0,0	878,36
T9	1081,21	0,0	0,94	1099,88	0,0	1,45	1156,50	45,6	1106,66	0,0	934,47
T10	1167,38	0,0	1,83	1150,42	0,0	4,84	1232,10	33,6	1159,78	0,0	1039,07
T11	1274,67	0,0	1,94	1288,49	0,0	3,94	1422,41	38,0	1288,74	0,0	1094,11
T12	1438,11	0,0	1,69	1443,00	0,0	3,77	1578,79	34,0	1453,82	0,0	1155,13
T13	1485,67	0,0	2,72	1482,02	0,0	7,91	1624,16	35,3	1481,40	0,0	1287,18
T14	1611,99	0,0	2,67	1658,55	0,0	7,42	1760,51	37,1	1624,96	0,0	1353,08
T15	1748,31	0,0	2,66	1892,89	0,0	7,42	2105,02	33,6	1858,87	0,0	1457,61
T16	1055,23	0,0	1,98	1383,57	0,0	3,53	1288,48	10,3	1267,87	0,0	1002,49
T17	1117,22	0,0	1,64	1416,14	0,0	3,31	1314,09	9,4	1261,17	0,0	1042,35
T18	1216,24	0,0	1,77	1614,11	0,0	2,91	1383,19	10,8	1366,21	0,0	1129,16
T19	874,04	0,0	0,86	919,59	0,0	1,34	1146,74	22,0	969,96	0,0	813,50
T20	950,72	0,0	0,78	972,76	0,0	1,24	1144,96	24,0	1140,47	0,0	848,93
T21	1009,38	0,0	0,75	1096,08	0,0	1,31	1263,70	57,0	1174,43	0,0	909,06
Avg	1105,09	0,0	1,26	1171,38	5,24	2,68	1226,90	25,93	1166,86	0,0	959,14
ARPD	15,22	-	-	22,13	-	-	27,92	-	21,66	-	0,00

Die Ergebnisse der Testläufe lassen darauf schließen, dass die neue Heuristik T-Cluster den anderen Verfahren bezüglich der erreichten Lösungsqualität überlegen ist. T-Cluster findet zulässige Lösungen zu allen 21 Testproblemen und erzielt die geringste durchschnittliche Gesamtdistanz und den geringsten ARPD-Wert von 15,22. Im Vergleich liefert T-Sweep zulässige Lösungen zu 18 der 21 Testinstanzen, wohingegen das Konstruktionsverfahren von Chao scheinbar erst nach Durchführung eines lokalen Verbesserungsverfahrens zulässige Lösungen ermitteln kann. Trotz des Verbesserungsverfahrens, bei dem auch eine Einplanung von VC-Kunden in CVR-Subtouren zulässig ist, sind die zugehörigen (durchschnittlichen) Lösungen von Chao jedoch schlechter im Vergleich zu den T-Cluster-Lösungen. Ohne Verbesserungsverfahren weist die Heuristik von Chao eine relativ hohe durchschnittliche Gesamtdistanz und Überkapazität auf. T-Sweep liefert ebenfalls gute Ergebnisse, kann jedoch, trotz der verwendeten (unter Beibehaltung der Drehrichtung) maximal möglichen Anzahl von n Durchläufen, die Lösungsqualität der T-Cluster Heuristik nicht erreichen. Des Weiteren hat T-Sweep den Nachteil, dass die Anzahl der Durchläufe und damit die Laufzeit des Verfahrens mit der Anzahl an Kunden ansteigen, wie z.B. bei den größeren Testproblemen T13-T15 mit je 199 Kunden ersichtlich ist. So ergeben sich durchschnittliche Rechenzeiten von 1,26 Sekunden bei T-Cluster und 2,68 Sekunden bei T-Sweep. Ein Vergleich der Rechenzeiten mit der Methode von Chao ist nicht möglich, da keine Zeitangaben verfügbar sind.

Besonders hervorzuheben sind die, im Vergleich mit den anderen Verfahren, guten Ergebnisse von T-Cluster bei den geclusterten Testproblemen T16-T21. Dies lässt darauf schließen, dass die Distanz zum nächsten Routenmitglied in der Auswahlstrategie des als nächstes einzufügenden Kunden eine wertvolle Komponente darstellt. Weiterhin wird angenommen, dass sich bei T-Cluster insbesondere die Einplanung der großen Fahrzeuge respektive der Fahrzeuge mit Anhänger im Außenbereich des Planungsgebietes positiv auf die Gesamtdistanz auswirkt, da weniger kostenintensive Rückfahrten zum Depot notwendig sind. Für die in den Kapiteln 5 bis 7 vorgestellten neu entwickelten Tabusuche-Heuristiken wird daher das T-Cluster Verfahren zur Konstruktion einer Startlösung verwendet.

Kapitel 4

Tabusuche-Heuristiken für Tourenplanungsprobleme

Die Metaheuristik Tabusuche wurde erstmalig 1986 von Glover [Glo86] vorgestellt und seitdem auf zahlreiche kombinatorische Optimierungsprobleme erfolgreich angewendet. Im Folgenden soll eine kurze Einführung in die Grundtechniken der Tabusuche erfolgen. Im Anschluss daran werden renommierte Tabusuche-Heuristiken für Tourenplanungsprobleme vorgestellt und verglichen und die Tabusuche im Kontext alternativer Metaheuristiken betrachtet.

4.1 Die Metaheuristik Tabusuche

4.1.1 Grundlagen lokaler Suchverfahren

Heuristiken, d.h. approximative Lösungstechniken, wurden seit jeher zur Lösung schwieriger kombinatorischer Optimierungsprobleme verwendet. Populär waren und sind v.a. Verbesserungsverfahren basierend auf Techniken der *lokalen Suche*. Ein lokale Suche kann als iteratives Verfahren beschrieben werden, das -ausgehend von einer initialen zulässigen Lösung- eine Lösung durch progressive Anwendung lokaler Transformationen, sog. *Moves*, verbessert. Hierbei wird in jeder Iteration stets von der vorliegenden Lösung s zu einer besseren zulässigen Lösung \bar{s} in der Nachbarschaft $N(s)$ der Lösung s

übergegangen. Als *Nachbarschaft* $N(s)$ einer Lösung s wird die Menge aller Lösungen bezeichnet, die durch Anwendung der gegebenen Transformationen erreicht werden können. Das heißt, dass der Unterschied zwischen den Lösungen s und $\bar{s} \in N(s)$ genau einer der möglichen Transformationen entspricht.

Der generelle Ablauf einer lokalen Suchheuristik, bei der stets die beste Nachbarlösung umgesetzt wird, ist in Tabelle 4.1 für ein Minimierungsproblem dargestellt. Das skizzierte Verfahren stoppt, wenn durch Anwendung der zugrunde gelegten Transformationen keine verbessernde Lösung mehr gefunden werden kann. Lokale Suchverfahren, die keine Verschlechterung der Zielfunktion erlauben, werden auch als *Descent*-Verfahren bezeichnet. Die resultierende Lösung entspricht dann einem *lokalen Optimum* bezüglich der zugrunde liegenden Nachbarschaft.

Tabelle 4.1: Funktionsweise einer Descent-Heuristik

Eingabe: Initiale zulässige Lösung s mit Zielfunktionswert $f(s)$.

Ausgabe: Beste gefundene Lösung s^* mit Zielfunktionswert $f(s^*)$.

1. Initialisierung

Setze $s^* := s$.

2. Lokale Suche

(a) Bestimme die Nachbarlösung $s' \in N(s)$ für die gilt:

$$f(s') = \min_{\bar{s} \in N(s)} f(\bar{s}).$$

(b) Falls $f(s') < f(s)$, setze $s^* := s'$ und $s := s'$, und gehe zu (a);

Ansonsten beende die Suche.

Als Beispiel einer Descent-Heuristik seien die bekannten und in Kapitel 3.1 bereits angesprochenen k -opt-Verbesserungsverfahren [Lin65] für das Rundreiseproblem¹ (Traveling Salesman Problem) genannt. Bei den k -opt-Verfahren besteht eine Transformation aus dem Ersetzen von bis zu k Kanten der Rundreise durch andere Kanten. Abhängig von k wird die Rundreise dann

¹ Vgl. Kapitel 2.1.1.

als k -optimal bezeichnet [Lin65]. Da der Rechenaufwand mit zunehmendem k stark ansteigt, beschränkt man sich in der Regel auf Werte von $k = 2$ bzw. $k = 3$. Dadurch ist das Erreichen der bestmöglichen Lösung, d.h. eines sog. *globalen Optimums*, jedoch nicht mehr sichergestellt.

Allgemein gilt, dass die Qualität der durch Descent-Verfahren ermittelten besten Lösung stark von der Definition der Nachbarschaft und der initialen Startlösung abhängt. Eine nahe liegende Strategie ist es daher, ein Descent-Verfahren ausgehend von mehreren verschiedenen Startlösungen zu starten, wie es sog. *Multi-Start Descent-Verfahren* praktizieren. Obwohl dieser Ansatz bei kleinen Problemgrößen zu guten Lösungen führen kann, erweist er sich bei größeren und komplexeren Problemen als unzureichend [Stü99, S. 23]. Weitreichendere Techniken sind daher notwendig, um derartige Probleme effizient und effektiv zu lösen.

4.1.2 Kernidee der Tabusuche

Glover [Glo86] stellte 1986 die Metaheuristik *Tabusuche* vor², die es lokalen Suchheuristiken ermöglicht lokale Optima zu überwinden. Hierbei wird in jeder Iteration der lokalen Suche stets zur besten Nachbarlösung übergegangen, selbst wenn dies zu einer Verschlechterung des Zielfunktionswertes führt. Um einen zyklischen Suchverlauf zu verhindern, werden Attribute kürzlich besuchter Lösungen in einer sog. *Tabuliste* für eine bestimmte Anzahl an Iterationen (sog. *Tabudauer*) gespeichert. Nachbarlösungen die entsprechende Attribute beinhalten werden dann als temporär verboten bzw. *tabu* angesehen und können nicht gewählt werden. Ausnahmeregeln hiervon werden durch sog. *Aspirationskriterien* definiert.

Das Grundschema einer einfachen Tabusuche-Heuristik für ein Minimierungsproblem ist in Tabelle 4.2 dargestellt. Hierbei bezeichnet $\tilde{N}(s)$ alle Nachbarlösungen in der Nachbarschaft $N(s)$ der Lösung s , die als nicht tabu gelten oder die ein Aspirationskriterium erfüllen. Es wird in jeder Iteration die Nachbarlösung $s' \in \tilde{N}(s)$ mit der geringsten Verschlechterung der Zielfunktion um-

² Viele Elemente der Tabusuche wurden bereits 1977 von Glover [Glo77] vorgestellt. Unabhängig davon entwickelte Hansen [Han86] eine ähnliche Technik, die er ebenfalls 1986 vorstellte.

gesetzt. Anders als bei Descent-Heuristiken, muss bei Tabusuche-Heuristiken ein Stoppkriterium explizit definiert werden. Die geläufigsten Stoppkriterien sind eine maximale Anzahl an Iterationen, eine maximale Anzahl an Iterationen ohne Verbesserung der besten Lösung s^* oder ein Gesamtzeitlimit für die Suche.

Tabelle 4.2: Funktionsweise einer einfachen Tabusuche-Heuristik

Eingabe: Initiale zulässige Lösung s mit Zielfunktionswert $f(s)$.

Ausgabe: Beste gefundene Lösung s^* mit Zielfunktionswert $f(s^*)$.

1. **Initialisierung**

Setze $s^* := s$.

2. **Eigentliche Suche**

Solange ein *Stoppkriterium* nicht erfüllt ist, führe aus

(a) Bestimme die Nachbarlösung $s' \in \tilde{N}(s)$ für die gilt:

$$f(s') = \min_{\bar{s} \in \tilde{N}(s)} f(\bar{s}).$$

(b) Falls $f(s') < f(s^*)$, setze $s^* := s'$.

(c) Setze $s := s'$ und aktualisiere die Tabuliste.

Die Metaheuristik Tabusuche wurde zur Lösung vieler Probleme, v.a. aus dem Bereich der kombinatorischen Optimierung, erfolgreich eingesetzt. Zahlreiche Anwendungsbeispiele finden sich beispielsweise bei Glover und Laguna [Glo97]. Im Folgenden sollen einzelne Elemente der Technik im Kontext der Tourenplanung genauer beleuchtet werden. Für ausführliche Referenzen zu Tabusuche wird verwiesen auf Glover and Laguna [Glo93a, Glo97], Glover [Glo89, Glo90], Glover, Taillard und de Werra [Glo93b] und Gendreau [Gen02a, Gen03]. Für einen allgemeinen Überblick über Metaheuristiken einschließlich Tabusuche siehe z.B. Glover und Kochenberger [Glo03a], Pardalos und Resende [Par02], Reeves [Ree93a, Ree96] und Osman und Kelly [Osm96b].

4.1.3 Lösungsraum und Nachbarschaft

Obwohl es theoretisch möglich ist, die Nachbarschaft $N(s)$ einer Lösung s als die Menge aller zulässigen Lösungen ohne s zu definieren und damit bereits in einem Schritt zu einer optimalen Lösung zu gelangen, ist das Auffinden des besten Moves in diesem Fall gleichbedeutend mit der Lösung des ursprünglichen Problems und damit unzweckmäßig. Um das Auffinden der besten Lösung in kurzer Zeit zu erreichen, ist die Nachbarschaft einer Lösung hingegen so zu definieren, dass Nachbarlösungen durch geringfügige Modifikationen der gegenwärtigen Lösung bestimmt werden [Her03]. Hierzu ist es meist ausreichend bzw. vorteilhaft, lediglich die Kostendifferenz zwischen den Lösungen zu betrachten.

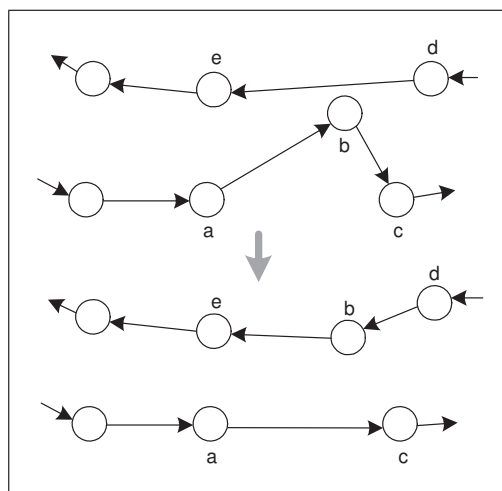


Abbildung 4.1: Exemplarischer Shift Move

Beispiele für mögliche Nachbarschaftsstrukturen im Kontext der Tourenplanung sind z.B. das Verschieben eines Kunden in eine andere Tour oder der Austausch zweier Kunden verschiedener Touren. Ersteres wird häufig als *Shift Move*, letzteres als *Swap Move* bezeichnet. Abbildungen 4.1 und 4.2 verdeutlichen diese Transformationen. In dem exemplarisch skizzierten Shift Move wird Kunde b, beim Swap Move jeweils die Kunden b und e in die andere Tour verschoben. An welcher Position die Kunden in die Ziel-Tour eingefügt werden, hängt dabei von der verwendeten Einfügestrategie ab. Gängig für

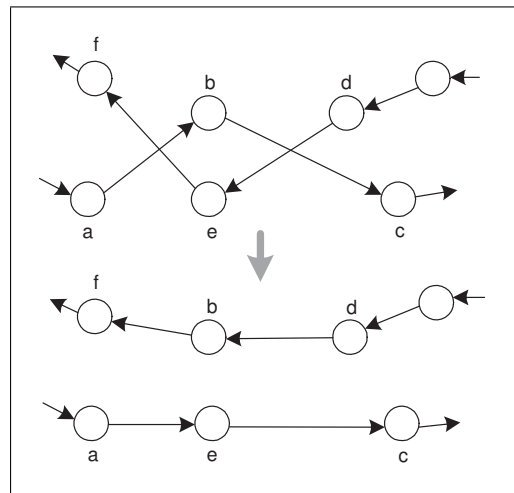


Abbildung 4.2: Exemplarischer Swap Move

Tourenplanungsprobleme ohne Zeitfenster ist die Verwendung der sog. *cheapest insertion*-Strategie [Joh85], bei der der Kunde kostenminimal zwischen zwei benachbarten Kunden der Ziel-Tour eingefügt wird. Alternativ kann auch eine komplexere Einfügestrategie, wie z.B. die kombinierte Einfüge- und Tourenverbesserungsstrategie GENI [Gen94], gewählt werden.³ Sind zeitliche Restriktionen, wie z.B. Bedienzeitfenster der Kunden⁴, zu berücksichtigen, verkompliziert sich die Einfügeevaluation entsprechend.

Eine Erweiterung dieser Moves besteht darin, nicht nur einen Kunden einer Tour zu betrachten, sondern mehrere Kunden einer Tour zu verschieben.⁵ Darunter fällt auch der von Taillard et al. [Tai97] vorgestellte *Cross-Exchange*, welcher einen Swap Move zweier Teilmengen aufeinander folgender Kunden zwischen zwei Touren bezeichnet. Dieser Move findet v.a. bei Problemen mit Zeitfenster-Restriktionen Anwendung. Dies gilt ebenso für einen Übertrag der *k*-opt-Transformationen auf Tourenplanungsprobleme. Dabei werden zwei Kanten aus unterschiedlichen Touren durch zwei neue Kanten so ersetzt, dass die Fahrtrichtung der Teilstrecken erhalten bleibt. Der zuge-

³ Vgl. auch Kapitel 3.1 bzgl. Einfügestrategien.

⁴ Vgl. z.B. Savelsbergh [Sav86, Sav92], Kindervater und Savelsbergh [Kin97] und Cordeau, Laporte und Mercier [Cor03a] für Strategien zur effizienten Einfügebewertung bei Tourenplanungsproblemen mit Zeitfenstern.

⁵ Dies führt zur Definition der sog. λ -Interchange Nachbarschaft, wie sie von Osman [Osm93] für das VRP vorgestellt wurde, vgl. Kapitel 4.2.1.

hörige Move wird als *2-opt* Move* bezeichnet [Pot95].

Eine weitere Möglichkeit besteht in der Verknüpfung mehrerer einfacher Moves zu einem mächtigeren Move, einem sog. *Compound Move* [Glo97, S. 135]. Rego und Roucairol [Reg96] definieren eine spezielle Form von Compound Moves, die sog. Ejection Chains. Eine Beschreibung findet sich in Kapitel 4.2.7.

Die Menge aller Lösungen, die im Laufe der Suche betrachtet bzw. besucht werden können, wird als *Lösungsraum* bezeichnet. Für das VRP könnte ein Lösungsraum z.B. alle zulässigen Lösungen, d.h. alle zulässigen Tourenpläne, umfassen. Die Definition der Nachbarschaftsstruktur und die des Lösungsraumes sind eng verbunden und deren Definition ist entscheidend für jede Tabusuche-Heuristik. Insbesondere muss durch die verwendete Nachbarschaftsform sicher gestellt sein, dass von jeder Lösung im Lösungsraum ein Weg zu einer optimalen Lösung existiert [Her03]. Dies wird jedoch v.a. bei Problemen mit multiplen Restriktionen z.T. stark erschwert. Ein Beispiel stellt das VRP mit sehr restriktiven Kapazitäts- und Gesamtzeitbeschränkungen der Fahrzeuge dar. Hier ist ein effektives Durchsuchen des Lösungsraumes nur durch Verwendung komplexer Nachbarschaftsstrukturen möglich. Für diese Fälle bietet es sich an, einzelne Restriktionen zu relaxieren. Dies generiert zwar einen größeren Lösungsraum, erlaubt jedoch die Verwendung einfacherer Nachbarschaftsstrukturen. Um die Suche in zulässige Bereiche des Lösungsraumes zu lenken, werden für die relaxierten Restriktionen gewichtete Strafterme für die Restriktionsverletzung zum Zielfunktionswert addiert. Eine passende Gewichtung der Strafterme ist jedoch nicht trivial. Eine gute Lösung um dieses Problem zu umgehen ist die Verwendung selbstadjustierender Parameter. Zum Beispiel werden im sog. *Shifting Penalty Ansatz* [Gen94] die Gewichte gesenkt, falls in den letzten Iterationen ausschließlich zulässige Lösungen gefunden wurden und erhöht, falls in den letzten Iterationen ausschließlich unzulässige Lösungen gefunden wurden. Alternativ können die Gewichte auch bewusst systematisch so verändert werden, dass die Suche gezwungen wird, den zulässigen Bereich des Lösungsraumes kurzzeitig zu verlassen. Dies stellt eine Form von *strategischer Oszillation* [Glo97, S. 102] dar, bei der -im weiteren Sinne- kritische Grenzen wiederholt von beiden Seiten gekreuzt werden. Die Erweiterung des Lösungsraumes um unzulässi-

ge Lösungen ermöglicht außerdem die Suche auf einer (bzgl. den relaxierten Nebenbedingungen) unzulässigen Lösung zu starten. Dies muss als entscheidender Vorteil gesehen werden, da bei vielen Problemen bereits das Auffinden einer zulässigen Lösung ein NP-hartes Problem ist [Her03].

Die Definition des Lösungsraumes und der Nachbarschaftsstruktur kann als kritischer Punkt bei der Entwicklung einer Tabusuche gesehen werden. Bei deren Festlegung sollte insbesondere auch problemspezifisches Wissen einfließen [Gen03].

4.1.4 Tabustatus und Aspirationskriterium

Die Metaheuristik Tabusuche erweitert eine (einfache) lokale Suchheuristik durch die Einführung sog. *Tabukriterien*, um einen zyklischen Suchverlauf zu verhindern. Würde z.B. ein lokales Optimum durch einen nichtverbessernden Move verlassen werden, so würde die Suche in der nächsten Iteration dazu tendieren, zu diesem lokalen Optimum zurückzukehren. Eben dies gilt es zu verhindern. Deswegen werden Moves, die den Effekt der zuletzt durchgeführten Transformationen rückgängig machen, als tabu deklariert. Eine offensichtliche Vorgehensweise um dies zu erreichen wäre, die zuletzt besuchten Lösungen vollständig in einem sog. *Kurzzeitgedächtnis*, der sog. *Tabuliste*, zu speichern. Dies erfordert jedoch eine Menge an Speicherplatz und macht eine Überprüfung, ob eine Nachbarlösung tabu ist, sehr aufwendig⁶. Dagegen ist es günstiger, lediglich eine Auswahl an lösungscharakteristischen Attributen zu speichern. Ein mögliches Tabukriterium im Kontext der Tourenplanung wäre z.B. das Verbot der Rückeinfügung eines kürzlich von $Tour T_p$ nach $Tour T_q$ bewegten Kunden v zurück in T_p durch Speicherung des Tupels (v, T_p) . Alternativ könnte auch die Rückeinfügung von v nach T_p nur von T_q aus durch ein Tripel (v, T_p, T_q) verboten werden. Letzteres wäre aber wenig restriktiv und ein zyklischer Suchverlauf wäre leichter möglich, da der Kunde v z.B. weiter in eine dritte Tour und dann von dort aus zurück nach T_p verschoben werden könnte. Ein restriktiveres Kriterium wäre hingegen das Verbot den Kunden v für eine gewisse Anzahl an Iterationen aus T_q zu entfernen

⁶ Vgl. Woodruff und Zemel [Woo93] und Taillard et al. [Tai97] bzgl. der Verwendung von Hash- und Zielfunktionswerten als Tabukriterien.

bzw. diesen generell zu bewegen. Werden in einem Move mehrere Kunden simultan verschoben, so ist insbesondere auch der Tabustatus des konkreten Moves zu definieren. Ein Swap Move des Kunden r von Tour T_p nach Tour T_q und des Kunden t von T_q nach T_p könnte beispielsweise genau dann als tabu gelten, wenn sowohl das Tupel (r, T_p) als auch das Tupel (t, T_q) als tabu deklariert sind. Eine passende Ausgestaltung des Tabukriteriums ist problemspezifisch zu wählen. Gute Tabukriterien helfen der Suche nicht nur einen zyklischen Suchverlauf zu vermeiden, sondern auch einen bereits besuchten Teil des Lösungsraumes zu verlassen und in bislang unerforschte Teilbereiche vorzudringen.

Die Tabukriterien werden am Ende einer Iteration, d.h. nach ausgeführtem Move, für eine gewisse Anzahl an Iterationen, der sog. *Tabudauer*, gespeichert. Die Wahl der Tabudauer ist eine kritische Designfrage, da einerseits zu kurze Tabudauern einen zyklischen Suchverlauf nicht effektiv verhindern können und andererseits zu lange Tabudauern die Suche zu stark einschränken. Dies gilt v.a. bei Verwendung fixer Tabudauern. Vorteilhaft erscheint es daher, die Tabudauer im Verlauf der Suche zu variieren oder sie in jeder Iteration zufällig aus einem Intervall zu wählen [Glo97]. Auch eine Normierung der Tabudauer auf die Problemgröße erscheint vorteilhaft [Cor97]. Eine adaptive Methode zur Steuerung der Tabudauern, genannt Reactive Tabu Search, wurde von Battiti und Tecchioli [Bat94] entwickelt. Für Details zu dieser Methode wird verwiesen auf Battiti [Bat96] und Wassan und Osman [Was02].

Die Verwendung von Tabukriterien birgt die Gefahr, dass Lösungen auch dann als tabu deklariert werden, wenn sie im Verlauf der Suche noch nicht besucht wurden. Um dies zu verhindern, kommen sog. *Aspirationskriterien* zum Einsatz, die unter bestimmten Bedingungen den Tabustatus eines Moves aufheben. Das gängigste Aspirationskriterium, genannt Aspiration by Objective [Glo97, S. 50], hebt z.B. den Tabustatus eines Moves auf, falls dieser zu einer neuen besten Lösung führt. Dies ist in diesem Fall möglich, da die Lösung mit Sicherheit noch nicht betrachtet wurde. Alternative Formen von Aspirationskriterien, wie z.B. bei Glover und Laguna [Glo97, S. 50] beschrieben, sind möglich und wurden erfolgreich angewendet. Generell kann der Tabustatus eines Moves stets dann aufgehoben werden, wenn die Gefahr eines zyklischen Suchverlaufs ausgeschlossen werden kann.

4.1.5 Kandidatenmenge und Akzeptanzkriterium

Die ständige Evaluation aller Nachbarlösungen in jeder Iteration der Suche ist sehr rechenzeitaufwendig. Alternativ kann auch nur eine Auswahl der Nachbarlösungen, bezeichnet als *Kandidatenmenge*, betrachtet werden. Beispielsweise kann eine Kandidatenmenge durch Zufallsauswahl von Nachbarlösungen bestimmt werden. Dies hat u.a. den Vorteil, dass die Gefahr eines zyklischen Suchverlaufs implizit verringert wird⁷, was kürzere Tabulisten bzw. Tabudauern ermöglicht. Andererseits besteht die Gefahr gute Lösungen zu übersehen. Insbesondere ist am Ende einer probabilistischen Tabusuche nicht sichergestellt, dass die beste gefundene Lösung lokal optimal ist. Daher sollte bei Verwendung einer Zufallsauswahl zumindest am Ende des Algorithmus eine lokale Suche ohne Zufallsauswahl auf die beste gefundene Lösung angewendet werden [Gen03].

Strategien zur Bestimmung von Kandidatenmengen werden unter dem Begriff *Kandidatenlisten-Strategien* [Glo97] zusammengefasst. Ein Überblick über bekannte Strategien findet sich bei Glover und Laguna [Glo97, S. 59].

Ein für die Tabusuche typisches *Akzeptanzkriterium* ist die sog. *Best Accept-Strategie* (BA) [Osm96b]. Hierbei wird in jeder Iteration stets diejenige Nachbarlösung gewählt, die nicht tabu ist und die die geringste Verschlechterung des Zielfunktionswertes verursacht. Alternativ kann im Laufe der Nachbarschaftsevaluierung auch die erste verbessernde Nachbarlösung, die nicht tabu ist sofort umgesetzt werden. Diese Strategie wird als *First Best Accept-Strategie*⁸ (FBA) bezeichnet. Kann keine verbessernde Nachbarlösung gefunden werden, so gilt das Auswahlkriterium der BA-Strategie. Die FBA-Strategie kann dementsprechend auch als eine spezielle Kandidatenlisten-Strategie angesehen werden.

⁷ Viele bekannte Metaheuristiken setzen Zufallsentscheidungen gezielt zur Überwindung lokaler Optima ein, vgl. z.B. Simulated Annealing [Aar97b] und Tabu Thresholding [Glo95b].

⁸ Osman und Kelly [Osm96b] bezeichnen diese Strategie als *First Accept-Strategie*.

4.1.6 Intensivierung und Diversifikation

Einfache Tabusuche-Heuristiken sind z.T. bereits in der Lage, komplexe Optimierungsprobleme erfolgreich zu lösen. Dennoch können zusätzliche Elemente die Suche meist noch effizienter gestalten. In diesem Zusammenhang werden häufig die Begriffe Intensivierung und Diversifikation genannt.⁹

Unter *Intensivierung* wird eine genauere, intensivere Betrachtung von erfolgsversprechenden Regionen des Lösungsraumes verstanden. Intensivierende Strategien sind z.B. der Neustart¹⁰ auf der besten bzw. auf den besten gefundenen Lösungen, die häufig auch als *Elitelösungen* bezeichnet werden [Glo97, S. 345]. Alternative Intensivierungstechniken sind z.B. eine temporäre Reduktion der Tabudauer oder eine zwischenzeitliche Vergrößerung der Nachbarschaft. So könnten beim VRP z.B. komplexere Compound Moves zur Intensivierung der Suche genutzt werden.

Der Begriff *Diversifikation* bezeichnet Mechanismen, die versuchen die Suche in bislang unerforschte Regionen des Lösungsraumes zu lenken. Dies ist v.a. bei auf dem Prinzip der lokalen Suche basierenden Verfahren ein wichtiger Gesichtspunkt, da diese Verfahren (also auch die Tabusuche) dazu tendieren zu „lokal“ zu agieren¹¹, d.h. zu viel Zeit in einem Teilbereich des Lösungsraumes zu verbringen.¹² Die Verwendung diversifizierender Strategien ist deshalb nicht nur eine wichtige, sondern auch eine äußerst kritische Designfrage bei der Konzeption einer Tabusuche-Heuristik. Bekannte Strategien sind z.B. der Neustart bei der besten bekannten Lösung verbunden mit einer forcierten Modifikation selten verwendeter Komponenten (Neustart-Diversifikation [Gen03, S. 46]). Beispielsweise können beim VRP selten bewegte Kunden in andere Touren gezwungen werden. Alternativ kann die Diversifikation auch kontinuierlich in den Suchverlauf integriert werden (kontinuierliche Diversifikation [Gen03, S. 46]). Hierzu wird z.B. ein sog. *Langzeitgedächtnis* verwen-

⁹ In der Literatur zu populationsbasierten Heuristiken finden sich oftmals die verwandten Begriffe Exploitation und Exploration [Glo97, S. 116].

¹⁰ Erfolgt hierbei ein mehrfacher Neustart auf der gleichen Lösung, so muss sichergestellt werden, dass die Suche stets alternative Suchpfade einschlägt.

¹¹ Daher leitet sich auch der Name lokale Suche ab [Gen03].

¹² Trotz effektiver Diversifikations-Strategien empfiehlt es sich daher, eine gute Startlösung für die eigentliche Tabusuche zu wählen [Gen02a].

det, das die Häufigkeit mit der ein Kunde verschoben wurde misst. Bei der Evaluierung der Nachbarlösungen wird dann ein Strafterm proportional zur Häufigkeit der verwendeten Komponenten zu dem Zielfunktionswert addiert, was die Auswahl der besten Nachbarlösung beeinflusst [Glo97].

4.2 Bekannte Tabusuche-Heuristiken

Im Folgenden werden die bekanntesten Tabusuche-Heuristiken zum VRP, MDVRP und PVRP sowie zur Tourenplanung mit Anhänger vorgestellt. Alternative Darstellungen finden sich z.B. bei Golden et al. [Gol98], Jacobi [Jac99], Gendreau, Laporte und Potvin [Gen02b] und Cordeau und Laporte [Cor02b].

4.2.1 Verfahren von Osman

Osman [Osm93] entwickelte eine Tabusuche-, eine Descent- und eine Simulated Annealing-Heuristik für das VRP. Diese Ausführungen konzentrieren sich auf das Tabusuche-Verfahren, das sich den anderen Verfahren überlegen zeigte.

Die Startlösung für die Tabusuche wird mit dem Savings-Algorithmus³ konstruiert. Für das Tabusuche-Verfahren definiert Osman eine λ -Interchange Nachbarschaft, bei der eine Teilmenge von bis zu λ Kunden aus einer Tour T_p entfernt und in eine andere Tour T_q ($T_p \neq T_q$) eingefügt bzw. mit einer Teilmenge von bis zu λ Kunden der Tour T_q ausgetauscht wird. Die Einfügepositionen sind in der allgemeinen Definition nicht genauer spezifiziert. Im Verfahren wird $\lambda = 1$ sowie eine cheapest insertion-Einfügestrategie [Joh85] verwendet und die Suche auf zulässige Lösungen beschränkt. Ein 2-opt-Verfahren [Lin65] wird zur Post-Optimierung der Routen genutzt. Als tabu gilt ein Move, falls alle zu verschiebenden Kunden (einschließlich eines sog. Nullkunden bei einer einfachen Verschiebeoperation) für die Rückeinfügung in die Ziel-Route tabu sind und der Move nicht zu einer neuen besten

¹³ Vgl. Kapitel 3.2.1.

Lösung führt. Die Tabudauer pendelt dabei zwischen fix vorgegebenen Werten. Es wird sowohl ein Akzeptanzkriterium nach der First Best Accept (FBA) und nach der Best Accept-Strategie¹⁴ (BA) betrachtet. Zur Evaluierung der Nachbarschaft setzt Osman bei der BA-Strategie eine spezielle Datenstruktur ein, indem er ausschließlich den besten Move zwischen zwei Touren speichert. Da in jeder Iteration genau zwei Touren modifiziert werden, sind lediglich die entsprechenden Einträge in der Datenstruktur neu zu berechnen, was zu einer deutlichen Beschleunigung des Verfahrens führt.¹⁵ Wie jedoch Hjorring [Hjo95, S. 116] und Jacobi [Jac99, S. 51] feststellen, werden durch Verwendung dieser speziellen Datenstruktur bei der BA-Strategie nicht alle möglichen, sondern stets eine Teilmenge aller möglichen Moves untersucht.¹⁶ Dies wird ersichtlich, falls der beste Move für ein Tourenpaar tabu ist. In diesem Fall werden keine weiteren Moves für dieses Tourenpaar betrachtet.

Empirische Tests zeigten, dass bei gleichem Stoppkriterium die FBA-Strategie geringfügig bessere Lösungen hervorbringt als die verwendete BA-Strategie mit der zugrunde liegenden Datenstruktur, letztere jedoch bei kürzeren Rechenzeiten bevorzugt werden sollte.

4.2.2 Praxisbezogene Tabusuche von Semet und Taillard

Semet und Taillard [Sem93] betrachten eine reale Problemstellung, bei der es u.a. auch den Einsatz von Anhängern, Zeitfenster für die Kundenbelieferung, heterogene Fahrzeuge und mehrere Bestellungen pro Kunde zu berücksichtigen gilt. Als Nachbarschaft für die von ihnen entwickelte Tabusuche bestimmen die Autoren das Verschieben genau eines Kunden in eine Tour einer anderen Route. In dem zum TTRP verwandten Problemtyp¹⁷ können VC-Kunden dabei (vereinfachend) ausschließlich in CVR-Maintouren, jedoch

¹⁴ Vgl. Kapitel 4.1.5.

¹⁵ Ähnliche Datenstrukturen werden z.B. auch in Osman und Salhi [Osm96c], Osman und Wassen [Osm02] und Wassen und Osman [Was02] genutzt.

¹⁶ Dies entspricht daher einer speziellen Kandidatenlisten-Strategie, vgl. Kapitel 4.1.5.

¹⁷ Vgl. Kapitel 2.3.3.3.

nicht in eine PTR oder CVR-Subtour eingeplant werden. Des Weiteren können Kunden in eine fiktive Route aufgenommen werden, wofür jedoch Strafkosten anfallen. Bei der Evaluation der Einfügepositionen betrachten die Autoren zugleich eine Neuansbindung existierender Subtours der Ziel-Route abhängig vom einzufügenden Kundentyp und der Einfügeposition. Kapazitäts- und kundenspezifische Fahrzeugrestriktionen werden hierbei außer Acht gelassen. Diese werden erst bei einer Neuordnung der heterogenen Fahrzeuge zu den Routen berücksichtigt, welche nach jedem akzeptiertem Move durchgeführt wird. Eine Neuordnung der Fahrzeuge bei jeder Evaluierung wird nur bei Vorliegen einer guten Lösung durchgeführt, da dies sehr rechenintensiv ist. Zur Beschleunigung des Verfahrens werden Einfüge- und Entfernungskosten für die Kunden zwischengespeichert, soweit möglich mehrere Bestellungen eines Kunden zu jeweils einer Bestellung aggregiert und in einer Iteration lediglich ca. ein Viertel der möglichen Moves untersucht. Zwei verschiedene Tabukriterien wurden getestet. Das erste Tabukriterium verbietet die Rückeinfügung eines Kunden (respektive einer Kundenbestellung, falls ein Kunde mehrere Lieferungen benötigt, diese nicht aggregiert werden und der Kunde deswegen mehrfach eingeplant werden muss) in eine Route in der dieser erst vor kurzem enthalten war. Das zweite Tabukriterium ist restriktiver und verbietet allen Kundenbestellungen eines Kunden in eine Route neu aufgenommen zu werden, aus der eine beliebige Kundenbestellung dieses Kunden vor kurzem entfernt wurde. Letzteres zeigte sich dem ersten Tabukriterium überlegen. Die Tabudauer wurde dabei alle 60 Iterationen zufällig zwischen 6 und 30 gewählt.

Die Tabusuche-Heuristik zeigte sich einer für diese Problemstellung entwickelten Heuristik, wie sie in Kapitel 3.3 beschrieben ist, überlegen.

4.2.3 Dekompositions-Verfahren von Taillard

Eine der bekanntesten Tabusuche-Heuristiken für das VRP stammt von Taillard [Tai93]. Der Autor nutzt eine 1-Interchange Nachbarschaft¹⁸ mit cheapest insertion-Einfügestrategie [Joh85], wobei keine unzulässigen Lösungen erlaubt sind. Eine Optimierung der Touren mit dem exakten TSP-Verfahren

¹⁸ Vgl. Kapitel 4.2.1.

von Volgenant und Jonker [Vol83] erfolgt periodisch bzw. falls die aktuelle Lösung maximal 0,1% über der bisher besten gefundenen Lösung liegt. Die Tabukriterien werden wie bei Osman [Osm93] definiert und die Tabudauer zufällig innerhalb des Intervalls $[0, 4n; 0, 6n]$ gewählt. Das Verfahren nutzt ein Langzeitgedächtnis mit dessen Hilfe häufig vorkommende Moves bestraft werden, indem ein Strafterm zum Zielfunktionswert der neuen Lösung addiert wird, soweit sie nicht die beste bisher gefundene Lösung verbessern kann. Die Besonderheit des Verfahrens stellt ein Dekompositions-Schema dar, bei dem das Gesamtproblem in mehrere getrennte Teilprobleme zerlegt und für jedes dieser Teilprobleme eine VRP-Tabusuche mit Hilfe von Parallelrechnern auf mehreren Prozessoren gleichzeitig durchgeführt wird. Für planare Probleme mit zentralem Depot erfolgt die Dekomposition durch Aufteilung des Gebietes in Sektoren und ggf. in konzentrische Kreise um das Depot. Bei nicht planaren Datensätzen wird eine Aufteilung mittels kürzester Spannbäume ausgehend vom Depot vorgeschlagen. Die Teilprobleme werden periodisch neu bestimmt.

Das Verfahren konnte für zwölf der 14 klassischen VRP-Benchmarkprobleme¹⁹ die beste bekannte Lösung finden und stellt bis heute eines der effektivsten VRP-Heuristiken dar [Cor02b]. Beispielsweise nutzen Taillard, Laporte und Gendreau [Tai96b] und Golden, Laporte und Taillard [Gol97] das Verfahren in ihren Algorithmen zur Lösung von Tourenplanungsproblemen mit Mehrfacheinsatz von Fahrzeugen. Das erfolgreiche Grundkonzept der dynamischen Lösungsdekomposition und Optimierung von Teilproblemen wird von Taillard und Voß [Tai02] in ihrem metaheuristischen Lösungsansatz POPMUSIC generalisiert und z.B. von Taillard [Tai03] zur Lösung von großen Clusterproblemen verwendet.

4.2.4 Taburoute-Verfahren von Gendreau, Hertz und Laporte

Gendreau, Hertz und Laporte [Gen94] entwickelten eine Tabusuche-Heuristik, genannt *Taburoute*, für das VRP. Das Verfahren konstruiert Nachbarlösungen durch Verschieben eines Kunden in eine leere oder benachbarte

¹⁹ Vgl. Kapitel 2.1.2.

Route. Als benachbart gilt hierbei eine Route, wenn sie mindestens einen der nächsten Kunden des zu verschiebenden Kunden enthält. Die Einfügeevaluation erfolgt mittels der TSP-Heuristik GEN \mathbb{P}^0 , die bereits TSP-Verbesserungsroutinen beinhaltet. Periodische Routenverbesserungen werden ebenfalls mittels der TSP-Post-Optimierungs-Heuristik US 2 ²¹ ausgeführt. Im Verlauf des Verfahrens können unzulässige Lösungen bezüglich einer Überschreitung der Gesamtkapazität und der Gesamtdauer einer Route akzeptiert werden. Der Grad der Unzulässigkeit wird dabei mit einem Shifting Penalty Ansatz kontrolliert. Dabei werden Strafterme zum Zielfunktionswert addiert und deren Gewichtung abhängig vom Verlauf der Suche adjustiert. Dem dadurch entstehenden Evaluierungswert wird weiterhin eine Häufigkeitsstrafe, ähnlich dem Verfahren von Taillard [Tai93], hinzuaddiert, falls dieser gegenüber der vorliegenden Lösung ansteigt. Als tabu gilt das Verschieben eines Kunden zurück in eine Route, aus der er kürzlich entfernt wurde, wobei die Tabudauer zufällig aus dem Intervall [5; 10] gewählt wird. Ein Aspirationskriterium setzt den Tabustatus außer Kraft, falls eine neue beste zulässige oder unzulässige Lösung gefunden wird. Zur Intensivierung nutzen die Autoren einen dreistufigen Aufbau. Zuerst werden verschiedene Tourenpläne durch Aufspaltung einer alle Kunden umfassenden TSP-Tour in entsprechende Fahrzeugrouten konstruiert und jeder Tourenplan durch limitierte Anwendung der Tabusuche-Heuristik verbessert. Ausgehend von der besten gefundenen Lösung erfolgt die eigentliche Suche. Diese endet nach $50n$ Iterationen ohne Verbesserung der besten Lösung und es erfolgt ein Intensivierungs-Neustart auf der besten Lösung. Die Suche und damit das Verfahren enden dann nach n Iterationen ohne Verbesserung der besten Lösung. Wohingegen bei den Kurzstarts und der eigentlichen Suche in jeder Iteration stets $5n$ zufällig gewählte Kunden für das Verschieben evaluiert werden, wird im Intensivierungslauf stets die Hälfte der Kunden mit den größten Verschiebefrequenzen betrachtet.

²⁰ Vgl. Kapitel 3.1.

²¹ Vgl. Kapitel 3.1.

4.2.5 Adaptive Memory-Verfahren von Rochat und Taillard

Rochat und Taillard [Roc95] entwickelten eine effektive Diversifikations- und Intensivierungstechnik²² für lokale Suchverfahren, basierend auf einem sog. *Adaptive Memory*, einer Menge guter Lösungsbestandteile verschiedener Lösungen. Das Adaptive Memory wird im Verlauf der Suche durch Aufnahme neuer qualitativ hochwertiger Elemente und Entfernung von weniger qualitativen Elementen permanent aktualisiert. Durch Kombination von Elementen aus dem Adaptive Memory werden neue Lösungen erzeugt, diese durch ein lokales Suchverfahren verbessert und deren Lösungsbestandteile wiederum für eine Aufnahme in das Adaptive Memory betrachtet. Dies entspricht den Grundprinzipien populationsbasierter Heuristiken, wie sie z.B. bei Genetischen Algorithmen²³ und Scatter Search²⁴ zum Einsatz kommen.²⁵

Die Autoren präsentieren eine Anwendung des Verfahrens für das VRP und das VRPTW, bei dem die Routen eines Tourenplans als Lösungsbestandteile für das Adaptive Memory verwendet werden. Insgesamt werden 260 Routen im Adaptive Memory gespeichert, wobei identische Routen auch mehrfach vorkommen können. Letzteres ist ein Indiz für eine gute Routenstruktur. Die Generierung neuer Tourenpläne erfolgt durch zufällige Extraktion hochwertiger Routen aus dem Adaptive Memory. Hierbei wird den Routen die zu besseren Lösungen gehören eine höhere Selektions-Wahrscheinlichkeit eingeräumt und alle Routen, welche Kunden enthalten, die bereits in einer extrahierten Route enthalten sind, werden von der Auswahl ausgeschlossen. Dies führt ggf. dazu, dass am Ende noch Kunden unverplant sind. Diese müssen dann in den durch die extrahierten Routen gebildeten (unvollständigen) Tourenplan integriert werden. Als Verbesserungsverfahren nutzen die Autoren eine

²² Glover und Laguna [Glo97, S. 252] betrachten derartige Strategien unter der Bezeichnung *Vocabulary Building*.

²³ Vgl. Reeves [Ree93b] [Ree03].

²⁴ Vgl. Laguna und Martí [Lag03], Glover, Laguna und Martí [Glo03b] und Glover [Glo98].

²⁵ Taillard et. al [Tai01] verdeutlichen den einheitlichen Aufbau verschiedener Memory-basierter Heuristiken im Rahmen des sog. *Adaptive Memory Programming*. Unter dem Namen Adaptive Memory Programming werden nach Glover und Kochenberger [Glo03a, Vorwort, Fußnote 1] alle Methoden zusammengefasst, die flexible bzw. variierende Memory-basierte Elemente beinhalten.

leicht modifizierte Variante der Tabusuche-Heuristik von Taillard [Tai93] für das VRP bzw. der Tabusuche-Heuristik von Rochat und Semet [Roc94] für das VRPTW. Die Routen der besten nach der Verbesserung erhaltenen Lösung ersetzen dann die schlechtesten Routen im Adaptive Memory. Am Ende des Verfahrens lösen die Autoren ein Set Partitioning-Problem²⁶ zur Generierung einer optimalen VRP-Lösung aus den im Adaptive Memory enthaltenen Routen.

Mit diesem Verfahren wurden zwei neue beste Lösungen zu den klassischen VRP-Testproblemen²⁷ von Christofides, Mingozzi und Toth [Chr79b] gefunden, was die Leistungsfähigkeit dieses Ansatzes unterstreicht. Das Prinzip lässt sich auf andere Anwendungsgebiete übertragen und wurde z.B. von Bozkaya, Erkut und Laporte [Boz03] im Rahmen eines Tabusuche-Verfahrens zur Wahlkreiseinteilung erfolgreich eingesetzt.

4.2.6 Mehrdepot-Verfahren von Renaud, Laporte und Boctor

Das Tabusuche-Verfahren von Renaud, Laporte und Boctor [Ren96a] wurde für das Mehrdepot-Tourenplanungsproblem²⁸ entwickelt. Initial werden alle Kunden dem nächstgelegenen Depot zugeordnet und je Depot ein VRP mittels der Improved Petal-Methode von Renaud [Ren96b] gelöst. Die Tabusuche verwendet als Nachbarschaften zum einen eine eingeschränkte λ -Interchange Nachbarschaft²⁹ mit $\lambda = 2$ zwischen allen Routen eines Depots und benachbarten³⁰ Routen unterschiedlicher Depots, beschränkt auf Teilmengen aufeinander folgender Kunden und ohne Swap Moves von Teilmengen unterschiedlicher Kundenanzahl (sog. 2-Routen Move), zum anderen einen zweistufigen Shift Move, bei dem simultan ein Kunde in eine benachbarte Route verschoben wird und aus dieser wiederum ein anderer Kunde entfernt und in eine dritte Route eingefügt wird (sog. 3-Routen Move). Zur Post-Optimierung der

²⁶ Vgl. Rochat und Taillard [Roc95].

²⁷ Vgl. Kapitel 2.1.2.

²⁸ Vgl. Kapitel 2.3.2.

²⁹ Vgl. Kapitel 4.2.1.

³⁰ Die Nähe zweier Routen wird mit Hilfe der Routen-Schwerpunkte bestimmt.

Routen nach einer Movedurchführung wird eine TSP-Heuristik von Renaud, Boctor und Laporte [Ren96c] genutzt. Als tabu gilt wie üblich die Rückeinfügung eines Kunden in eine Route aus der dieser kürzlich entfernt wurde.³¹ Die Tabudauern werden zufällig aus einem Intervall gewählt und es findet ein Aspirationskriterium Anwendung, das den Tabustatus aufhebt, falls die Nachbarlösung eine neue beste Lösung darstellt. Das Verfahren untergliedert sich in drei Phasen. Die erste Phase nutzt eine Sequenz aus einem Inter-Depot 2-Routen Move, einem Intra-Depot 2-Routen Move und einem 3-Routen Move und wiederholt diese solange, bis 75 Iterationen ohne Verbesserung der besten Lösung ausgeführt wurden. Hierbei wird stets der erste Move, der zu einer Verbesserung führt umgesetzt. Die zweite Phase startet auf der besten gefundenen Lösung der ersten Phase und intensiviert die Suche, indem jedes Depot getrennt mit einem Intra-Depot 2-Routen Move für 300 Iterationen ohne Verbesserung der jeweils besten Lösung optimiert wird. Das Verfahren endet mit einer dritten Phase, bei der eine Diversifikation angestrebt wird. Hierbei wird zuerst ein Kunde bestmöglich in eine Route eines anderen Depots eingefügt³² und anschließend Inter- und Intra-Depot 2-Routen Moves ausgeführt. Dieser Schritt wird insgesamt 20-mal ausgeführt, wobei kein Aspirationskriterium zum Einsatz kommt.

Das Verfahren konnte gute Ergebnisse für das MDVRP erzielen, wie dem Kapitel 2.3.2.3 bzw. der Tabelle 2.4 auf Seite 41 zu entnehmen ist.

4.2.7 Ejection-Chain-Verfahren von Rego und Roucairol

Die meisten lokalen Suchverfahren verwenden einfache Shift und Swap Moves um von einer Lösung zu einer Nachbarlösung zu gelangen. Rego und Roucairol [Reg96] sowie Rego [Reg01] hingegen beschreiben eine VRP-Tabusuche-Heuristik, die zur Evaluierung der Nachbarschaft mehrere simultan auszuführende Moves, sog. *Compound Moves* oder *Ejection Chains*, betrachtet. Eine Ejection Chain kann im Rahmen dieser Verfahren als mehrstufige Abfolge von speziellen Shift Moves mit cheapest insertion-Einfügestrategie [Joh85] betrachtet werden, welche insbesondere auch einfa-

³¹ Eine genaue Angabe, wie sich der Tabustatus eines Moves bestimmt erfolgt nicht.

³² Ein erneutes Verschieben dieses Kunden ist für zehn Iterationen verboten.

chere Shift und Swap Moves einschließt. Ein initialer Kunde i wird hierbei aus seiner Routenposition entfernt und bestmöglich anstelle eines anderen Kunden j der eigenen oder einer anderen Route an dessen Position eingefügt. Auf der nächsten Stufe „verdrängt“ der Kunde j nun selbst wiederum einen anderen Kunden aus dessen Routenposition usw. Die Einfügepositionen werden dahingehend eingeschränkt, dass auf der aktuellen Stufe keine auf einer vorhergehenden Stufe neu eingefügten Kanten (mit Ausnahme zum Depot) wieder entfernt werden dürfen und dass ausschließlich die zum zu verschiebenden Kunden nächstgelegenen Kunden evaluiert werden. Dadurch resultiert eine maximal mögliche Anzahl an Stufen einer Ejection Chain bzw. durch andere Kunden induzierte Shift Moves (Ejections). Die Anzahl der Stufen wird von den Autoren jedoch (zumeist) auf sechs limitiert. Auf jeder Stufe einer Ejection Chain werden die Transformationen früherer Stufen zugrunde gelegt und der aktuell zu verschiebende Kunde temporär in eine Route eingefügt. Dabei stimmt die Einfügeposition entweder mit der ehemaligen Position des initialen Kunden der ersten Stufe überein (Trial Move I) oder wird durch bestmögliche Einfügung mittels cheapest insertion in eine andere, ggf. auch neue Route bestimmt (Trial Move II). Die beste durch Trial Moves erhaltene, zulässige Lösung der Ejection Chain bildet sodann die beste Nachbarlösung. Um Zyklen im Suchverlauf zu verhindern, setzen die Autoren den Shift Move der ersten Stufe sowie den inversen Shift Move der letzten Stufe tabu. Der Tabustatus wird jedoch aufgehoben, falls der zugehörige Trial Move zu einer neuen besten Lösung führt. Die Tabudauern werden zufällig aus einem Intervall gewählt. Im Verfahren von Rego [Reg01] werden ausschließlich zulässige Nachbarlösungen umgesetzt.³³ Unzulässige Lösungen sind jedoch während der Konstruktion einer Ejection Chain erlaubt, da durch eine Transformation auf einer späteren Stufe die Unzulässigkeit wieder aufgehoben werden kann. Zur dynamischen Intensivierung und Diversifikation der Suche wird ein Langzeitgedächtnis mit an den Suchverlauf angepasstem Strafterm in der Evaluierungsfunktion verwendet und es erfolgt ein alternierender Einsatz der beiden Trial Move-Typen. Zur zwischenzeitlichen Optimierung der einzelnen Routen verwenden die Autoren ebenfalls den Ejection Chain-Ansatz. Es erfolgte sowohl eine Implementierung für mehrere Prozessoren durch einen

³³ Rego und Roucairol [Reg96] verweisen auf ähnliche Strategien.

Master-Slave-Ansatz sowie einer sequenziellen Variante auf nur einem Prozessor. Für Details zur parallelen Implementierung wird auf die entsprechenden Artikel verwiesen.

4.2.8 Flower-Algorithmus von Rego

Ein Ejection Chain-Tabusuche-Verfahren, das auf Kanten basiert, genannt *Flower-Algorithmus*, wurde von Rego [Reg98a] vorgestellt. Das Verfahren enthält gleiche Elemente mit den Verfahren von Rego und Roucairol [Reg96] und Rego [Reg01], unterscheidet sich jedoch insbesondere durch die Transformationen auf den einzelnen Stufen der Ejection Chains. Als Referenzstruktur eines Tourenplans dient eine Blumenstruktur, bei der ein Stiel und mehrere Blütenblätter existieren. Blütenblätter entsprechen den Routen eines Tourenplans und der Stiel einem zusammenhängenden Kundensegment mit einseitiger Anbindung an das Depot. Für den Übergang zur nächsten Stufe einer Ejection Chain wird eine (initial aus der aktuellen Lösung erzeugte) Referenzstruktur durch Hinzufügung und Entfernung von Kanten in eine neue Referenzstruktur überführt. Auf jeder Stufe wird die aktuelle Referenzstruktur temporär zurück in eine reguläre Routenstruktur eines Tourenplans übertragen, indem der Stiel der Referenzstruktur durch Kanten-Modifikationen entfernt wird. Die beste der erhaltenen temporären Nachbarlösungen einer Ejection Chain wird umgesetzt. Die Anzahl an eingesetzten Fahrzeugen kann dabei im Verlauf der Suche variieren. Das Verfahren ist wiederum in einer Tabusuche eingebettet, die variable Tabudauern, eine Häufigkeitsstrafe basierend auf einem Langzeitgedächtnis und Routen-Optimierung durch das TSP-Verfahren von Rego [Reg98b] nutzt.

4.2.9 Netzfluss-Evaluierungs-Verfahren von Xu und Kelly

Das Tabusuche-Verfahren von Xu und Kelly [Xu96] bestimmt Nachbarlösungen nach der Best Accept-Strategie durch oszillierenden Einsatz von Swap Moves zweier Kunden zwischen zwei Routen und durch simultane Shift Mo-

ves mehrerer Kunden in andere, ggf. neue Routen. Die Anzahl der gleichzeitig auszuführenden Shift Moves wird dabei fest vorgegeben und variiert zwischen einem und maximal vier zu verschiebenden Kunden. Die Ermittlung des oder der besten Shift Moves erfolgt mit Hilfe eines mehrstufigen Netzflussmodells, bei dem die Flüsse den Kundenverschiebungen entsprechen und diese jeweils mit den Entfernungskosten aus der aktuellen und den Einfügekosten in jeweils eine andere Route bewertet werden. Die Einfügekosten werden dabei durch cheapest insertion [Joh85] bestimmt. Falls nur ein Shift Move ausgeführt wird, so stimmen die Einfügekosten mit den tatsächlichen Move-Kosten überein. Werden jedoch mehrere Shift Moves zugleich ausgeführt und ist eine bestimmte Route in mehr als einem Shift Move beteiligt, so stellen die ermittelten Einfügekosten lediglich Approximationen für die tatsächlichen Move-Kosten dar. Eine temporäre Überschreitung der maximalen Fahrzeugkapazität ist im Verlauf der Suche möglich, wobei die Evaluierungsfunktion einen abhängig von der Höhe der Gesamtkapazitätsüberschreitung adjustierten Strafterm enthält. Ebenfalls bestraft wird das Entfernen von Kunden aus Routen mit starker Unterauslastung. Mehrere Tabukriterien kommen zum Einsatz. Tabu gesetzt wird für eine zufällig gewählte Tabudauer jeweils die Rückeinfügung der Kunden in ihre vorherige Route³⁴ sowie die Entfernung eines Kunden aus einer neuen Route, falls diese nicht mehr als zwei Kunden enthält³⁵. Eine Nachbarlösung gilt als tabu, wenn mindestens ein tabu aktives Attribut im Move enthalten ist. Der Tabustatus wird durch hohe Kostenbewertung der entsprechenden Transformationen determiniert. Dies verhindert den Einsatz eines Aspirationskriteriums. In periodischen Abständen oder bei Vorliegen einer guten Lösung werden modifizierte Routen durch ein 3-opt-Verfahren [Lin65] und ggf. zusätzlich durch eine einfache TSP-Tabusuche nachoptimiert. Ein Langzeitgedächtnis wird zur kontinuierlichen Diversifikation verwendet. Zur Intensivierung der Suche erfolgt ab Iteration 20000 (insgesamt werden 100000 Iterationen durchgeführt) alle 750 Iterationen ein Neustart auf der schlechtesten von insgesamt 37 in einer nach Zielfunktionswert sortierten Liste eingetragenen, unterschiedlichen Elitelösungen. Wird im Verlauf der Suche eine neue Lösung gefunden, die sich in mindestens zwei Routen von einer Elitelösung unterscheidet und deren Zielfunktionswert bes-

³⁴ Angabe nach Golden et. al [Gol98].

³⁵ Vgl. Xu und Kelly [Xu96, S. 384 und 387].

ser ist als der der schlechtesten Elitelösung, wird letztere entfernt und die neue entsprechend ihrem Zielfunktionswert in die Liste einsortiert.

Das Verfahren wurde von Xu und Kelly [Xu96] erfolgreich auf sieben der 14 klassischen Christofides, Mingozzi und Toth [Chr79b] VRP-Testprobleme³⁶ ohne Gesamtzeitbeschränkung getestet. Golden et. al [Gol98] präsentieren die Ergebnisse des Verfahrens für die restlichen Probleme. Für Testproblem C9 konnte keine Lösung gefunden werden. Bei dem Verfahren kritisch anzumerken ist die Vielzahl von mehr als 30 einzustellenden Parametern.³⁷

4.2.10 Vereinheitlichter Tabusuche-Algorithmus von Cordeau, Gendreau und Laporte

Ein vereinheitlichter Tabusuche-Algorithmus, genannt *Unified Tabu Search Algorithm*, wurde von Cordeau, Gendreau und Laporte [Cor97] für das periodische und Mehrdepot-Tourenplanungsproblem vorgestellt, wofür es jeweils gute Ergebnisse erzielen konnte. Das Verfahren wurde später leicht modifiziert auf das periodische und Mehrdepot-Tourenplanungsproblem mit Zeitfenster [Cor01a], das VRPTW [Cor01a], das SDVRP mit und ohne Zeitfenster [Cor01b] und schließlich auf das Standardproblem der Tourenplanung [Cor02a] erfolgreich angewendet. Es verwendet, ähnlich wie Taburoute [Gen94], einen Shifting Penalty Ansatz zur kontrollierten Exploration von unzulässigen Lösungen und eine kontinuierliche Diversifikation durch ein Langzeitgedächtnis mit Bestrafung häufiger Lösungsbestandteile. Eine Nachbarlösung wird konstruiert, indem entweder ein Kunde aus seiner gegenwärtigen Route entfernt und in eine andere Route des gleichen Tages (respektive des gleichen Depots oder des gleichen Fahrzeugtyps) eingefügt wird oder einem Kunden ein neues Bedienmuster (respektive Depot oder Fahrzeugtyp) zugeordnet wird. Letzteres erfordert die Entfernung des Kunden aus den Routen des aktuellen Bedienmusters und für jeden Tag des neuen Bedienmusters eine Einfügung des Kunden in diejenige Route, die die Einfügekosten minimiert. Für Tage an denen das aktuelle und neue Bedienmuster übereinstimmen,

³⁶ Vgl. Kapitel 2.1.2.

³⁷ Xu, Chiu und Glover [Xu98] schlagen zum Auffinden guter Parametereinstellungen eine statistische Methode vor.

entfällt die Evaluation einer neuen Position. Die Einfügeevaluation erfolgt im Grundverfahren von Cordeau, Gendreau und Laporte [Cor97] mittels der GENI-Heuristik³⁸ und in späteren Varianten meist durch cheapest insertion [Joh85]. Es werden in einer Iteration stets alle Kunden und für jeden Kunden alle möglichen Moves betrachtet. Die Nachbarlösung mit der geringsten Verschlechterung wird gewählt, soweit sie nicht tabu ist. Zur Beschreibung einer Lösung wird eine Attributmenge genutzt, die für jeden Kunden mindestens³⁹ ein Attribut enthält, das angibt in welcher Route und an welchem Tag (bzw. Depot oder Fahrzeugtyp) er bedient wird. Der Tabumechanismus wird relativ zur Attributmenge definiert und ein Attribut gilt für eine fixe Anzahl an Iterationen als tabu, falls es beim Übergang zur einer Nachbarlösung aus der aktuellen Attributmenge entfernt wird. Eine Nachbarlösung gilt wiederum als tabu, falls alle der neu aufzunehmenden Attribute tabu sind und ein attributspezifisches Aspirationskriterium nicht erfüllt ist. Die Startlösungen sind abhängig vom Problemtyp, basieren jedoch alle auf einer einfachen dem Sweep-Algorithmus ähnlichen Prozedur, bei der ausschließlich die letzte Route bezüglich der Kapazität und der Gesamteinsatzdauer unzulässig werden kann.

4.2.11 Verfahren von Barbarosoğlu und Özgür

Das Tabusuche-Verfahren von Barbarosoğlu und Özgür [Bar99] wurde für das VRP ohne Beschränkung der Gesamteinsatzdauer der Fahrzeuge entwickelt. Die Nachbarschaft bestimmt sich durch Austausch von bis zu vier Kunden zwischen zwei Routen, wobei bei mehreren einzufügenden Kunden stets derjenige Kunde mit dem geringeren Abstand zum nächstgelegenen Kunden der Zielroute zuerst eingefügt wird. Die Einfügeevaluation erfolgt mittels cheapest insertion [Joh85] und die Bewertung der Nachbarlösung nach Durchführung eines 2-opt-Verbesserungsverfahrens [Lin65]. Für zufällig gewählte Routen werden die zu verschiebenden Kunden zum einen rein zufällig bestimmt, zum anderen erfolgt eine gezielte Auswahl derjenigen Kunden, die

³⁸ Vgl. Kapitel 3.1.

³⁹ Ein Kunde kann dabei auch in mehreren Routen eingeplant sein, vgl. das periodische Tourenplanungsproblem.

relativ weit entfernt von ihrem aktuellen Routenschwerpunkt und relativ nahe am Routenschwerpunkt der Zielroute liegen. Für beide Auswahlarten werden jeweils eine gewisse Anzahl α an zulässigen Nachbarlösungen erstellt und die beste gefundene Nachbarlösung, die nicht tabu ist umgesetzt.⁴⁰ Als tabu gilt die Rückeinfügung der Kunden in eine Route aus der sie kürzlich entfernt wurden, wobei die Tabudauer zufällig aus einem Intervall gewählt wird. Das Verfahren konstruiert $\sqrt{n}/2$ Startlösungen nach dem Sweep-Prinzip⁴¹ ausgehend von einem zufällig bestimmten Kunden und $\sqrt{n}/2$ Startlösungen durch sequenzielle Routenbildung, bei der zufällig bestimmte Pendelrouten mit Kunden aufgefüllt werden, solange die Fahrzeugkapazität nicht überschritten wird. Jede Startlösung wird durch eine kurze Anwendung der Tabusuche (mit $\alpha = 5$) verbessert und die beste gefundene Lösung dient als Ausgangslösung für den eigentlichen Tabusuche-Lauf (mit $\alpha = nm/2$). Zusätzlich erfolgt in der Hauptsuche stets ein Neustart auf der besten gefundenen Lösung, falls diese für $5n$ Iterationen nicht verbessert werden kann. Zur Intensivierung wird abschließend auf die \sqrt{nm} besten in der Hauptsuche ermittelten Elitelösungen⁴² eine kurze Tabusuche (ebenfalls mit $\alpha = nm/2$) angewendet.

4.2.12 TTRP-Tabusuche von Chao

Chao stellte sowohl eine Konstruktions- als auch eine Tabusuche-Heuristik für das TTRP vor. Eine Beschreibung des Konstruktionsverfahrens findet sich in Kapitel 3.3. Die damit erzeugte Lösung dient als Ausgangslösung für die Tabusuche. Die Tabusuche durchläuft sequenziell eine Intensivierungs-, eine Descent- und eine Diversifikationsphase. Nach der Descent-Phase erfolgt weiterhin eine Optimierung aller Touren durch ein 2-opt-Verbesserungsverfahren

⁴⁰ Wie sich der Tabustatus eines Moves bei mehreren zu verschiebenden Kunden bestimmt, bleibt unklar; vgl. „If ... vertices $v_1 \in R1$ and $v_2 \in R2$ are exchanged ..., it is forbidden to put both v_1 in $R1$ and v_2 in $R2$ again“ [Bar99, S. 261] und „the algorithm chooses the oldest tabu move“ [Bar99, S. 262].

⁴¹ Vgl. Kapitel 3.2.2.

⁴² Als Elitelösungen werden Lösungen bezeichnet, die durch Zielfunktionswertverbesserung gefunden wurden und bei denen alle zufällig bestimmten Nachbarlösungen zu einem Anstieg des Zielfunktionswertes führten.

[Lin65]. Die drei Phasen werden solange wiederholt, bis zehn komplette Durchläufe ohne Verbesserung der besten Lösung durchgeführt wurden; es werden jedoch mindestens 30 Durchläufe ausgeführt. Die Intensivierungs- und Diversifikationsphasen wiederum durchlaufen jeweils K Iterationen, wobei der Autor Ergebnisse für verschiedene Werte von K ($K \in \{10, 20, \dots, 50\}$) angibt. In jeder Iteration wird in einem ersten Schritt zuerst sequenziell für jeden Kunden ein Verschieben in alle anderen Touren evaluiert und in einem zweiten Schritt ein Austausch eines Kunden mit einem Kunden einer anderen Tour untersucht. Die Einfügebewertung erfolgt dabei mittels cheapest insertion [Joh85]. TTRP-spezifisch können VC-Kunden in alle Touren, also auch in CVR-Subtours, TC-Kunden jedoch nie in CVR-Maintours verschoben werden. Zulässige Lösungen werden angestrebt und eine Nachbarlösung, welche zu einem Aufbau bzw. zu einer Erhöhung einer Überkapazität führt, wird verworfen.⁴³ Aus allen verbleibenden, nicht als tabu geltenden Nachbarlösungen eines betrachteten Kunden wird -falls existent- diejenige mit dem geringsten Zielfunktionswert stets sofort umgesetzt, die entweder zu einer Reduzierung der Überkapazität einer Tour führt oder einen zugehörigen Zielfunktionswert kleiner einem gegebenen Schwellenwert hat. Als Schwellenwert wird eine Abweichung vom Zielfunktionswert der besten gefundenen Lösung um δ % definiert. Für die Intensivierungsphase gilt initial $\delta = 1$, für die Diversifikationsphase $\delta = 10$. Kann in einer Iteration keine Nachbarlösung akzeptiert werden, so wird für die nächste Iteration der Wert von δ in der Intensivierungsphase um 1, in der Diversifikationsphase um 5 erhöht. Für $\delta > 10$ wird die Intensivierungsphase abgebrochen. Ebenso die Diversifikationsphase, falls in einer Iteration mindestens eine Nachbarlösung umgesetzt werden kann. Als Tabukriterium wird die Rückeinfügung eines Kunden in eine Tour⁴⁴, aus der dieser kürzlich entfernt wurde definiert. Die Tabudauer wird dabei zufällig aus dem Intervall $[5; 10]$ gewählt. Eine Nachbarlösung gilt als tabu, falls mindestens einer der Kunden des zugehörigen Moves tabu ist bzw. die Nachbarlösung keine neue beste Lösung darstellt. Die Descent-Phase

⁴³ Liegt eine zulässige Lösung vor, erfolgt daher stets nur noch ein Übergang zu zulässigen Nachbarlösungen.

⁴⁴ Touren, insbesondere Subtours, können im Verlauf der Suche „leer“ werden. Aus Sicht des Algorithmus bleiben sie dennoch stets erhalten und sind fix einem Root zugeordnet. Dies ermöglicht eine eindeutige Referenzierung.

hat den gleichen Aufbau wie die beiden anderen Phasen, enthält jedoch als dritten Schritt zusätzlich einen sog. Root Refining Move. Die ersten beiden Schritte unterscheiden sich dahingehend, dass keine Taburestriktionen angewendet und keine Zielfunktionswertverschlechterungen akzeptiert werden. Der Root Refining Move, welcher eine Neuansbindung der Subtours an einen alternativen Root-Kandidaten der zugehörigen CVR-Maintour evaluiert, verläuft ähnlich zum Root Refining Move, wie er in Kapitel 3.4 und graphisch auf Seite 83 dargestellt ist. Beim Root Refining werden ausschließlich Neuansbindungen umgesetzt, die zu einer Verbesserung des Zielfunktionswertes führen. Die Descent-Schritte werden solange wiederholt, bis in einer Iteration keine Verbesserung mehr gefunden werden kann.

Es gilt zu erwähnen, dass im Verfahren von Chao [Cha02] die maximale Anzahl an Subtours je CVR durch die Ausgangslösung vorgegeben ist und im Verlauf der Tabusuche nicht erhöht werden kann. Dadurch werden Teile des Lösungsraumes bereits durch Vorgaben aus der Konstruktionsphase aus dem Suchraum der Tabusuche ausgeschlossen. Dies kann unter Umständen dazu führen, dass ein globales Optimum nicht erreicht werden kann. Des Weiteren enthält das formale TTRP-Modell von Chao [Cha02] eine Gesamtzeitbeschränkung für die Fahrzeuge [Cha02, S. 35]. Es bleibt jedoch unklar, wie eine entsprechende Restriktion im Verfahren berücksichtigt wird.

4.2.13 BoneRoute-Verfahren von Tarantilis und Kiranoudis

Tarantilis und Kiranoudis [Tar02b] entwickelten eine Adaptive Memory-basierte⁴⁵ Tabusuche, genannt *BoneRoute*, für das VRP.⁴⁶ Die Methode unterteilt sich in zwei Phasen. In einer ersten Phase wird eine beschränkte Liste initial mit VRP-Routen befüllt. Hierzu wird der gewichtete Savings-Algorithmus von Paessens [Pae88] mit verschiedenen Parametereinstellungen durchlaufen und jede Lösung mittels einer einfachen Tabusuche weiter verbessert. Die Routen der erhaltenen Lösungen werden nach deren Zielfunk-

⁴⁵ Vgl. Kapitel 4.2.5.

⁴⁶ Eine ähnliche Technik, genannt *Searching for Backbones*, wurde von Schneider [Sch99] entwickelt.

tionswert in die Liste einsortiert. Die Tabusuche verwendet einen einfachen Shift Move, einen Swap Move zweier Kunden sowie einen 2-opt Move [Lin65]. Welcher Move auszuführen ist und ob der Move innerhalb einer Route oder zwischen zwei verschiedenen Routen anzuwenden ist, wird zufällig bestimmt. Die beste Nachbarlösung, die nicht tabu ist, wird umgesetzt. Als Tabukriterium wird die Rückeinfügung eines Kunden in eine Route, aus der er kürzlich entfernt wurde definiert. Der Tabustatus einer Nachbarlösung⁴⁷ wird aufgehoben, falls diese eine neue beste Lösung darstellt. Die Tabudauer ist auf den Wert 20 fixiert.

In einer zweiten Phase wird stets eine neue Lösung aus Elementen der in der Liste enthaltenen Routen gebildet und diese anschließend durch den Paessens-Algorithmus [Pae88] und durch Anwendung der Tabusuche verbessert. Kann dadurch eine Lösung mit besserer Qualität als die schlechteste Lösung in der Liste gefunden werden, so werden die Routen der schlechtesten Lösung entfernt und die Routen der besseren Lösung einsortiert. Dieser Ablauf wird für eine gegebene Anzahl an Iterationen wiederholt. Die Methode unterscheidet sich vom Verfahren von Rochat und Taillard [Roc95] insbesondere darin, dass nicht komplette Routen zu einem neuen Tourenplan kombiniert werden, sondern gleiche Kundensequenzen (bones) verschiedener Routen als Grundlage für einen neuen Tourenplan dienen. Eine Kundensequenz ist hierbei spezifiziert durch die Anzahl der Kunden (bone-length) und die Häufigkeit (bone-frequency), mit der sie in den in der Liste enthaltenen Routen vorkommt. Im Verfahren wird eine minimale bone-length und bone-frequency vorgegeben. Falls Kunden in mehreren verschiedenen Kundensequenzen enthalten sind, wird stets die Kundensequenz mit dem besten zugehörigen Zielfunktionswert ausgewählt. Es sind nicht notwendigerweise alle Kunden in einer Kundensequenz enthalten. In der neuen Lösung wird daher jeder Kundensequenz und jedem unzugeordneten Kunden ein Fahrzeug zugewiesen. Dies führt u.a. zu Tourenplänen mit unterschiedlicher Anzahl an eingesetzten Fahrzeugen.

Das Verfahren wurde mit einer bone-length von sechs auf den 14 klassischen VRP-Testproblemen von Christofides, Mingozzi und Toth [Chr79b] und mit

⁴⁷ Wie sich der genaue Tabustatus einer Nachbarlösung bestimmt wird nicht eindeutig spezifiziert, vgl. Tarantilis und Kiranoudis [Tar02b, S. 232].

bone-length von zehn auf acht der 20 VRP-Testprobleme von Golden et al. [Gol98] getestet. Für diese Testprobleme konnten gute Ergebnisse erzielt werden. Dies gilt auch für eine Anwendung des Verfahrens auf das offene VRP, bei dem eine Rückfahrt zum Depot nach Besuch des letzten Kunden einer Route entfällt (vgl. Tarantilis, Diakoulaki und Kiranoudis [Tar04b]). Für diese Anwendung wurde die bone-length auf den Wert drei gesetzt. Eine Kundensequenz musste stets in mindestens zwei Routen enthalten sein, um sich für die Extraktion zu qualifizieren.

4.2.14 Granulare Tabusuche von Toth und Vigo

Toth und Vigo⁴⁸ [Tot04a] präsentieren eine Tabusuche bei der für eine gegebene Nachbarschaft lediglich eine Teilmenge aller möglichen Nachbarlösungen untersucht wird. Es sind diejenigen Nachbarlösungen ausgeschlossen, die Elemente enthalten, für die es unwahrscheinlich ist, dass sie in einer optimalen Lösung vorkommen. Die Autoren bezeichnen das Verfahren als *Granulare Tabusuche* und es kann als effiziente Implementierung einer Kandidatenlisten-Strategie⁴⁹ für Tabusuche-Heuristiken gesehen werden.

Im Kontext des VRP verwenden sie einen reduzierten Graphen G' der alle Kanten beinhaltet, die für eine Aufnahme in eine aktuell vorliegende Lösung zu betrachten sind. Dies sind insbesondere alle „kurzen“ Kanten, alle Verbindungen zum Depot und alle Kanten der aktuellen und der besten gefundenen Lösung. Eine Kante wird als „kurz“ erachtet, wenn ihre Kostenbewertung einen Schwellenwert (granularity threshold) $\beta\bar{c}$ nicht überschreitet. Der Parameter β (sparsification parameter) wird zwischen 1,0 und 2,5 gewählt und steuert die Granularität der Nachbarschaft. Der Wert von \bar{c} bezeichnet die durchschnittlichen Kantenkosten einer guten zulässigen Lösung, wie sie mit dem Clarke und Wright Savings-Algorithmus [Cla64] bestimmt wird. Im Verlauf der Suche werden ausschließlich Moves evaluiert, die mindestens eine Kante des Graphen G' in der Transformation beinhalten. Dies bedeutet

⁴⁸ Die Idee wurde bereits 1998 von Toth und Vigo [Tot98b] in einem Arbeitspapier präsentiert. Die Ausführungen in diesem Kapitel beziehen sich jedoch ausschließlich auf Toth und Vigo [Tot04a].

⁴⁹ Vgl. Glover und Laguna [Glo97, S. 61].

jedoch nicht, dass nicht auch „längere“ Kanten in die aktuelle Lösung aufgenommen werden können, sondern lediglich, dass Moves die ausschließlich „längere“ Kanten involvieren von der Evaluierung ausgenommen sind.

Diese Strategie wurde in eine Tabusuche eingebettet, die mehrere Nachbarschaften nutzt. Evaluiert wird das Verschieben von zusammenhängenden Kundensegmenten von bis zu drei Kunden in eine andere Route, der Austausch zweier Kunden verschiedener Routen und 2-opt^{*} Moves [Pot95] zwischen zwei Routen. Der Besuch unzulässiger Lösungen ist erlaubt und wird mit einem Shifting Penalty Ansatz⁵⁰ geregelt. Ein Move gilt als tabu, falls mindestens eine kürzlich entfernte Kante erneut aufgenommen wird.⁵¹ Die Tabudauer wird dabei zufällig aus dem Intervall $[5; 10]$ gewählt. Alle $2n$ Iterationen wird der Graph G' mit der initialen Einstellung $\beta = 1,25$ neu bestimmt. Nach $15n$ Iterationen ohne Verbesserung der besten gefundenen Lösung erfolgt ein Neustart auf dieser Lösung und der Graph G' wird mit $\beta = 1,75$ neu generiert. Durch die Erhöhung von β werden „längere“ Kanten in G' aufgenommen und eine Diversifikation der Suche eingeleitet, welche für n Iterationen beibehalten wird. Danach wird β auf die initale Einstellung zurückgesetzt. Eine Angabe des verwendeten Stoppkriteriums erfolgt nicht. Die Autoren testeten das Verfahren auf den 14 klassischen Christofides, Mingozzi und Toth [Chr79b] VRP-Testproblemen sowie den 20 VRP-Testdatensätzen von Golden et. al [Gol98]. Es wurde gezeigt, dass durch den Ausschluss vermutlich unnötiger Moves die Rechenzeit drastisch reduziert wird und das Verfahren bezüglich der Qualität der erhaltenen Lösungen dabei trotzdem mit den besten bekannten Tabusuche-Heuristiken konkurrieren kann.

⁵⁰ Vgl. Gendreau, Hertz und Laporte [Gen94].

⁵¹ Die Autoren treffen keine Aussage bezüglich eines Aspirationskriteriums.

4.3 Vergleich der fokussierten VRP-Verfahren

Im Folgenden werden die in Kapitel 4.2 vorgestellten VRP-Verfahren anhand der 14 klassischen Christofides, Mingozzi und Toth [Chr79b] VRP-Testprobleme⁵² verglichen. Für einen Vergleich der Mehrdepot-Verfahren von Renaud, Laporte und Boctor [Ren96a] und Cordeau, Gendreau und Laporte [Cor97] wird verwiesen auf Tabelle 2.4, Seite 41, für einen Vergleich des Verfahrens von Cordeau, Gendreau und Laporte [Cor97] mit anderen PVRP-Verfahren auf Tabelle 2.2, Seite 31, und für einen Vergleich des TTRP-Verfahrens von Chao [Cha02] mit dem in Kapitel 5 beschriebenen neuen TTRP-Algorithmus auf Kapitel 8.2.1. Für das Verfahren von Semet und Taillard [Sem93] liegen keine Ergebnisse für standardisierte Testprobleme vor.

Die Ergebnisse der VRP-Verfahren sind -soweit verfügbar- in den Tabellen 4.3 und 4.4 zusammengefasst. Die einem Verfahren zugehörigen Spalten sind mit der Bibliotheksreferenz gekennzeichnet und beinhalten die Gesamtdistanz $c(s)$ und die benötigte Laufzeit T für das jeweilige Testproblem. Für die Verfahren von Taillard [Tai93] und Rochat und Taillard [Roc95] wurde auf eine Angabe der Laufzeiten verzichtet, da die angegebenen Lösungen die besten Ergebnisse einer unbestimmten Anzahl an Durchläufen darstellen. Das Verfahren von Barbarosoğlu und Özgür [Bar99] wurde ausschließlich für Probleme ohne Gesamtzeitbeschränkung entwickelt.⁵³ Die ersten drei Spalten geben die Problemcharakteristika und die letzte Spalte die Gesamtdistanz der besten bekannten Lösung s^{**} wieder. Die vorletzte Zeile gibt den Durchschnitt über die sieben Probleme ohne Gesamtzeitbeschränkung, die letzte Zeile den Durchschnitt über alle 14 Probleme an.

Viele der aufgeführten VRP-Verfahren konnten im Durchschnitt Lösungen mit weniger als 1% Abweichung von den besten bekannten Lösungen finden. Ein direkter Vergleich der VRP-Verfahren gestaltet sich jedoch trotz der Verwendung standardisierter Testprobleme schwierig, wenn nicht gar unmöglich.

⁵² Vgl. Kapitel 2.1.2.

⁵³ Ebenso wurde das Verfahren von Xu und Kelly [Xu96] nur für das VRP ohne Gesamtzeitbeschränkung entwickelt. Die Angaben für die Testdatensätze mit Gesamtzeitbeschränkung entstammen Golden et al. [Gol98], wobei die notwendigen Modifikationen im Verfahren nicht genauer spezifiziert werden. Für Problem C9 konnte keine Lösung gefunden werden.

Tabelle 4.3: Vergleich ausgewählter VRP-Tabusuche-Heuristiken, Teil 1

ID	n	Typ ^a	[Osm93] ^b		[Tai93]		[Gen94]		[Roc95]		[Reg96] ^p		[Reg98a] ⁱ	
			c(s)	T ^c	c(s) ^d	T ^e	c(s)	T ^e	c(s) ^f	c(s)	T ^h	c(s)	T ^j	c(s ^{***})
C1	50	C	524	1,90	524,61	524,61	6,0	-	-	524,61	0,85	557,86	0,07	524,61
C2	75	C	844	0,84	835,26	835,77	53,8	-	-	837,50	16,80	847,00	0,38	835,26
C3	100	C	838	25,72	826,14	829,45	18,4	-	-	827,53	33,90	832,04	0,93	826,14
C4	150	C	1044	59,33	1028,42	1036,16	58,8	-	-	1054,29	27,20	1047,21	1,91	1028,42
C5	199	C	1334	54,10	1298,79	1322,65	90,9	1291,45	-	1338,49	16,25	1352,88	6,52	1291,45
C6	50	C,D	555	2,88	555,43	555,43	13,5	-	-	555,43	3,17	562,74	0,11	555,43
C7	75	C,D	911	17,61	909,68	913,23	54,6	-	-	909,68	23,10	948,79	0,22	909,68
C8	100	C,D	878	49,99	865,94	865,94	25,6	-	-	868,29	8,60	893,73	0,77	865,94
C9	150	C,D	1184	76,26	1162,55	1177,76	71,0	-	-	1178,84	15,55	1237,77	1,91	1162,55
C10	199	C,D	1441	76,02	1397,94	1418,51	99,8	1395,85	-	1420,84	52,02	1475,17	5,26	1395,85
C11	120	C	1043	24,07	1042,11	1073,47	22,2	-	-	1043,54	6,30	1057,26	1,23	1042,11
C12	100	C	819	14,87	819,56	819,56	16,0	-	-	819,56	1,22	821,63	0,54	819,56
C13	120	C,D	1547	47,23	1541,14	1573,81	59,2	-	-	1550,17	2,00	1581,96	3,37	1541,14
C14	100	C,D	866	19,60	866,37	866,37	65,7	-	-	866,37	9,42	867,79	0,75	866,37
Avg C1-C5,C11-C12			920,86	25,83	910,70	920,24	38,01	-	-	920,79	14,65	930,84	1,65	909,65
Avg C1-C14			987,71	33,60	976,71	986,62	46,82	-	-	985,37	15,46	1005,99	1,71	976,04

^a C: Kapazitätsbeschränkung, D: Gesamtzeitbeschränkung.

^b FBA-Version; keine Angabe der Nachkommastellen für $c(s)$ im Originalartikel.

^c Minuten auf einer VAX 8600 Workstation.

^d Zeitangaben unklar; Verwendung von Parallelrechnern.

^e Silicon Graphics Workstation (36 MHz, 57 Mflops).

^f Keine Zeitangaben vorhanden.

^g Sequenzielle Version.

^h Minuten auf einer SUN Sparc 4 Workstation.

ⁱ Für $\lambda \in [-2, 2]$, vgl. Rego [Reg98a].

^j Minuten auf einem HP9000/712 Computer.

Tabelle 4.4: Vergleich ausgewählter VRP-Tabusuche-Heuristiken, Teil 2

ID	n	Typ ^k	[Xu96] ^l		[Cor02a]		[Bar99]		[Tar02b]		[Tot04a]	
			c(s)	T ^m	c(s)	T ⁿ	c(s)	T ^o	c(s)	T ^p	c(s)	T ^q
C1	50	C	524,61	29,92	524,61	4,57	524,61	7,59	524,61	0,11	524,61	0,81
C2	75	C	835,26	48,80	835,45	7,27	836,71	40,03	835,26	4,56	838,60	2,21
C3	100	C	826,14	71,93	829,44	11,23	828,72	34,00	826,14	7,66	828,56	2,39
C4	150	C	1029,56	149,90	1038,44	18,72	1043,89	76,73	1030,88	9,13	1033,21	4,51
C5	199	C	1298,58	272,52	1305,87	28,10	1306,16	126,58	1314,11	16,97	1318,25	7,50
C6	50	C,D	555,43	30,67	555,43	4,61	-	-	555,43	0,10	555,43	0,86
C7	75	C,D	965,62	102,13	909,68	7,55	-	-	909,68	0,92	920,72	2,75
C8	100	C,D	881,38	98,15	866,38	11,17	-	-	865,94	4,28	869,48	2,90
C9	150	C,D	-	168,08	1171,81	19,17	-	-	1163,19	5,83	1173,12	5,67
C10	199	C,D	1439,29	368,37	1415,40	29,74	-	-	1408,82	14,32	1435,74	9,11
C11	120	C	1042,11	91,23	1074,13	14,15	1051,18	70,21	1042,11	0,21	1042,87	3,18
C12	100	C	819,56	56,61	819,56	10,99	819,56	37,95	819,56	0,10	819,56	1,10
C13	120	C,D	1628,55	201,75	1568,91	14,53	-	-	1544,01	8,75	1545,51	9,34
C14	100	C,D	915,24	152,98	866,53	10,65	-	-	866,37	0,10	866,37	1,41
Avg C1-C5, C11-C12			910,83	102,99	918,21	13,58	915,83	56,16	913,24	5,53	915,09	3,10
Avg C1-C14			-	131,65	984,40	13,75	-	-	979,01	5,22	983,72	3,84

^k C: Kapazitätsbeschränkung, D: Gesamtzeitbeschränkung.^l Angaben nach Golden et al. [Gol98]. Für Problem C9 konnte keine zulässige Lösung gefunden werden.^m Minuten auf einer DEC ALPHA Workstation (DEC OSF/1 v3.0).ⁿ Minuten auf einer Sun Ultrasparc 10 (440 MHz) Workstation.^o Minuten auf einem Pentium 133 Computer.^p Minuten auf einem Pentium II/400 Computer.^q Minuten auf einem Pentium 200 Computer.

Zum Beispiel geben Taillard [Tai93] und Rochat und Taillard [Roc95] nur die besten gefunden Lösungen einer unbestimmten Anzahl an Durchläufen an, wohingegen andere Autoren (zusätzlich) die Ergebnisse eines repräsentativen Laufs angeben. Durch die Verwendung unterschiedlicher Computertypen⁵⁴, unterschiedlicher Programmiersprachen und Compiler und den unterschiedlichen Programmierfertigkeiten der jeweiligen Autoren erscheint ein objektiver Vergleich der Rechenzeiten kaum möglich. Des Weiteren wurden die Verfahren von den Autoren mit z.T. unterschiedlichen Rechengenauigkeiten implementiert. Letzteres kann zu teilweise deutlichen Abweichungen in den erhaltenen Zielfunktionswerten führen und bei Vorliegen zeitlicher Restriktionen sogar die Zulässigkeit einer Lösung in Frage stellen.⁵⁵ Die aufgeführten Vergleichswerte sind daher mit Vorsicht zu betrachten. Eine konkrete Aussage, welches der genannten Verfahren das derzeit beste ist, ist aus den genannten Gründen nicht möglich.

Festzustellen ist, dass viele der bekannten Tabusuche-Verfahren trotz guter Lösungsqualitäten den Nachteil innehaben, dass sie zumeist speziell auf einen Problemtyp zugeschnitten sind, z.T. viele einzustellende Parameter beinhalten⁵⁶ und das Design (und damit wiederum die Implementierung) der Algorithmen z.T. äußerst komplex ist. Cordeau et al. [Cor02a] fordern daher insbesondere Heuristiken nicht ausschließlich anhand der Ergebnisqualität und der Rechenzeit zu messen, sondern auch deren Flexibilität bzgl. zusätzlicher Restriktionen und die Einfachheit des Designs bei der Bewertung einfließen zu lassen. Der vereinheitlichte Tabusuche-Algorithmus von Cordeau, Gendreau und Laporte [Cor97] orientiert sich an diesen Kriterien. Weiterhin sollten einheitliche Richtlinien beim Test neuer Heuristiken angewendet werden, um einen besseren Vergleich mit anderen Verfahren zu ermöglichen. Barr et al. [Bar95], Johnson [Joh02] und Golden et al. [Gol98] geben hierzu Anhaltspunkte. Aufgrund der immer schneller werdenden Rechenleistung der Computer sollten zudem auch Ergebnisse für größere Problemdatensätze, wie die von Golden et al. [Gol98], angegeben werden, um bessere Aussagen zu den einzelnen Verfahren treffen zu können [Gen02b].

⁵⁴ Dongarra [Don03] schlägt zum Vergleich unterschiedlicher Computertypen die Verwendung von Umrechnungsfaktoren vor.

⁵⁵ Vgl. Gendreau, Hertz und Laporte [Gen94] zu dieser Problematik.

⁵⁶ Vgl. das Verfahren von Xu und Kelly [Xu96], welches mehr als 30 Parameter hat.

4.4 Die Tabusuche in Bezug zu anderen Metaheuristiken

Metaheuristiken sind gegenwärtig die besten verfügbaren Techniken zur Lösung komplexer kombinatorischer Optimierungsprobleme. Jede der bekannten metaheuristischen Techniken⁵⁷ ist dabei grundsätzlich in der Lage gute Resultate zu erzielen. Dennoch haben Metaheuristiken auch typspezifische Nachteile, die es meist geschickt zu kompensieren gilt. Eine *Hybridisierung* von Metaheuristiken eröffnet eine Möglichkeit, die Nachteile einzelner Verfahren abzuschwächen. Unter Hybridisierung wird eine Verknüpfung aus zwei oder mehreren, an sich eigenständigen Lösungstechniken verstanden. Ziel und Zweck einer Hybridisierung ist es, die Vorteile der verschiedenen Techniken in einem Lösungsansatz zu vereinen, um einen, im Vergleich zur alleinigen Anwendung der verwendeten Techniken, effizienteren Lösungsansatz zu erreichen. Bisher wurden eine Vielzahl an Hybriden aus den verschiedensten Grundtechniken entwickelt. Beispielsweise genannt seien Verknüpfungen der Tabusuche mit den Metaheuristiken Simulated Annealing (Chiang und Russell [Chi96], Knauer [Kna02]), Genetischen Algorithmen (Glover, Kelly und Laguna [Glo95a], Liaw [Lia00]), Scatter Search (Greisdorfer [Gre03]), GRASP (Resende und Ribeiro [Res03, S. 237]), Variable Neighborhood Search (Hansen und Mladenović [Han03, S. 150]), Guided Local Search (Voudouris und Tsang [Vou03, S. 189]), Ameisensysteme (Ramalhinho-Lourenço und Serra [Ram98]) sowie mit Constraint Programming (Pesant und Gendreau [Pes99]) und Techniken der ganzzahligen linearen Programmierung (Glover und Laguna [Glo97, S. 153]), wie z.B. den Lösungstechniken Branch-and-Bound (Glover, Parker und Ryan [Glo96]) und Branch-and-Cut (Cordeau [Cor03b]).

Trotz alledem unterstreichen Glover und Laguna⁵⁸ [Glo97, S. 308] jedoch, dass eine Hybridisierung nicht zwingend vorteilhaft und einer „reinen“ Tabusuche-Anwendung überlegen sein muss. Dies gilt insbesondere, falls die Technik wohl gewählte Intensivierungs- und Diversifikationsstrategien beinhaltet.

⁵⁷ Vgl. Glover und Kochenberger [Glo03a] für einen umfassenden Überblick.

⁵⁸ Eine Diskussion zur Hybridisierung von Tabusuche findet sich bei Glover und Laguna [Glo97, S. 305].

Für Tabusuche-Anwendungen sind letztere hierbei von entscheidender Bedeutung [Gen03].

Obwohl die bekannten Metaheuristiken scheinbar unterschiedliche algorithmische Konzepte⁵⁹ aufweisen, zeigt eine genauere Analyse, dass sich gemeinsame Grundkonzepte herauskristallisieren und sich neuere Implementierungen im algorithmischen Basisdesign mehr und mehr annähern. Gendreau und Potvin [Gen02c] verdeutlichen diesen Sachverhalt, indem sie diese Grundkonzepte in einem einheitlichen Rahmen aufzeigen. Insbesondere sind dies die folgenden algorithmischen Komponenten [Gen02c, S. 12]:

- *Konstruktion*

Alle Metaheuristiken erstellen eine oder mehrere initiale Lösungen. Die iterativen, konstruktionsbasierten Metaheuristiken GRASP und Ameisensysteme nutzen diese Komponente insbesondere, um unterschiedliche Lösungen zu konstruieren.

- *Rekombination*

Diese Komponente generiert neue Lösungen durch Rekombination vorliegender Lösungen. Dies ist typisch für populationsbasierte Verfahren wie Genetische Algorithmen und Scatter Search, bei denen mehrere Lösungen in einem Pool gespeichert werden.

- *Zufällige Modifikation*

Die gegenwärtige Lösung wird zufällig modifiziert. Viele der bekannten Metaheuristiken, wie z.B. Simulated Annealing, Schwellenwertalgorithmen, GRASP und Ameisensysteme, nutzen Zufallsentscheidungen als elementare Grundbestandteile.

- *Verbesserung*

Die aktuelle Lösung wird explizit verbessert, z.B. durch Wahl der besten Nachbarlösung, durch Anwendung einer lokalen Descent-Heuristik oder durch Projektion der Lösung in den zulässigen Bereich des Lösungsraumes.

⁵⁹ Für einen Überblick vgl. Glover und Kochenberger [Glo03a].

- *Aktualisierung der Speicherstrukturen*

Diese Komponente aktualisiert algorithmusspezifische Speicherstrukturen wie die Tabuliste (Tabusuche), die Pheromonspuren (Ameisensysteme) oder die Lösungsmengen (Genetische Algorithmen und Scatter Search).

- *Aktualisierung der Parameter und Nachbarschaft*

Die verwendeten Parametereinstellungen werden adjustiert (Guided Local Search) oder die zugrunde liegende Nachbarschaft modifiziert (Variable Neighborhood Search).

Die Metaheuristik Tabusuche kombiniert die Komponenten zur Konstruktion einer Startlösung, zur Lösungsverbesserung und zur Aktualisierung der Speicherstruktur (Tabuliste). Die vorgestellten Tabusuche-Heuristiken für Tourenplanungsprobleme nutzen darüber hinaus noch weitere der genannten Komponenten. Die Rekombinationskomponente wird beispielsweise in den Adaptive Memory-basierten Verfahren von Rochat und Taillard [Roc95] und Tarantilis und Kiranoudis [Tar02b] genutzt, eine Parameteraktualisierung mittels Shifting Penalty Ansatz von Gendreau, Hertz und Laporte [Gen94] und Cordeau, Gendreau und Laporte [Cor97] sowie unterschiedliche Nachbarschaften von Xu und Kelly [Xu96] und Renaud, Laporte und Bector [Ren96a]. Zufallselemente sind in den meisten Verfahren enthalten, z.B. durch Zufallsauswahl der Tabudauern, aber insbesondere auch zur Bestimmung der Nachbarlösungen in den Verfahren von Barbarosoğlu und Özgür [Bar99] und Gendreau, Hertz und Laporte [Gen94].

V.a. die Metaheuristiken Simulated Annealing, Tabusuche und Genetische Algorithmen wurden bislang zur Lösung von Tourenplanungsproblemen eingesetzt.⁶⁰ Nach Gendreau, Laporte und Potvin [Gen97, Gen02b], Cordeau et al. [Cor02a], Cordeau und Laporte [Cor02b] und Golden et al. [Gol98] ist von den bekannten Metaheuristiken die Tabusuche die am besten geeignete Optimierungsmethode zur Lösung komplexer Tourenplanungsprobleme. Dies wird durch die guten Ergebnisse untermauert, die mit Hilfe von Tabusuche-Heuristiken für die verschiedensten Varianten von Tourenplanungsproblemen

⁶⁰ Vgl. z.B. Jacobi [Jac99] und Gendreau, Laporte und Potvin [Gen02b].

erzielt werden konnten. Hier sind v.a. auch die in Kapitel 4.2 aufgeführten Tabusuche-Verfahren zu nennen. Beispielsweise sind „reine“ Genetische Algorithmen und Neuronale Netze bei diesem Anwendungsproblem der Tabusuche unterlegen [Gen02b, S. 148]. Lösungsansätze, die auf den Techniken von Simulated Annealing, Schwellenwertalgorithmen und Ameisensystemen basieren erweisen sich i.d.R. ebenfalls als nicht konkurrenzfähig [Gen02b, S. 148]. Die Tabusuche hat insbesondere den Vorteil, dass Lösungen nicht explizit codiert werden müssen, wie es z.B. bei Genetischen Algorithmen der Fall ist. Auch zeigten sich Tabusuche-Heuristiken für diesen Problemtyp robuster als andere bekannte Verfahren, wie z.B. Simulated Annealing [Gen97, S. 336]. Inwieweit eine konkrete Tabusuche-Heuristik mit anderen Metaheuristiken, mit hybriden Verfahren, aber auch anderen Tabusuche-Implementierungen konkurrieren kann, ist letztlich eine Frage der spezifischen Ausgestaltung der Heuristik. Die Herausforderung bei der Entwicklung einer leistungsfähigen Heuristik besteht deshalb darin, aus der Vielfalt an möglichen strategischen Maßnahmen eine effektive und effiziente Kombination herauszuarbeiten. Die oben aufgeführten algorithmischen Grundkomponenten können hierbei als Orientierungshilfe dienen.

Kapitel 5

Entwicklung einer Tabusuche-Heuristik für das TTRP

In diesem Kapitel soll eine neue Tabusuche-Heuristik für das TTRP vorgestellt werden. Das behandelte Problem entspricht dabei dem TTRP-Modell von Chao [Cha02] wie es in Kapitel 2.3.3.1 beschrieben ist. Zuerst werden die Komponenten der Heuristik erläutert und anschließend eine Sensitivitätsanalyse für die verwendeten Parameter durchgeführt.

Die Heuristik wird mit der besten, nicht notwendigerweise zulässigen Lösung, die mit der T-Cluster Heuristik¹ gefunden wurde initialisiert.

5.1 Komponenten des Verfahrens

5.1.1 Lösungsraum

Wie auch bei anderen bekannten Tabusuche-Heuristiken² wird der Besuch unzulässiger Lösungen im Verlauf der Suche temporär ermöglicht. Die Unzulässigkeit wird durch einen *Shifting Penalty Ansatz* [Gen94], d.h. durch

¹ Vgl. Kapitel 3.4.

² Vgl. z.B. Gendreau, Hertz und Laporte [Gen94] oder Cordeau, Gendreau und Laporte [Cor97]

Addition eines an den Suchverlauf angepassten Strafterms zur Evaluierungsfunktion kontrolliert. Dementsprechend wird eine Lösung mittels einer Evaluierungsfunktion $f(s) := c(s) + \alpha \cdot q(s)$ (mit $c(s), q(s), \alpha \geq 0$) bewertet. Die Gesamtdistanz $c(s)$ ergibt sich als die Summe über die Tourdistanzen aller Touren und die gesamte Überkapazität $q(s)$ als die Summe der Überkapazitäten aller PTRs und aller Subtours (falls die Angebotsmenge der Subtour größer ist als Q^Z) sowie aller CVRs (falls die gesamte Fahrzeugkapazität einschließlich des Anhängers $Q^Z + Q^A$ überschritten wird). Für eine zulässige Lösung gilt $q(s) = 0$. Der Parameter α wird genutzt, um den Strafterm zu adjustieren. Dem Verfahren von Cordeau et al. [Cor97] folgend wird α initial auf 1 gesetzt und in jeder Iteration mit $(1 + \delta)$ multipliziert ($\delta \geq 0$), falls die gegenwärtige Lösung unzulässig ist und ansonsten dividiert durch $(1 + \delta)$. Zu kleine oder zu große Werte von α können jedoch nicht immer den gewünschten Steuerungseffekt für die Suche sicherstellen. Daher wird α eingeschränkt auf den Wertebereich zwischen 0,01 und 100.

Obwohl eine Beschränkung der Gesamtdistanz einer Route in den verwendeten Testdatensätzen nicht gegeben ist, ist die geschilderte Tabusuche jedoch in der Lage, diese Restriktion zu berücksichtigen. Hierzu wird ein zweiter Strafterm zur Evaluierungsfunktion addiert und in analoger Weise zum ersten Strafterm behandelt, wie auch z.B. im Verfahren von Cordeau et al. [Cor97] .

Das diesem Lösungsansatz zugrunde liegende TTRP-Modell entspricht dem Modell von Chao [Cha02]. Insbesondere minimiert die Zielfunktion ausschließlich die Gesamtdistanz bzw. die reine Fahrtzeit, soweit anstelle einer Distanzmatrix eine Zeitmatrix zugrunde gelegt wird. Eine Berücksichtigung der Bedienzeiten, der Transferzeiten für das Umladen von Ladung, der Zeiten für das An-/Abkoppeln der Anhänger oder eine Unterscheidung zwischen Fahrtzeiten mit und ohne Anhänger erfolgt nicht. Nur auf diese Weise ist ein Vergleich zwischen dem neu entwickelten Verfahren und der Methode von Chao [Cha02] möglich.

5.1.2 Nachbarschaftsdefinition

Die Nachbarschaft $N(s)$ einer Lösung s ist spezifiziert durch alle möglichen Lösungen die durch Anwendung einer der folgenden Transformationen aufs erreicht werden können:

- Verschieben einer Teilmenge von aufeinander folgenden Kunden in eine andere existierende Tour oder in neue Subtour.
- Austausch zweier Teilmengen von aufeinander folgenden Kunden zwischen zwei existierenden Touren.
- Neuanbindung einer Subtour an einen alternativen Root-Kandidaten der eigenen CVR-Maintour (Subtour Root Refining)

Bezeichne (T_p, T_q) ein Paar nicht identischer Touren (die nicht notwendigerweise verschiedenen Routen angehören müssen), so werde ein Verschieben einer nicht leeren Teilmenge S_p der Größe $|S_p| \leq \nu_1$ (in Bezug auf die Anzahl der Kunden) von aufeinander folgenden Kunden von T_p nach T_q betrachtet. Diese Operation wird als *Shift Move* bezeichnet und der Parameter ν_1 bestimmt die Länge des Kundenteilstücks das verschoben werden soll. Gilt $\nu_1 = 1$, so wird genau ein Kunde bewegt. Ein Shift Move kann die Anzahl der Touren reduzieren. Um auch den Aufbau neuer Touren zu ermöglichen, wird das Verschieben der Teilmenge S_p in leere PTRs, in leere CVR-Maintouren und in neue Subtouren zu CVR-Routen betrachtet. In diesem Ansatz werden CVR-Maintouren und PTRs als statisch angesehen und können deshalb in Bezug auf die Anzahl der Kunden (ohne das Depot) leer werden. Subtouren hingegen werden dynamisch gehandhabt. Sie werden gelöscht, falls sie keine weiteren Kunden außer dem Root enthalten und müssen neu angelegt werden, falls eine neue Subtour aufgebaut wird. Diese dynamische Handhabung erlaubt eine variable, nicht beschränkte Anzahl von Subtouren im Verlauf der Suche und ist eine wertvolle Komponente des Verfahrens.³ Das Erstellen einer neuen Subtour wird jedoch nur dann evaluiert, wenn die zu verschiebende

³ Im Verfahren von Chao [Cha02] wird die Anzahl der Subtouren einer CVR von der Konstruktionsheuristik bestimmt. Eine Erhöhung der Anzahl an Subtouren einer CVR im Verlauf der Tabusuche ist nicht möglich.

Teilmenge S_p mindestens einen TC-Kunden enthält.⁴ Root-Kandidaten für eine neue Subtour sind VC-Kunden auf einer CVR-Maintour oder das Depot. Der aktuelle Root der Quell-Tour T_p wird im Falle eines Intra-Route Moves als Root-Kandidat ausgeschlossen.⁵

Falls eine nicht leere Teilmenge S_p der Größe $|S_p| \leq \nu_2$ von aufeinander folgenden Kunden von T_p nach T_q und *zugleich* eine nicht leere Teilmenge S_q der Größe $|S_q| \leq \nu_2$ von aufeinander folgenden Kunden von T_q nach T_p verschoben wird, so wird diese Operation als *Swap Move* bezeichnet. Swap Moves finden nur zwischen nicht leeren Touren statt und können die Anzahl der Touren nicht erhöhen oder reduzieren. Falls eine der Teilmengen leer ist, so wird die Operation als Shift Move betrachtet. Diese Definition berücksichtigt nur aufeinander folgende Kunden und kann daher als eingeschränkte λ -Interchange Nachbarschaft [Osm93] gesehen werden. Das Einfügen eines Kundensegments wird mittels der cheapest insertion-Einfügestrategie [Arc03, Joh85] evaluiert, wobei die Reihenfolge der Kunden erhalten bleibt. Die Inversion des Teilstücks wird ebenfalls betrachtet. Nachdem eine Nachbarlösung umgesetzt wurde, wird ein 2-opt- [Lin65] und Or-opt-Verbesserungsverfahren [Or76] auf die modifizierten Touren angewendet. Sowohl bei Shift als auch Swap Moves ist das Einfügen von TC-Kunden in CVR-Maintouren und das Verschieben eines aktuellen Roots untersagt. Jedoch ist es im Gegensatz zu den Konstruktionsheuristiken nun durchaus erlaubt, VC-Kunden in CVR-Subtours einzufügen.

Das *Root Refining* von Subtours evaluiert eine Neuansbindung einer existierenden Subtour zu allen alternativen Root-Kandidaten der zugehörigen CVR-Maintour. Der Move folgt der Beschreibung in Kapitel 3.4, jedoch können nun auch Anbindungen akzeptiert werden, die zu einer Verschlechterung des Zielfunktionswertes führen. Diese Transformation kann auch als spezieller Intra-Route Shift Move zu neuen Subtours betrachtet werden, bei dem die zu verschiebende Teilmenge S_p alle Kunden außer dem Root der Subtour enthält. Allerdings müssen die Kunden in diesem Fall ggf. neu angeordnet werden, bevor die Einfügeevalueation erfolgt.

⁴ Dies reflektiert die Erkenntnis, dass in einem optimalen TTRP-Tourenplan alle CVR-Subtours, die ausschließlich VC-Kunden enthalten, stets gewinnbringend aufgelöst und die Kunden in die zugehörige Maintour integriert werden können.

⁵ Dies verhindert eine zyklische Rekonstruktion gleicher Subtours.

Die Länge der zu verschiebenden Teilstücke und damit die Größe der Nachbarschaft $N(s)$ einer Lösung s kann mit den Parametern ν_1 und ν_2 gesteuert werden. Falls einer der beiden Parameter auf null gesetzt ist, so wird der zugehörige Move nicht angewendet. Ansonsten werden alle möglichen Kombinationen von Teilmengen bis zur Größe ν_1 bzw. ν_2 evaluiert. Definiert man eine binäre Variable ν_3 als 1, falls der Root Refining Move angewendet werden soll und als 0 sonst, so können die zu betrachtenden Moves bzw. die Nachbarschaft $N(s)$ durch den Parameter-Vektor (ν_1, ν_2, ν_3) dargestellt werden.

5.1.3 Nachbarschaftsreduktion

Um den Evaluierungsprozess zu beschleunigen, wird die Nachbarschaft mittels des Parameters h ($h \leq n$) eingeschränkt. Für alle Shift und Swap Moves wird eine Einfüge-Evaluierung vor, nach oder zu einem Knoten⁶ u nur dann ausgeführt, falls Knoten u einer der h nächsten Knoten bezüglich der Distanz zum ersten Kunden i des einzufügenden Teilstücks aufeinander folgender Kunden ist. Der Knoten u wird in diesem Fall als h -Nachbar zu i bezeichnet. Für $h = n$ werden alle anderen Kunden und das Depot, ansonsten nur eine Teilmenge der Knoten betrachtet. Eine ähnliche Einschränkung wird z.B. im Verfahren von Potvin et al. [Pot96], Jacobi [Jac99] oder auch im GENIUS Einfüge- und Verbesserungsverfahren von Gendreau et al. [Gen92] genutzt. Es gilt zu beachten, dass bei einem Swap Move die Austausch-Teilmenge den einzigen h -Nachbar auf dieser Tour enthalten könnte. Um eine mögliche Einfügeposition für jede Teilmenge des Swap Moves sicherzustellen, wird ohne Rücksicht auf den Parameter h immer die Position des anderen Teilstücks evaluiert.

Des Weiteren wird der Parameter h bei Swap Moves genutzt, um für eine gegebene Teilmenge S_p von aufeinander folgenden Kunden der Tour T_p die zu evaluierenden Austausch-Teilmengen zu bestimmen. Ein Austausch mit einer Teilmenge S_q von aufeinander folgenden Kunden der Tour T_q wird nur betrachtet, falls der erste Kunde von S_q ein h -Nachbar des ersten Kunden in

⁶ In Referenz auf die graphentheoretische Abbildung des Problems bezeichne der Begriff Knoten sowohl die Kunden als auch das Depot.

S_p ist. Die Reversion dieser Beziehung wird aus Performance-Gründen nicht geprüft.

Die genannten Definitionen betrachten nur die h -Nachbarn der *ersten* Kunden in einer Menge von aufeinander folgenden Kunden. Dies hilft die Suche zu beschleunigen, erfordert aber die Festlegung eines Start-Kunden für ein Teilstück von aufeinander folgenden Kunden. Deshalb und um eine schnelle Suche durch alle möglichen Kombinationen von Teilmengen und möglichen Einfügepositionen zu ermöglichen, werden Touren nur in einer Richtung durchsucht. Es folgt daraus, dass die Anzahl möglicher Austausch-Teilmengen bei Swap Moves weiter eingeschränkt wird, da für einen h -Nachbarn nur die in Richtung des Tourverlaufs nächsten Kunden bei der Bildung der Austausch-Teilmengen evaluiert werden.

5.1.4 Kandidatenmenge

Anstatt alle möglichen Moves in jeder Iteration zu evaluieren, wird eine Auswahl von Move-Kandidaten⁷ gebildet und die Evaluierung auf Moves beschränkt, bei denen der erste Kunde einer Teilmenge S_p aufeinander folgender Kunden in der Kandidatenmenge M ist. Die Kandidatenmenge M ist eine Menge von Kunden, die zu Beginn jeder Iteration zufällig (ohne Zurücklegen) aus allen Kunden gewählt wird. Die Größe der Kandidatenmenge wird bestimmt durch den Parameter ω ($1 \leq \omega \leq n$) als $|M| = \text{round}(n/\omega)$. Für $\omega = 1$ sind alle Kunden in M enthalten und es findet keine weitere Einschränkung statt. Eine ähnliche Zufallsauswahl wird z.B. bei Jacobi [Jac99], Gendreau et al. [Gen94] oder Potvin et al. [Pot96] durchgeführt. Um die Evaluierung der Swap Moves zu beschleunigen, wird nur der erste Kunde einer gegebenen Teilmenge S_p dahingehend untersucht, ob er in M enthalten ist und nicht, ob der erste Kunde einer möglichen Austausch-Teilmenge zu S_p in M ist. Analog zu Shift und Swap Moves findet ein Root Refining Move für eine gegebene Subtour nur dann Anwendung, falls der in Tourverlauf erste Kunde nach dem Root in der Kandidatenmenge enthalten ist.

Um die Einschränkung der Nachbarschaft durch Parameter h und Kandidatenmenge M auszudrücken, wird im Folgenden anstelle von $N(s)$ die Bezeichnung $N_{M,h}(s)$ verwendet.

⁷ Vgl. Glover und Laguna [Glo93a] bzgl. Kandidatenlisten-Strategien.

5.1.5 Tabustatus und Akzeptanzkriterium

Die meisten Tabusuche-Heuristiken verbieten die Rückeinfügung eines Kunden in eine Tour, aus der dieser kürzlich entfernt wurde. Dies erfordert die Möglichkeit einer fixen Tour-Referenz und kann wegen der dynamischen Handhabung der Subtours⁸ in diesem Ansatz nicht genutzt werden. Die Identifikation einer Tour mittels des zugehörigen Roots und der zugehörigen Route hingegen bietet eine gute Möglichkeit, auf eine Tour (nicht notwendigerweise eindeutig) zu referenzieren, vorausgesetzt es existiert eine fixe Routen-Referenz für jedes Fahrzeug. Die ausschließliche Verwendung des Root zur Tour-Referenz wäre unpräziser und könnte im Verlauf der Suche zu restriktiv wirken. Als Beispiel sei das Depot genannt, das der Root mehrerer Touren verschiedener Routen ist.

In diesem Verfahren wird daher die Rückeinfügung eines Kunden i in eine⁹ Tour zu Root k und Route l , aus der dieser kürzlich entfernt wurde, für die nächsten θ Iterationen tabu gesetzt. Falls Kunde i ($i \in N^*$)¹⁰ aus einer Tour zu Root k ($k \in N_1$) der Route l ($l \in K$) entfernt wird, so wird das Attribut (i, k, l) zur Tabuliste hinzugefügt und vorhandene gleiche Einträge überschrieben. Mit jedem Attribut (i, k, l) in der Tabuliste ist eine Nummer τ_{ikl} assoziiert, die die letzte Iteration bis zu der das Attribut als tabu gilt spezifiziert. Bezeichne λ den Iterationenzähler, so bestimmt sich die verbleibende Tabudauer des Attributs (i, k, l) für die aktuelle Iteration als $\max\{\tau_{ikl} - \lambda; 0\}$ bzw. ist null, falls das Attribut nicht in der Tabuliste enthalten ist. Für jeden Übergang von einer Lösung s zu einer Nachbarylösung $\bar{s} \in N_{M,h}(s)$ gilt, dass mindestens ein Kunde in eine andere Tour verschoben wird!¹¹ Jeder Move kann daher durch eine entsprechende Attributmenge $B(\bar{s}) = \{ (i, k, l) : \text{Kunde } i \text{ wird in eine Tour zu Root } k \text{ in Route } l \text{ eingefügt} \}$ charakterisiert werden. Die verbleibende Tabudauer $\tau(\bar{s})$ einer Nachbarylösung $\bar{s} \in N_{M,h}(s)$ bestimmt sich dann als das Minimum über die verbleibenden Tabudauern

⁸ Vgl. Kapitel 5.1.2.

⁹ Mehrere Touren können vom gleichen Root ausgehen. Das Tabukriterium verbietet die Einfügung in jede der zugehörigen Touren.

¹⁰ Vgl. die mathematische Formulierung des TTRP in Kapitel 2.3.3.1.

¹¹ Das Subtour Root Refining wird hierbei als spezieller Intra-Route Shift Move gesehen, vgl. Kapitel 5.1.2.

aller Attribute in $B(\bar{s})$. Eine Nachbarylösung \bar{s} wird als tabu erachtet, falls $\tau(\bar{s}) > 0$ und als nicht tabu, falls $\tau(\bar{s}) = 0$ oder falls ein *Aspirationskriterium* erfüllt wird. Es findet ein Aspirationskriterium Anwendung, das den Tabu-status eines Moves durch Setzen von $\tau(\bar{s}) = -1$ aufhebt, falls der Move zu einer neuen besten zulässigen Lösung führt.¹²

Zwei bekannte Strategien zur Akzeptanz eines Moves wurden implementiert: *First Best Accept* (FBA) und *Best Accept* (BA). Bei FBA wird der erste nicht-tabu Move, der zu einer Verbesserung des Zielfunktionswertes führt sofort umgesetzt. Falls kein entsprechender Move existiert, entspricht das Akzeptanzkriterium der BA-Strategie. Dort wird der Move mit der geringsten Tabudauer¹³, bei Mehrdeutigkeit der Move mit der größten Verbesserung des Zielfunktionswertes, ausgeführt, auch wenn dies zu einer Verschlechterung des Zielfunktionswertes führt. Eine Aussage bezüglich der empfohlenen Strategie erfolgt in Kapitel 5.2.5.

5.1.6 Langzeitgedächtnis

Zur kontinuierlichen Diversifikation wird ein *Langzeitgedächtnis* implementiert und ein Strafterm zur Evaluierungsfunktion addiert, sobald ein Move zu einem Anstieg des Zielfunktionswertes führt. Sei ρ_{ikl} die Häufigkeit mit der Kunde i in eine Tour zu Root k der Route l eingefügt wurde, so wird die durchschnittliche relative Frequenz $\rho(\bar{s})$ eines Moves berechnet als der Durchschnitt der ρ_{ikl} Werte aller in diesem Move betroffenen Kunden, dividiert durch die Anzahl¹⁴ an durchgeführten Iterationen auf dem vorliegenden Problem. Der Strafterm wird mittels eines konstanten Faktors γ adjustiert und berechnet sich als $r(\bar{s}) = \gamma \cdot c(s) \cdot \sqrt{(n \cdot rc \cdot nr)} \cdot \rho(\bar{s})$, wobei n die Anzahl der Kunden, rc die Anzahl der Root-Kandidaten einschließlich des Depots und nr die Anzahl an maximal möglichen Routen¹⁵ in Lösung s bezeichnet. Die Gesamtdistanz $c(s)$ der gegenwärtigen Lösung s und der Wurzel-Term

¹² *Aspiration by Objective*, vgl. Glover und Laguna [Glo97].

¹³ Entspricht einer *Aspiration by Default*-Strategie, vgl. Glover und Laguna [Glo97].

¹⁴ Dies entspricht dem lokalen Iterationenzähler, vgl. Funktion SEARCH in Kapitel 8.1.1.

¹⁵ Für das TTRP gilt $nr = m$, beim MDTRP gilt $nr = m \cdot d$ und beim PTRP gilt $nr = m \cdot t$. Für eine CVR-Route gilt $nr = 1$.

adjustieren den Strafterm auf die Problemgröße. Der Wurzel-Term kann als normalisierender Faktor betrachtet werden, da die Häufigkeit, mit der ein Kunde in eine Tour zu einem gegebenen Root und einer gegebenen Route eingefügt wird, mit der Größe des Problems, gekennzeichnet durch n und m , und der Anzahl an Root-Kandidaten, abnimmt.

5.1.7 Intensivierungsstrategien

Um die Suche in erfolgsversprechenden Regionen des Lösungsraumes zu intensivieren, wird ein Neustart der Suche auf der besten gefundenen Lösung s^* nach einer bestimmten Anzahl an Iterationen μ ohne Verbesserung von s^* betrachtet. Diese Strategie wird mit I_1 bezeichnet und eine Implementierung ohne Neustarts mit I_0 . Experimentelle Studien im Rahmen dieser Arbeit ergaben, dass ein wiederholter Neustart auf der gleichen Lösung die Suche daran hindern kann, in andere Teile des Lösungsraumes vorzustoßen. Es wird daher die maximale Anzahl an Neustarts auf einer gegebenen Lösung s^* für die Optimierung des Gesamtproblems auf drei limitiert, was sich experimentell als guter Wert erwies. Die Zufallsauswahl der Kandidatenmenge stellt hierbei eine wichtige Komponente für den Einsatz einer Neustart-Strategie dar, da dadurch verschiedene Suchpfade bei gleicher Ausgangslösung sichergestellt werden.¹⁶

Des Weiteren kann jede CVR selbst als ein komplexes Tourenplanungsproblem betrachtet werden. Um die Struktur¹⁷ einer CVR zu verbessern, wird die Strategie I_1 dahingehend erweitert, dass bei jedem Neustart die Tabusuche kurz auf jede einzelne der in der Lösung befindlichen CVR-Routen angewendet wird. Diese erweiterte Intensivierungsstrategie wird als I_2 bezeichnet. Bei einer entsprechenden CVR-Optimierung wird $h = \infty$ gesetzt und ein Stoppkriterium von μ Iterationen ohne Verbesserung von s^* angewendet. Die Relaxation des Parameters h erfolgt, um das Risiko einer falschen Wertzuweisung zu unterbinden, da sonst das Erreichen einer optimalen CVR-Struktur unter

¹⁶ Da durch die Zufallsauswahl auch eine Diversifikations-Komponente enthalten ist, kann diese Strategie sowohl als Intensivierungs- als auch als Neustart-Diversifikationsstrategie [Gen03, S. 46] angesehen werden.

¹⁷ Unter Struktur einer Route wird hier die Art und Weise der Verknüpfung mehrerer Touren zu einer Route verstanden.

Umständen verhindert wäre. Es gilt zu beachten, dass eine zulässige CVR mit nur einer Tour bereits optimal in Bezug auf die Struktur der Route ist. Da für jedes Testproblem durchweg eine zulässige Lösung vor Anwendung des ersten Neustarts gefunden werden konnte, wird die CVR-Optimierung auf CVRs mit mindestens zwei Touren beschränkt.

5.2 Sensitivitätsanalyse der Parameter

5.2.1 Überblick und initiale Einstellungen

Die Heuristik wurde in C++ programmiert und alle Tests fanden auf einem Pentium IV 1,5 GHz Prozessor statt. Bei den Berechnungen wurden die Werte auf zwei Stellen hinter dem Dezimalpunkt gerundet. Wie von Cordeau et al. [Cor02a] vorgeschlagen, wurden die erhaltenen Lösungen mit *double*-Präzision nachgerechnet und für die Ergebnispräsentation wieder auf zwei Stellen hinter dem Dezimalpunkt gerundet.¹⁸

In den Testläufen wurde kein Iterationenlimit (es galt $\eta = \infty$), sondern ein Zeitlimit von 20 Minuten je Testdatensatz und Parametereinstellung verwendet. Auf diese Weise können bessere Aussagen bezüglich der Qualität verschiedener Parametereinstellungen getroffen werden.¹⁹ Falls eine Zufallskomponente beteiligt war (d.h. falls gilt $\omega \neq 1$), so wurde jede Parametereinstellung 10-mal auf jeden Testdatensatz angewendet und der zugehörige Mittelwert bestimmt.

Um für jeden Parameter einen guten Wertebereich zu ermitteln, wurde eine Reihe von Vorstudien durchgeführt. Basierend auf diesen Experimenten und auf Angaben aus der einschlägigen Literatur wurde jeder Parameter mit einem Ausgangswert initialisiert. Tabelle 5.1 zeigt die initialen Werte aller Parameter. Das Tuning wurde sequenziell für die Parameter durchgeführt,

¹⁸ Bezüglich den Auswirkungen verschiedener Rechengenauigkeiten auf den Zielfunktionswert und die Zulässigkeit einer Lösung vgl. z.B. Gendreau, Hertz und Laporte [Gen94] und Pesant et al. [Pes98].

¹⁹ Zur besseren Beurteilung der Parametereinstellungen wurde eine Descent-Suche am Ende des Algorithmus, wie sie in Kapitel 8.1.2 beschrieben ist, bei den Sensitivitätsanalysen nicht angewendet.

Tabelle 5.1: Parametereinstellung für das TTRP-Tuning

Parameter	genutzt für	Initialer Wert	Bester Wert
$N_{M,h}^B(s)$	Basis-Nachbarschaft	n.s. ^a	(2,1,1)
$N_{M,h}^I(s)$	Intensivierungs-Nachbarschaft	n.s. ^a	(2,2,1)
h	Nachbarschaftsgröße	15	15
ω	Kandidatenmenge	1	3
	Akzeptanzkriterium	BA	BA
γ	Häufigkeitsstrafe	0	0,001
δ	Shifting Penalty	0,5	0,5
$\bar{\theta}$	Tabudauer ^b	8	6
μ	Max. Iterationen lokal	∞	$5n$
η	Max. Iterationen global ^c	∞	15000

^a Nicht spezifiziert, siehe Kapitel 5.2.2.

^b Tabudauer $\theta = \min\{\text{round}(0,3 \cdot n); \text{round}(\bar{\theta} \cdot \log_{10}(n))\}$, siehe Kapitel 5.2.8.

^c Zeitlimit von 20 Minuten pro Testdatensatz und Parametereinstellung.

wobei die jeweils anderen Parameter unverändert blieben. Nach Evaluierung eines Parameters wurde dessen bester gefundener Wert für alle weiteren Testläufe beibehalten.

Zuerst wurde die Nachbarschaft bestimmt, indem verschiedene Parameterkombinationen für (ν_1, ν_2, ν_3) evaluiert wurden. Danach wurden die anderen Parameter in der folgenden Reihenfolge betrachtet: h (Nachbarschaftsgröße), ω (Kandidatenmenge), Akzeptanzkriterium FBA und BA, γ (Häufigkeitsstrafe), δ (Shifting Penalty Ansatz), $\bar{\theta}$ (Tabudauer), Intensivierungsstrategie I_1 und I_2 . Außer beim Tuning der Intensivierungsstrategien wurden bei allen Tests keine Neustarts angewendet, d.h. es galt Strategie I_0 mit $\mu = \infty$.

Wegen der großen Anzahl möglicher Testläufe wurde die Heuristik auf einer kleinen Zahl repräsentativer TTRP-Benchmarkprobleme getestet.²⁰ Es wurden die folgenden neun Testprobleme ausgewählt²¹: T4-T6, T10-T12, T19-T21. Eine Beschreibung der Testdaten findet sich in Kapitel 2.3.3.2.

²⁰ Das TTRP-Tuning benötigte insgesamt mehr als 800 Stunden Rechenzeit.

²¹ Die Auswahl folgte den Richtlinien von Coy et al. [Coy00].

5.2.2 Nachbarschaft

Um eine gute Nachbarschaft zu bestimmen, wurden verschiedene Werte für die Parameter ν_1 , ν_2 und ν_3 auf den ausgewählten neun Problemen getestet. Hierzu wurden die anderen Parameter auf ihre initialen Werte, wie sie in Tabelle 5.1 angegeben sind, fixiert.²²

Zuerst wurde kein Root Refining Move angewendet, d.h. es galt $\nu_3 = 0$ und es wurden die folgenden Parameterkombinationen für (ν_1, ν_2, ν_3) getestet: $(1,0,0)$, $(2,0,0)$, $(1,1,0)$, $(2,1,0)$ und $(2,2,0)$. Die ersten beiden Kombinationen nutzen lediglich den Shift Move, während die anderen eine Kombination aus Shift und Swap Moves verwenden. Wegen stark ansteigenden Rechenzeiten je Iteration für Werte von $\nu_1, \nu_2 > 2$ wurden die Kombinationen auf $\nu_1, \nu_2 \leq 2$ beschränkt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.2 zusammengefasst. Es zeigte sich, dass die Kombination $(2,1,0)$ die besten Resultate liefert und dass eine Kombination aus Shift und Swap Moves klar einer alleinigen Anwendung von Shift Moves überlegen ist.

Tabelle 5.2: Vergleich verschiedener Nachbarschaften ohne Root Refining

$N_{M,h}(s)$	(2,0,0)	(1,0,0)	(1,1,0)	(2,1,0)	(2,2,0)
T4	838,13	833,24	803,95	808,28	812,71
T5	997,89	921,45	874,91	874,47	875,08
T6	1013,16	1049,36	972,95	966,90	970,22
T10	1075,38	1067,87	1066,65	1077,09	1081,11
T11	1125,39	1142,92	1173,49	1140,91	1145,55
T12	1217,76	1249,01	1255,22	1228,34	1233,13
T19	821,08	816,68	816,68	816,68	816,86
T20	863,15	855,33	856,97	867,62	862,83
T21	922,11	922,11	922,11	922,11	922,11
Avg $c(s^*)$	986,01	984,22	971,44	966,93	968,84
Avg λ	6857	11634	5626	4229	2451

²² Um eine bessere Aussage bzgl. der Qualität einer Nachbarschaft treffen zu können, wurden explizite Diversifikationsstrategien vorerst nicht angewendet ($\omega = 1, \gamma = 0$).

Für die Kombinationen aus Shift und Swap Moves wurde daher eine zusätzliche Verwendung des Root Refining Moves untersucht (d.h. $\nu_3 = 1$). Es kommen somit folgende Kombinationen in Betracht: (1,1,1), (2,1,1) und (2,2,1). Es gilt zu beachten, dass der Subtour Root Refining Move keinen essentiellen Move-Typ darstellt, da neue Subtour-Anbindungen auch durch (mehrfache) Anwendung von Shift Moves zu (neuen) Subtours entstehen können. Jedoch zeigen die Ergebnisse, dass dieser Move-Typ eine wertvolle Komponente darstellt (vgl. Tabelle 5.3). Durch zusätzliche Anwendung dieses Moves konnten die durchschnittlichen Kosten über die neun Datensätze für alle Kombinationen weiter gesenkt werden. Auch mit Anwendung des Root Refining Moves konnten die Kombinationen mit $\nu_1 = 2$ die besten Resultate erzielen.

Tabelle 5.3: Vergleich verschiedener Nachbarschaften mit Root Refining

$N_{M,h}(s)$	(1,1,1)	(2,1,1)	(2,2,1)
T4	803,95	808,28	809,70
T5	876,00	860,10	867,62
T6	968,86	970,15	969,45
T10	1069,71	1078,99	1083,42
T11	1169,51	1135,15	1159,32
T12	1231,00	1222,00	1194,81
T19	816,68	816,19	814,65
T20	862,31	860,19	860,19
T21	916,94	916,58	916,94
Avg $c(s^*)$	968,33	963,07	964,01
Avg λ	5446	4117	2390

Als nächstes wurde eine variable Nachbarschaftsdefinition betrachtet. Aufbauend auf einer *Basis-Nachbarschaft* $N_{M,h}^B(s)$ wird eine erweiterte *Intensivierungs-Nachbarschaft* $N_{M,h}^I(s)$ immer dann angewendet, wenn sich die gegenwärtige Lösung s in einem vielversprechenden Bereich des Suchraumes befindet. Drei verschiedene Kombinationen, bezeichnet als A, B und C, für die Basis-Nachbarschaft und die erweiternde Intensivierungs-Nachbarschaft wurden getestet. Für A und B gilt $N_{M,h}^B(s) = (1, 1, 1)$ und für C gilt $N_{M,h}^B(s) = (2, 1, 1)$. Für A gilt weiterhin $N_{M,h}^I(s) = (2, 1, 1)$ und für B und C

Tabelle 5.4: Ergebnisse für variable Nachbarschaften

	A	B	C	D	E
$N_{M,h}^B(s)$	(1,1,1)	(1,1,1)	(2,1,1)	(2,1,1)	(2,2,1)
$N_{M,h}^I(s)$	(2,1,1)	(2,2,1)	(2,2,1)	(2,1,1)	(2,2,1)
T4	808,77	806,32	808,09	808,28	809,70
T5	859,80	859,80	859,80	860,10	867,62
T6	966,90	969,19	969,45	970,15	969,45
T10	1082,60	1089,07	1072,55	1078,99	1083,42
T11	1139,05	1158,74	1116,20	1135,15	1159,32
T12	1220,33	1209,67	1198,80	1222,00	1194,81
T19	820,49	816,82	814,88	816,19	814,65
T20	848,96	858,19	853,81	860,19	860,19
T21	922,78	922,78	922,78	916,58	916,94
Avg $c(s^*)$	963,30	965,62	957,37	963,07	964,01
Avg λ	4772	4338	3457	4117	2390

gilt $N_{M,h}^I(s) = (2, 2, 1)$. Das Entscheidungskriterium für die Anwendung des Nachbarschafts-Typs wird wie folgt definiert: falls $c(s) > (1 + 0, 1/\sqrt{n}) \cdot c(s^*)$ gilt $N_{M,h}^B(s)$, ansonsten $N_{M,h}^I(s)$. Es bezeichnet n die Anzahl der Kunden des gegenwärtigen Problems, bei einer CVR-Optimierung also nur die Anzahl der Kunden der behandelten CVR. Gilt beispielsweise $n = 100$, wie z.B. bei den Problemen T19-T21, ist der Faktor für die Multiplikation mit $c(s^*)$ gleich 1,01. Die Verwendung von $(1 + 0, 1/\sqrt{n})$ normalisiert das Auswahlkriterium auf die Problemgröße mit der Tendenz zu $N_{M,h}^B(s)$ bei größeren Problemen und $N_{M,h}^I(s)$ bei kleineren Problemen, wie es z.B. bei einer CVR-Optimierung erwünscht ist.

Tabelle 5.4 zeigt die Ergebnisse dieser Studie. Während A und B sich gleichwertig zu den besten statischen Nachbarschaften (2,1,1) und (2,2,1), bezeichnet als D und E mit $N_{M,h}^B(s) = N_{M,h}^I(s)$, zeigten, konnte Kombination C alle anderen Nachbarschaftsdefinitionen in Bezug auf die durchschnittlichen Kosten unterbieten. Auch die durchschnittliche Iterationenzahl kann bei Kombination C im Vergleich zur dauerhaften Anwendung der Intensivierungs-Nachbarschaften bei Kombination E durch einen selektiven Einsatz der erweiterten Nachbarschaft gesteigert werden. Ein selektiver Einsatz von Swap Moves hat u.a. den Vorteil, dass eine in Bezug auf die Gesamtdistanz gute

Lösung mit geringfügiger Überkapazität dadurch ggf. in eine zulässige Lösung von hoher Qualität überführt werden kann [Xu96].

Abbildung 5.1 zeigt den Optimierungsverlauf der ersten 1000 Iterationen für Einstellung C am Beispiel von Testproblem T20. Grau hinterlegte Abschnitte bezeichnen Iterationen bei denen die Intensivierungs-Nachbarschaft zum Einsatz kommt, wohingegen weiß hinterlegte Abschnitte (oberhalb des Verlaufs von $c(s)$) die Anwendung der Basis-Nachbarschaft kennzeichnen. Insbesondere ist die tendenziell verstärkte Anwendung von $N_{M,h}^I(s)$ in den ersten Iterationen und dessen selektive Anwendung im weiteren Verlauf der Suche zu erkennen. Basierend auf diesen Resultaten wurde Kombination C mit $N_{M,h}^B(s) = (2, 1, 1)$ und $N_{M,h}^I(s) = (2, 2, 1)$ für die folgenden Testläufe übernommen.

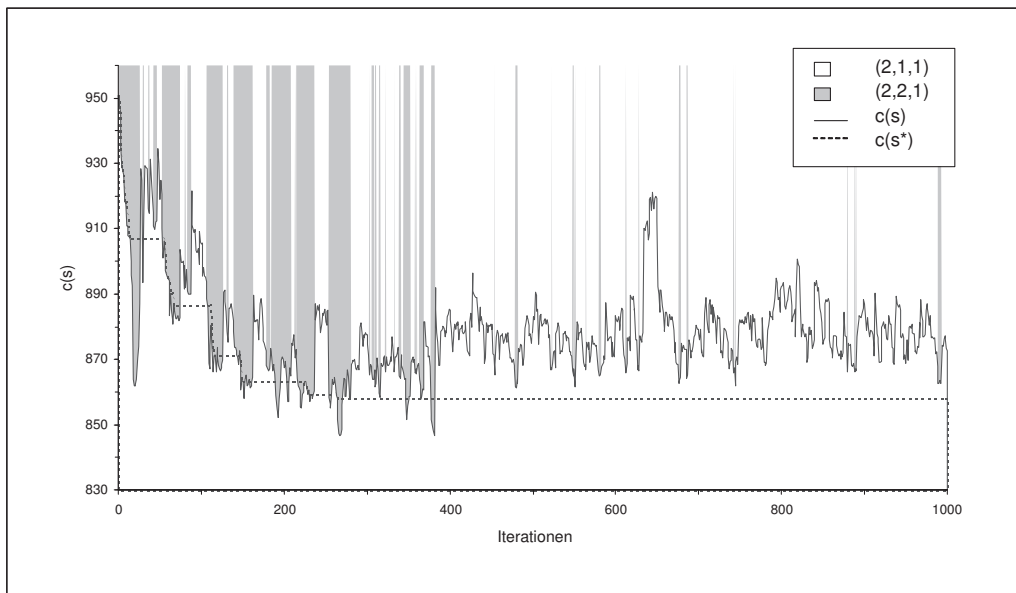


Abbildung 5.1: Optimierungsverlauf für Problem T20 mit Nachbarschaft C

5.2.3 Nachbarschaftsreduktion

Der die Nachbarschaftsgröße bestimmende Parameter h muss als ein kritischer Parameter eingestuft werden. Ein zu kleiner Wert für h ermöglicht einen schnellen Suchverlauf, kann aber die Suche auf eine zu kleine Teilmenge gu-

Tabelle 5.5: Ergebnisse für verschiedene Größen von h

h	5	8	10	15	20	25
T4	813,60	803,95	806,76	808,09	803,95	808,82
T5	863,34	864,85	881,18	859,80	859,80	872,14
T6	985,52	975,10	980,89	969,45	969,19	966,90
T10	1083,89	1073,22	1083,98	1072,55	1088,20	1096,95
T11	1131,21	1119,69	1126,53	1116,20	1146,22	1177,44
T12	1217,61	1208,60	1195,09	1198,80	1222,58	1218,79
T19	854,98	842,52	827,68	814,88	816,86	815,78
T20	920,90	877,47	873,45	853,81	861,65	857,49
T21	994,20	986,08	922,78	922,78	922,78	922,78
Avg $c(s^*)$	985,03	972,39	966,48	957,37	965,69	970,79
Avg λ	12503	8834	6943	3457	2180	1459

ter Nachbarlösungen einschränken. Insbesondere bei geclusterten Problemen kann ein zu kleiner Wert von h zu einer deutlichen Verschlechterung der Lösungsqualität führen. Auf der anderen Seite erhöht ein großer Wert deutlich die Rechenzeit pro Iteration und reduziert bei gegebener Gesamtzeit damit auch die Gesamtanzahl an ausführbaren Iterationen. Verschiedene Werte im Intervall $[5;25]$ wurden für h auf den ausgewählten Testproblemen betrachtet. Die besten Ergebnisse wurden für $h = 15$ erzielt (vgl. Tabelle 5.5). Je größer die Abweichung von diesem Wert, desto schlechter waren die Ergebnisse. Da sich auch in Vorstudien $h = 15$ als guter Wert erwies, wurde dieser Wert fixiert.

5.2.4 Kandidatenmenge

Die Wahl einer guten Diversifikationsstrategie ist für jede Tabusuche-Heuristik von entscheidender Bedeutung [Gen03]. Daher wurden verschiedene Strategien getestet. Den Beginn bildet die Evaluierung unterschiedlicher, zufällig gewählter Kandidatenmengen (ohne Verwendung eines Langzeitgedächtnisses und mit der BA-Strategie).

Für die Größe der Kandidatenmenge M und damit ebenfalls ausschlaggebend für die Größe der Nachbarschaft $N_{M,h}(s)$ ist Parameter ω . Es wurden für ω die

Tabelle 5.6: Ergebnisse für verschiedene Größen von ω

ω	1	2	3	4
T4	808,09	807,10	806,92	817,32
T5	859,80	863,14	860,77	875,37
T6	969,45	964,31	961,38	969,48
T10	1072,55	1066,76	1062,25	1067,99
T11	1116,20	1128,28	1128,15	1115,61
T12	1198,80	1201,06	1196,75	1199,64
T19	814,88	818,39	818,65	821,14
T20	853,81	860,02	857,04	864,08
T21	922,78	919,11	921,48	920,24
Avg $c(s^*)$	957,37	958,69	957,04	961,21
Min $c(s^*)$	-	953,56	955,33	958,37
Max $c(s^*)$	-	963,19	959,59	966,45
Avg λ	3457	6561	9368	12294

Werte 2, 3 und 4 mit der initialen Einstellung ohne Zufallsauswahl $\omega = 1$ verglichen. Tabelle 5.6 zeigt die Ergebnisse.²³ Wohingegen die Werte 1, 2 und 3 vergleichbare Resultate erzielten, war die durchschnittliche Distanz über alle neun Testprobleme bei $\omega = 4$ leicht schlechter, was auf eine zu kleine Kandidatenmenge schließen lässt. Die Einstellung $\omega = 4$ wurde daher nicht weiter verfolgt. Eine eindeutige Aussage bezüglich der besten Parametereinstellung von ω erscheint anhand dieser Ergebnisse allerdings nicht eindeutig möglich. Es kann weder eine signifikante Verschlechterung, noch eine signifikante Verbesserung durch die alleinige Anwendung dieses Diversifikationsinstruments festgestellt werden. Deshalb werden im Folgenden insbesondere auch Kombinationen dieser Strategie mit alternativen Diversifikationsstrategien getestet.

²³ Für alle Testläufe mit Zufallsentscheidung, d.h. $\omega \neq 1$, wird für jeden Testdatensatz und jede Parametereinstellung stets der Mittelwert aus zehn unabhängigen Durchläufen angegeben. Auf eine Angabe des pro Testdatensatz und Parametereinstellung erzielten Minimums und Maximums bzw. der Standardabweichung wird aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet. Alternativ wird der Durchschnittswert aus den erzielten Minima (Min $c(s^*)$) und Maxima (Max $c(s^*)$) aller neuen Testprobleme angegeben.

5.2.5 Akzeptanzkriterium

Die FBA-Strategie ist eine spezielle Kandidatenlisten-Strategie [Glo97], bei der die Auswahl der neuen Nachbarlösung bestimmt wird durch den Zeitpunkt des Auftretens der ersten verbessernden Nachbarlösung, die nicht tabu ist. Dieser einer Art Zufallsauswahl gleichkommende Effekt kann wiederum diversifizierend auf die Suche wirken und zeigte sich z.B. beim Verfahren von Osman [Osm93] einer BA-Strategie überlegen. Eine Verbindung der FBA-Strategie mit (und ohne) einer Zufallsauswahl der Kandidatenmenge wurde deshalb für die verschiedenen Werte von $\omega : \omega \in \{1, 2, 3\}$ untersucht (vgl. Tabelle 5.7).

Es zeigte sich, dass die FBA-Strategie ohne Zufallsauswahl der Kandidatenmenge zu keiner Verbesserung führt und dass sie bei Zufallsauswahl tendenziell gleich gute Lösungen mit der für die Tabusuche typischen BA-Strategie liefert. Weiterhin erweist sich die BA-Strategie tendenziell robuster und führt v.a. zu Beginn der Suche schneller zu guten Lösungen. Für die folgenden Untersuchungen wurde daher weiterhin die BA-Strategie zugrunde gelegt.

Tabelle 5.7: Vergleich von BA und FBA bei verschiedenen Werten von ω

ω	1		2		3	
	BA	FBA	BA	FBA	BA	FBA
T4	808,09	808,28	807,10	805,75	806,92	809,27
T5	859,80	859,80	863,14	863,53	860,77	862,28
T6	969,45	970,35	964,31	961,78	961,38	960,74
T10	1072,55	1078,82	1066,76	1076,21	1062,25	1069,05
T11	1116,20	1143,93	1128,28	1133,04	1128,15	1118,58
T12	1198,80	1207,51	1201,06	1199,29	1196,75	1193,06
T19	814,88	816,15	818,39	817,56	818,65	817,62
T20	853,81	861,43	860,02	858,10	857,04	862,42
T21	922,78	922,78	919,11	920,67	921,48	920,86
Avg $c(s^*)$	957,37	963,23	958,69	959,55	957,04	957,10
Min $c(s^*)$	-	-	953,56	955,87	955,33	950,92
Max $c(s^*)$	-	-	963,19	963,25	959,59	962,23
Avg λ	3457	3562	6561	6634	9368	9472

5.2.6 Langzeitgedächtnis

Bis zu diesem Punkt der Sensitivitätsanalyse wurde kein Langzeitgedächtnis eingesetzt, d.h. es galt $\gamma = 0$. Der Effekt eines Langzeitgedächtnisses als kontinuierliches Diversifikationsinstrument mit ($\omega \in \{2, 3\}$) und ohne Zufallsauswahl ($\omega = 1$) wurde nun untersucht. Für jeden Wert von ω wurden ausgewählte Werte für γ im Intervall $[0,1 ; 0,0001]$ getestet. Tabellen 5.8, 5.9 und 5.10 zeigen die Ergebnisse dieser Testläufe. Für $\omega = 1$ konnte selbst die beste Parametereinstellung $\gamma = 0,01$ keine Verbesserung gegenüber einer Implementierung ohne Langzeitgedächtnis liefern. Jedoch konnten bei Einsatz des Langzeitgedächtnisses in Verbindung mit einer Zufallsauswahl die durchschnittlichen Kosten verbessert werden. Insbesondere ergaben sich die besten Werte von γ im Intervall $[0,01 ; 0,001]$ für $\omega = 2$ und als $\gamma = 0,001$ für $\omega = 3$. Letzteres stellt zugleich die beste ermittelte Parametereinstellung dar. Eine Kombination von Zufallsauswahl der Kandidatenmenge mit einer kontinuierlichen Diversifikation durch ein Langzeitgedächtnis erscheint also vorteilhaft und wird z.B. auch von Jacobi [Jac99] gewählt. Eine mögliche Erklärung hierfür könnte sein, dass das Langzeitgedächtnis nur bei ausreichend großer Anzahl an Iterationen, wie es bei größeren Werten von ω der Fall ist, seine Wirkung effektiv ausüben kann. Basierend auf diesen Resultaten wurde für die weiteren Testläufe $\gamma = 0,001$ und $\omega = 3$ festgelegt.

Tabelle 5.8: Ergebnisse für verschiedene Werte von γ mit $\omega = 1$

γ	0,1	0,01	0,001	0,0001	0
T4	810,97	806,51	806,32	808,28	808,09
T5	857,46	840,25	860,10	859,80	859,80
T6	970,22	967,66	974,94	966,90	969,45
T10	1095,21	1076,33	1069,61	1078,76	1072,55
T11	1104,80	1148,66	1136,96	1152,00	1116,20
T12	1204,48	1189,92	1195,91	1194,25	1198,80
T19	820,59	815,50	817,54	817,84	814,88
T20	853,37	853,92	850,65	857,59	853,81
T21	920,18	922,48	922,33	922,78	922,78
Avg $c(s^*)$	959,70	957,91	959,37	962,02	957,37
Avg λ	3371	3374	3518	3487	3457

Tabelle 5.9: Ergebnisse für verschiedene Werte von γ mit $\omega = 2$

γ	0,1	0,01	0,001	0,0001	0
T4	817,30	810,79	806,73	807,83	807,10
T5	867,89	857,96	858,72	858,77	863,14
T6	969,42	963,15	966,62	963,10	964,31
T10	1070,05	1069,00	1069,52	1069,91	1066,76
T11	1122,48	1120,97	1125,78	1135,06	1128,28
T12	1201,54	1198,37	1196,47	1201,74	1201,06
T19	818,78	817,26	816,99	818,35	818,39
T20	858,98	859,63	855,07	856,21	860,02
T21	920,31	923,01	918,79	921,09	919,11
Avg $c(s^*)$	960,75	957,80	957,19	959,12	958,69
Min $c(s^*)$	955,59	954,82	954,03	955,16	953,56
Max $c(s^*)$	966,94	963,56	959,86	962,54	963,19
Avg λ	5863	6026	6233	6358	6561

Tabelle 5.10: Ergebnisse für verschiedene Werte von γ mit $\omega = 3$

γ	0,1	0,01	0,001	0,0001	0
T4	821,43	815,22	809,02	808,37	806,92
T5	894,23	870,58	865,22	864,54	860,77
T6	985,11	965,76	961,67	963,58	961,38
T10	1074,00	1067,38	1058,79	1065,83	1062,25
T11	1127,13	1125,93	1111,56	1131,09	1128,15
T12	1204,80	1192,91	1198,14	1199,48	1196,75
T19	820,76	820,22	817,70	817,77	818,65
T20	869,49	865,54	858,56	859,82	857,04
T21	922,92	920,79	920,54	918,43	921,48
Avg $c(s^*)$	968,88	960,48	955,69	958,77	957,04
Min $c(s^*)$	964,72	955,49	952,48	955,26	955,33
Max $c(s^*)$	974,83	964,31	958,83	962,54	959,59
Avg λ	8410	8707	8851	9172	9368

5.2.7 Shifting Penalty Parameter

Eine strategische Oszillation [Glo97, S. 102] zwischen zulässigen und unzulässigen Lösungen wird mittels des in Kapitel 5.1.1 beschriebenen Shifting Penalty Ansatzes erreicht. Der für die Adjustierung von α notwendige Parameter δ wurde für verschiedene Werte im Bereich $[0,1 ; 2,0]$ getestet. Der beste gefundene Wert entsprach der initialen Einstellung von $\delta = 0,5$ (vgl. Tabelle 5.11). Diese Einstellung wurde auch von Cordeau et al. [Cor97] gewählt. In dem hier vorgestellten Verfahren wird der Parameter α anders als bei Cordeau et al. [Cor97] auf Werte im Bereich zwischen 0,01 und 100 eingeschränkt. Dies erschien bei Vorstudien des Algorithmus hilfreich, da α ansonsten im Verlauf der Suche zu große oder zu kleine Werte annehmen kann.²⁴ Für diese Fälle wären zu viele Iterationen nötig, um den Parameter auf einen zur weiteren Lenkung der Suche optimalen Wert zu readjustieren. Abbildung 5.2 zeigt den Optimierungsverlauf für die ersten 1000 Iterationen von Problem T10 mit $\delta = 0,5$. Die durchgezogene schwarze Linie verdeutlicht den Verlauf der Gesamtdistanz $c(s)$ der aktuellen Lösung s und die gestrichelte schwarze Linie die zur aktuell besten gefunden Lösung s^* gehörige Gesamtdistanz $c(s^*)$. Grau dargestellt²⁵ ist die zu Lösung s gehörige Überkapazität $q(s)$. Deutlich erkennbar ist der Auf- und Abbau von Überkapazität und damit die Oszillation zwischen zulässigen ($q(s) = 0$) und unzulässigen Bereichen des Lösungsraums ($q(s) > 0$) im Verlauf der Suche.

5.2.8 Tabudauer

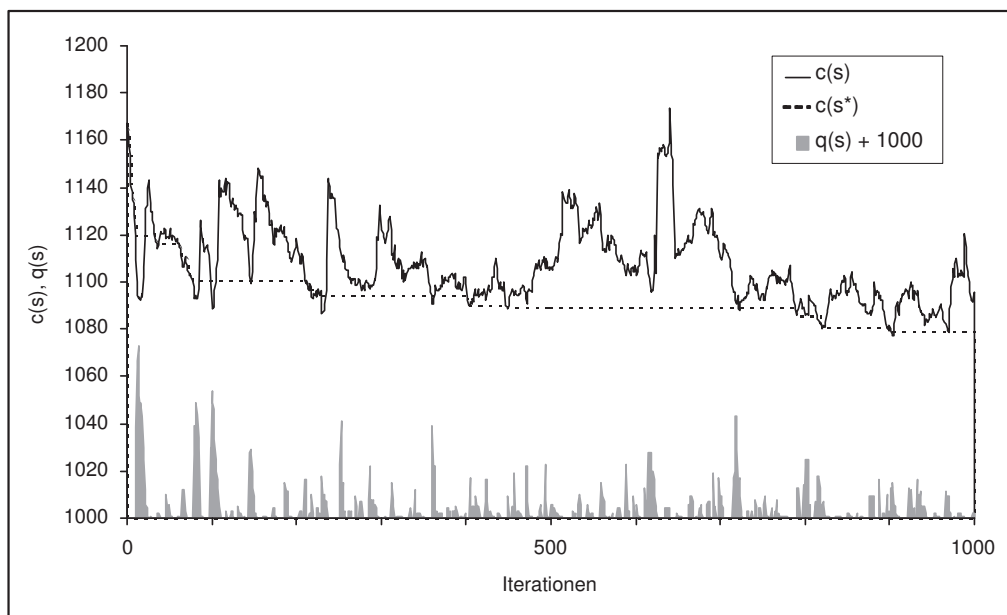
Basierend auf Ergebnissen aus Vorstudien wird die Tabudauer als $\theta = \min\{\text{round}(0,3 \cdot n); \text{round}(\bar{\theta} \cdot \log_{10}(n))\}$ bestimmt, wobei n der Anzahl an Kunden des gegenwärtigen Problems entspricht, z.B. der Anzahl Kunden einer CVR-Route bei CVR-Optimierung in Intensivierungs-Strategie I_2 . Diese Definition reflektiert die folgenden Erkenntnisse: zum einen soll der Wert der Tabudauer langsam mit der Größe des Problems anwachsen [Cor97]. Diese

²⁴ Startet die Suche beispielsweise auf einer unzulässigen Startlösung, so können viele Iterationen notwendig sein, bis die erste zulässige Lösung gefunden wird. Dann jedoch ist der Parameter α tendenziell sehr hoch.

²⁵ Die Darstellung erfolgt für $q(s) + 1000$.

Tabelle 5.11: Ergebnisse für verschiedene Werte von δ

δ	0,1	0,5	1	2
T4	810,53	809,02	810,01	812,57
T5	869,64	865,22	860,16	864,39
T6	964,58	961,67	968,40	971,38
T10	1063,58	1058,79	1063,34	1062,15
T11	1135,52	1111,56	1113,73	1119,10
T12	1196,56	1198,14	1197,22	1199,48
T19	816,23	817,70	818,04	817,36
T20	856,83	858,56	859,41	862,61
T21	916,85	920,54	919,53	920,43
Avg $c(s^*)$	958,93	955,69	956,65	958,83
Min $c(s^*)$	954,58	952,48	951,69	955,74
Max $c(s^*)$	962,02	958,83	961,13	960,68
Avg λ	8799	8851	9129	9135

Abbildung 5.2: Optimierungsverlauf für Problem T10 mit $\delta = 0,5$

Tatsache wird mittels des Faktors $\log_{10}(n)$ berücksichtigt; zum anderen kann die Anzahl an Kunden n des vorliegenden Problems sehr klein sein, wie es zumeist bei einer CVR-Optimierung der Fall ist. Dann wäre eine Tabudauer, die sich alleine als $\bar{\theta} \cdot \log_{10}(n)$ bestimmt, zu restriktiv. Um dieses Problem zu

Tabelle 5.12: Ergebnisse für verschiedene Werte von $\bar{\theta}$

$\bar{\theta}$	5	6	7	8	[6;8]
T4	807,97	807,83	806,97	809,02	806,53
T5	868,62	858,22	861,33	865,22	863,53
T6	960,94	966,55	963,82	961,67	960,58
T10	1062,83	1059,35	1064,00	1058,79	1061,93
T11	1124,64	1113,88	1114,45	1111,56	1119,38
T12	1195,23	1196,84	1193,28	1198,14	1193,04
T19	817,96	817,44	820,31	817,70	817,56
T20	858,93	857,66	858,39	858,56	858,21
T21	915,99	916,77	918,21	920,54	919,65
Avg $c(s^*)$	957,01	954,95	955,64	955,69	955,60
Min $c(s^*)$	955,51	952,31	952,26	952,48	950,24
Max $c(s^*)$	958,49	957,09	957,52	958,83	959,32
Avg λ	8972	9148	9103	8851	9165

umgehen wird der Term $0,3n$ in die Definition aufgenommen und das Minimum aus beiden Termen gewählt.

Der Multiplikator $\bar{\theta}$, ursprünglich initialisiert mit $\bar{\theta} = 8$, wurde für ganzzahlige Werte im Bereich von 5 bis 10 getestet. Wie aus Tabelle 5.12 erkennbar, reagiert die Suche nicht sehr sensitiv auf die verschiedenen Werte von $\bar{\theta}$. Dies ist nicht zuletzt auf die Zufallskomponente bei Bestimmung der Kandidatenmenge zurückzuführen, die dazu beiträgt, einen Zyklus im Suchverlauf zu unterbinden. Die besten Ergebnisse wurden für einen Wert von $\bar{\theta}$ im Bereich 6 bis 8 gefunden. Zusätzliche Tests mit pro Iteration zufällig gezogenen Werten von $\bar{\theta}$ im Bereich [6; 8] führten zu keiner weiteren Verbesserung. Um eine zu restriktive Tabuliste zu verhindern, wurde $\bar{\theta} = 6$ gewählt.

5.2.9 Intensivierungsstrategien

Alle bisherigen Analysen wurden ohne Anwendung einer Neustart-Intensivierungsstrategie durchgeführt. Der Effekt einer entsprechenden Strategie wurde für die Strategien I_1 und I_2 für verschiedene Werte von μ evaluiert. Eine Beschreibung der Strategien findet sich in Kapitel 5.1.7. Den Zeitpunkt eines

Neustarts abhängig von der gegebenen Problemgröße zu wählen, erscheint vorteilhaft. Deshalb wurde μ proportional zur Anzahl der Kunden n für die Werte $\mu = 2n$ und $\mu = 5n$ getestet. Variable n bezieht sich hierbei auf die Kunden des gegebenen Problems, z.B. die Kunden einer CVR bei CVR-Optimierung in Strategie I_2 . Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Tabelle 5.13 zusammengestellt. Wohingegen Strategie I_1 gleichwertig zu Strategie I_0 ohne Anwendung einer Intensivierungsstrategie erscheint, war es mit der erweiterten Intensivierungsstrategie I_2 möglich eine Verbesserung zu erzielen. Die besten Ergebnisse wurden mit I_2 und $\mu = 5n$ erreicht. Dieses Ergebnis lässt folgern, dass eine gute Struktur für CVR-Routen kaum in einem auf das gesamte Problem angewendeten Suchverfahren erreicht werden kann und dass die temporäre CVR-Optimierung eine essentielle Komponente des Verfahrens darstellt.

Tabelle 5.13: Vergleich verschiedener Intensivierungsstrategien

I μ	I_1		I_2		I_0
	$2 \cdot n$	$5 \cdot n$	$2 \cdot n$	$5 \cdot n$	∞
T4	806,36	807,21	807,07	807,02	807,83
T5	859,96	860,88	860,07	858,81	858,22
T6	956,25	960,38	957,62	946,79	966,55
T10	1067,26	1062,93	1061,02	1061,54	1059,35
T11	1121,40	1120,80	1116,09	1123,33	1113,88
T12	1196,39	1195,91	1192,07	1185,85	1196,84
T19	815,92	816,06	815,49	814,78	817,44
T20	858,12	852,92	853,93	852,13	857,66
T21	916,43	916,47	914,58	912,54	916,77
Avg $c(s^*)$	955,34	954,84	953,10	951,42	954,95
Min $c(s^*)$	953,39	951,78	949,38	948,43	952,31
Max $c(s^*)$	958,15	958,83	957,31	956,13	957,09
Avg λ	9370	9386	10580	11217	9148

Abbildung 5.3 zeigt einen Ausschnitt eines Optimierungsverlaufs für Problem T5 mit Strategie I_2 und $\mu = 5n$. Die Distanz des Gesamtproblems $c(s)$ und der besten Lösung $c(s^*)$ wird im Verlauf wiedergegeben. Jede Verbesserung

der besten Lösung s^* wurde mit einem kurzen schwarzen Strich gekennzeichnet. Die vertikalen Linien im Hintergrund des Suchverlaufs markieren einen Neustart der Suche auf der aktuell besten Lösung. Die längeren Linien bezeichnen dabei einen Neustart auf dem Gesamtproblem, wohingegen die kürzeren Linien den Beginn einer CVR-Optimierung markieren. Insbesondere sei auf das Limit von maximal drei Neustarts auf der gleichen Lösung für die Optimierung des Gesamtproblems hingewiesen. Diese Restriktion ist in der Abbildung beim vierten Neustart auf dem Gesamtproblem (kurz nach Iteration 3000) erkennbar, wo μ bis zur nächsten Verbesserung von s^* temporär auf $\mu = \infty$ gesetzt wurde. Zum Zeitpunkt der Verbesserung der besten Lösung wurde μ wieder mit $5n$ reinitialisiert. Diese temporäre Relaxation des Parameters μ ermöglicht es in entferntere Bereiche des Lösungsraumes vorzudringen und erscheint bei einer Neustart-Strategie essenziell, da sonst die Suche möglicherweise auf einen Teilbereich des Suchraumes eingeschränkt wäre.

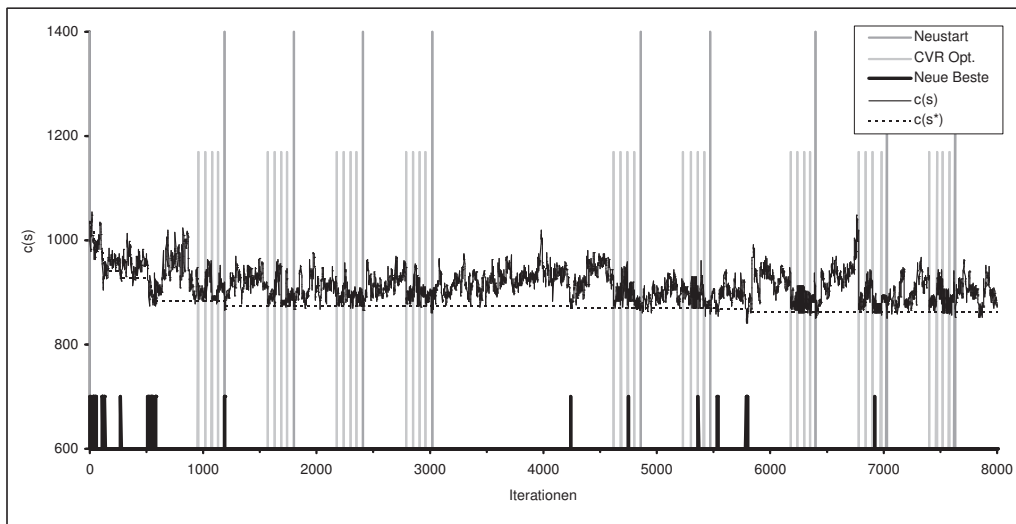


Abbildung 5.3: I_2 -Optimierungsverlauf für Problem T5 mit $\mu = 5n$

Kapitel 6

Entwicklung einer Tabusuche-Heuristik für das MDTTRP

In diesem Kapitel wird eine Erweiterung der in Kapitel 5 für das TTRP dargestellten Tabusuche-Heuristik auf das Mehrdepot-Tourenplanungsproblem bei restringierendem Anhängereinsatz (MDTTRP)¹ vorgestellt. Da dabei viele der TTRP-Komponenten ohne explizite Modifikation auf das MDTTRP übertragen werden können, werden im ersten Teil dieses Kapitels nur die zu ändernden Elemente dargestellt. Dies sind die Entwicklung einer MDTTRP-Startlösung, die Nachbarschaftsdefinition für die erweiterte Mehrdepot-Problemstellung und die für das MDTTRP abgewandelten Intensivierungsstrategien. Ohne Modifikation übernommen werden der Shifting Penalty Ansatz², die Nachbarschaftsreduktion³ durch Parameter h , die Wahl der Kandidatenmenge, der Tabustatus⁴, das BA-Akzeptanzkriterium sowie das Langzeitgedächtnis. Im zweiten Teil dieses Kapitels erfolgt dann eine Sensitivitätsanalyse für ausgewählte Parameter.

¹ Vgl. die Definition des MDTTRP in Kapitel 2.4.2.1.

² Die Zielfunktion für das MDTTRP wird als $f(s) := c(s) + \alpha \cdot q(s)$ angenommen, wobei $c(s)$ die Gesamtdistanz und $q(s)$ die gesamte Überkapazität für das Mehrdepot-Tourenplanungsproblem sowie α den Shifting Penalty Parameter bezeichnet.

³ Die Definition berücksichtigt ausschließlich die Entfernungen zwischen den Kunden ohne weitere Berücksichtigung der Depotzuordnung.

⁴ Beim MDTTRP ist ein Fahrzeug eindeutig einem Depot und eine Route wiederum eindeutig einem Fahrzeug zugeordnet.

6.1 Modifizierte Komponenten des TTRP-Verfahrens

6.1.1 Startlösung

Zur Konstruktion einer Startlösung für Mehrdepot-Tourenplanungsprobleme wird ein zweistufiger Ansatz verfolgt. Zuerst werden die Kunden eindeutig einem Depot zugeordnet (sog. Gebietsaufteilung) und im Anschluss die resultierenden Eindepot-Probleme gelöst.

Das Problem der Gebietsaufteilung wird von den meisten Autoren wie z.B. Chao et al. [Cha93b], Renaud et al. [Ren96a] oder Cordeau et al. [Cor97] gelöst, indem sie die Kunden dem jeweils nächstgelegenen Depot zuordnen. Diese einfache und schnelle Aufteilung hat jedoch den Nachteil, dass sie keine Kapazitäten berücksichtigt. Existiert jedoch wie in den hier verwendeten Testproblemen eine maximale Anzahl an Fahrzeugen je Depot, wobei jedes Fahrzeug genau eine Route ausführen und ein Kunde ausschließlich in einer Route bedient werden kann, so muss für jedes Depot j ($j = 1, \dots, d$) ein Kapazitätslimit W_j gleich der Summe der Fahrzeugkapazitäten aller Fahrzeuge des Depots angesetzt werden. In einer zulässigen Lösung darf diese Kapazitätsgrenze bei keinem Depot überschritten sein.

Zur Lösung des Problems der Gebietsaufteilung wird in diesem Ansatz daher ein lineares Programm vom Typ der Zuordnungsmodelle, genauer ein verallgemeinertes Zuordnungsproblem⁵ (Generalized Assignment Problem, GAP) zugrunde gelegt:

⁵ Vgl. Martello und Toth [Mar90, S. 189] und Klose und Drexl [Klo02].

(GAP)

$$\text{minimiere} \quad \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^d q_i c_{ij} x_{ij} \quad (0)$$

u.d.B.:

$$\sum_{j=1}^d x_{ij} = 1 \quad i = 1, \dots, n; \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n q_i x_{ij} \leq W_j \quad j = 1, \dots, d; \quad (2)$$

$$x_{ij} \in \{0; 1\} \quad i = 1, \dots, n; \quad j = 1, \dots, d; \quad (3)$$

Die binäre Variable x_{ij} gibt an, ob Kunde i ($i = 1, \dots, n$) dem Depot j ($j = 1, \dots, d$) zugeordnet ist ($x_{ij} = 1$) oder nicht ($x_{ij} = 0$). Die Konstante c_{ij} ($c_{ij} \in \mathbb{R}^+$) bezeichnet die Entfernung des Kunden i zu Depot j und q_i ($q_i \in \mathbb{N}$) die Angebotsmenge⁶ des Kunden i . Es gilt, jeden Kunden eindeutig einem Depot zuzuordnen (1), ohne dass die Kapazitätsgrenze eines Depots überschritten wird (2). Ziel ist die Minimierung der gesamten gewichteten⁷ Entfernungen aller Kunden zu deren zugeordneten Depots (0).

Es gilt zu beachten, dass eine zulässige Lösung des GAP keine zulässige Lösung des Multidepot-Tourenplanungsproblems impliziert, da im GAP keine Routing-Restriktionen berücksichtigt werden. Dennoch wird dadurch die Aufteilung der Kunden auch bezüglich der Kapazitäten balanciert und eine gute zulässige Lösung zu einem Multidepot-Problem kann in einem anschließend ausgeführten Verbesserungsverfahren meist schneller gefunden werden, als bei einer trivialen Zuordnung.⁸

Eine Reihe von Lösungsverfahren wurde für das GAP entwickelt. Für einen Literaturüberblick zu Lösungsverfahren für das GAP wird verwiesen auf Mar-

⁶ Die Darstellung erfolgt für ein Sammelproblem. Für ein Distributionsproblem gilt die Aussage analog.

⁷ In einer allgemeinen Formulierung des GAP wird eine Zielfunktion der Form $\text{minimiere} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^d d_{ij} x_{ij}$ angenommen, wobei d_{ij} die Zuordnungskosten für die Zuordnung von „Anbieter“ i zu „Nachfrager“ j bezeichnet. Grundmodelle der Gebietsaufteilung verwenden zumeist $d_{ij} = q_i c_{ij}$. Dies wurde auch für das vorliegende Anwendungsproblem gewählt, da es zu einer kompakten Gebietsaufteilung führt [Sch01, S. 36].

⁸ Vgl. Tansini, Urquhart und Viera [Tan03].

tello und Toth [Mar90], Osman [Osm95], Klose und Drexl [Klo02] und Catrysse und Van Wassenhove [Cat92]. Da das GAP selbst ein NP-schweres Optimierungsproblem ist [Klo02], ist die Ermittlung optimaler Lösungen im Allgemeinen eine nicht triviale Aufgabe. Eine mögliche heuristische Lösungstechnik für das GAP, bereits 1965 bei Hess et al. [Hes65] im Kontext der Gebietsaufteilung zu finden, ist die Lösung eines Transportproblems mit anschließender Splitaufteilung. Das Transportproblem⁹ ist ein klassisches Problem des Operations Research, für das effiziente Verfahren existieren und das in vielen Anwendungsgebieten¹⁰ Einsatz findet. Zur Lösung des Transportproblems wird der Transportalgorithmus von Steckhan [Ste03] mit einem Starttableau bestimmt durch die Nordwesteckenregel¹¹ verwendet. Es werden perfekt balancierte, kompakte Gebiete erzeugt, wobei allerdings einige Kunden nicht eindeutig einem Depot zugeordnet sind. Zur Splitauflösung, d.h. zur eindeutigen Zuordnung der Kunden, wird jeder mehrfach zugeordnete Kunde eindeutig demjenigen Depot zuordnet, auf das in der optimalen Lösung des Transportproblems der größte Anteil entfällt.¹² Bei Mehrdeutigkeit wird der Kunde dem Depot mit der kleinsten Nummerierung zugeordnet. Diese heuristische Technik zur Splitauflösung wurde bereits 1971 von Hess und Samuels [Hes71] vorgeschlagen.

Zur Konstruktion eines (nicht notwendigerweise zulässigen) Tourenplans wird die T-Cluster Heuristik aus Kapitel 3.4 auf die resultierenden Ein-Depot-Probleme angewendet. Da sowohl für die Depotzuordnung als auch für die Lösung der Ein-Depot-Probleme eine deterministische Heuristik verwendet wird, ist auch die Gesamtheuristik für die Konstruktion der MDTTRP-Startlösung deterministisch.

⁹ Eine mathematische Formulierung findet sich z.B. bei Domschke [Dom89, S. 88] oder Hillier und Lieberman [Hil97, S. 176].

¹⁰ Vgl. z.B. Steckhan [Ste70] und Domschke [Dom89].

¹¹ Vgl. Zimmermann [Zim97, S. 94].

¹² Schröder [Sch01, S. 147] bezeichnet diesen heuristischen Ansatz zur Splitauflösung als *AssignMax*-Strategie.

6.1.2 Nachbarschaftsdefinition

Bei Mehrdepot-Problemen kann zwischen Intra- und Inter-Depot Moves unterschieden werden. Erstere beinhalten alle Transformationen zwischen Routen des gleichen Depots, letztere alle Transformationen zwischen Routen verschiedener Depots. Nur durch Inter-Depot Moves ist eine Änderung der (initialen) Gebietsaufteilung im Laufe des Verfahrens möglich. Die Transformationen aus Kapitel 5.1.2 werden dahingehend angepasst, dass für Shift und Swap Moves sowohl Intra- als auch Inter-Depot Moves möglich sind. Die Nachbarschaft kann dann ebenfalls durch einen Vektor $(\nu_1^*, \nu_2^*, \nu_3)$ beschrieben werden, wie es in Kapitel 5.1.2 für das TTRP dargestellt ist. Die Erweiterung um Inter-Depot Moves für Shift und Swap Moves wird durch Asterisken gekennzeichnet. Der Root Refining Move kommt unverändert zur Anwendung.

6.1.3 Intensivierungsstrategien

Für das MDTTRP werden neben einer Suche ohne Neustarts, bezeichnet als I_0 , ebenfalls zwei Neustart-Intensivierungsstrategien definiert. Zum einen ist dies die in Kapitel 5.1.7 beschriebene Strategie I_2 , bei der bei jedem Neustart auf alle CVRs mit mindestens zwei Touren eine CVR-Tabusuche-Optimierung angewendet wird, was sich bei TTRP-Problemen als effektiv¹³ herausstellte. Zum anderen wird Strategie I_2 um eine weitere Optimierungsstufe ergänzt, indem bei jedem Neustart getrennt für jedes Depot eine zusätzliche Intra-Depot-Optimierung mittels der TTRP-Tabusuche (unter Verwendung der Strategie I_0) durchführt wird, bevor eine CVR-Optimierung¹⁴ stattfindet. Diese Strategie wird mit I_3 bezeichnet.¹⁵ Für die Intra-Depot-Optimierung der Strategie I_3 werden dabei die besten Parametereinstellungen der TTRP-Heuristik zugrunde gelegt, wie sie in Tabelle 5.1 auf Seite 137 aufgeführt sind. Die Ein-Depot- und CVR-Optimierungen enden dabei

¹³ Vgl. Kapitel 5.2.9.

¹⁴ Um eine falsche Wertzuweisung zu unterbinden, wird für die CVR-Tabusuche-Optimierung der Parameter h auf $h = \infty$ relaxiert.

¹⁵ Die Anzahl der Neustarts auf der gleichen Lösung wird wie bei der in Kapitel 5.1.7 beschriebenen Intensivierungsstrategie I_2 auf maximal drei limitiert.

stets nach μ Iterationen ohne Verbesserung der besten Lösung s^* . Es wird für die I_3 -Intensivierungsstrategie vermutet, dass sich durch die temporäre Dekomposition des Gesamtproblems und die Optimierung der resultierenden Teilprobleme leichter Verbesserungen für die Ein-Depot und damit wiederum für das Gesamtproblem finden lassen. Die verschiedenen Strategien werden in Kapitel 6.2.5 evaluiert.

6.2 Sensitivitätsanalyse der Parameter

6.2.1 Überblick und initiale Einstellungen

Die Parameter wurden mit den besten Werten aus dem TTRP-Tuning, wie sie in der äußersten rechten Spalte in Tabelle 5.1 wiedergegeben sind, initialisiert. Ausnahme ist Parameter μ , der auf $\mu = \infty$ gesetzt wurde, um eine Neustart-Strategie vorerst zu unterbinden. Die Aussagen bezüglich Rechner-typ, Rechengenauigkeit und generellem Ablauf entsprechen den Angaben in Kapitel 5.2.1. Anstelle eines Iterationenlimits wurde ein Zeitlimit von 20 Minuten pro Testdatensatz und Parametereinstellung verwendet. Wegen der Zufallskomponente ($\omega = 3$) wurde jede Parametereinstellung 10-mal auf jeden Testdatensatz angewendet und der Durchschnittswert ermittelt. Für die Analyse wurden neun repräsentative Probleme aus den neuen Testdatensätzen¹⁶ ausgewählt: MDT4-MDT6, MDT10-MDT12, MDT22-MDT24.

Während der Sensitivitätsanalyse für das TTRP zeigten sich insbesondere die Einstellungen für den Parameter δ sowie die Zufallsauswahl mit $\omega = 3$ in Verbindung mit einem Langzeitgedächtnis ($\gamma = 0,001$) als robust. Aufgrund dieser Ergebnisse und basierend auf Angaben aus der Literatur wurden die Einstellungen für diese Parameter ohne weitere Analysen für diesen erweiterten Lösungsansatz übernommen. Ebenso das BA-Akzeptanzkriterium. Die folgenden Einstellungen wurden hingegen getestet: Nachbarschaftsdefinition, Nachbarschaftsreduktion, Tabudauer und Intensivierungsstrategien.

¹⁶ Vgl. Kapitel 2.4.2.2.

6.2.2 Nachbarschaft

Unter Beibehaltung aller anderen Parametereinstellungen wurden Kombinationen aus einer Basis-Nachbarschaft $N_{M,h}^B$ und einer Intensivierungs-Nachbarschaft $N_{M,h}^I$ sowie zwei statische Nachbarschaftsdefinitionen evaluiert. Das Entscheidungskriterium für die Anwendung des Nachbarschaftstyps bei adaptiven Nachbarschaften wird wie in der Grundheuristik für das TTRP definiert¹⁷: falls $c(s) > (1 + 0,1/\sqrt{n}) \cdot c(s^*)$ gilt $N_{M,h}^B(s)$, ansonsten $N_{M,h}^I(s)$. Fünf Kombinationen wurden aufgrund von Vorstudien-Ergebnissen ausgewählt, bezeichnet als A bis E. Kombinationen A, B und C verwenden adaptive Nachbarschaften, wohingegen D und E statische Nachbarschaften nutzen. Für $N_{M,h}^B$ wurde bei A und B die Einstellung (1,1,1) und bei C die Einstellung (2,1,1) für $(\nu_1^*, \nu_2^*, \nu_3)$ gewählt. $N_{M,h}^I$ wurde bei A auf (2,1,1) und bei B und C auf (2,2,1) gesetzt. Für die statischen Nachbarschaften gilt $N_{M,h}^B = N_{M,h}^I$ mit Einstellung (2,1,1) bei D und (2,2,1) bei E.

Die Ergebnisse für die ausgewählten Testdatensätze sind in Tabelle 6.1 zusammengestellt. Kombinationen C, D und E weisen gegenüber A und B im Durchschnitt über die neun Testprobleme deutlich bessere Ergebnisse auf. Eine mögliche Erläuterung hierfür ist die Verwendung von $\nu_1^* = 2$ in $N_{M,h}^B$ bei den drei Kombinationen C, D und E. Wie auch bei TTRP festgestellt wurde, scheinen Shift Moves der Länge 2 vorteilhaft zu sein. Es wird vermutet, dass dadurch ein Aufbau neuer und ein Abbau existierender Subtours bzw. das Verlagern von Subtours zu anderen Routen erleichtert wird. Basierend auf den Ergebnissen des TTRP-Tunings und den vorliegenden MDTRP-Resultaten wurde Kombination C mit $N_{M,h}^B = (2,1,1)$ und $N_{M,h}^I = (2,2,1)$ gewählt. Diese Kombination aus Basis- und Intensivierungsnachbarschaft konnte auch als Intra-Depot Nachbarschaft bei der TTRP-Tabusuche überzeugen.

6.2.3 Nachbarschaftsreduktion

Der Parameter h erscheint sehr sensitiv bezüglich den gegebenen Problemdaten. Daher ist eine Evaluierung dieses Parameters auf den neuen MDTRP-Testproblemen zwingend. Es wurden verschiedene Werte für h im Intervall

¹⁷ Vgl. Kapitel 5.2.2.

Tabelle 6.1: MDTTRP-Ergebnisse für verschiedene Nachbarschaften

	A	B	C	D	E
$N_{M,h}^B$	(1,1,1)	(1,1,1)	(2,1,1)	(2,1,1)	(2,2,1)
$N_{M,h}^I$	(2,1,1)	(2,2,1)	(2,2,1)	(2,1,1)	(2,2,1)
MDT4	1424,21	1421,30	1400,78	1403,92	1407,36
MDT5	1502,42	1493,91	1488,75	1481,34	1493,95
MDT6	1610,05	1605,21	1588,23	1592,02	1582,50
MDT10	2278,12	2266,63	2261,92	2268,59	2269,95
MDT11	2460,58	2476,11	2469,52	2464,69	2458,33
MDT12	2720,01	2717,15	2726,81	2708,21	2721,05
MDT22	1813,29	1813,91	1794,61	1798,43	1800,46
MDT23	1939,06	1945,40	1923,99	1926,63	1925,53
MDT24	2141,14	2139,49	2127,12	2144,36	2123,12
Avg $c(s^*)$	1987,65	1986,57	1975,75	1976,47	1975,81
Min $c(s^*)$	1976,67	1968,21	1959,45	1967,81	1964,97
Max $c(s^*)$	2007,76	1993,18	1988,17	1994,69	1986,69
Avg λ	7643	7245	5385	5667	3771

Tabelle 6.2: MDTTRP-Ergebnisse für verschiedene Größen von h

h	6	8	10	12	15
MDT4	1412,54	1394,45	1403,29	1392,42	1400,78
MDT5	1490,55	1488,04	1497,03	1477,75	1488,75
MDT6	1580,70	1571,92	1564,16	1588,18	1588,23
MDT10	2282,51	2255,78	2265,23	2256,77	2261,92
MDT11	2445,14	2426,20	2462,57	2496,71	2469,52
MDT12	2748,35	2694,89	2718,68	2705,69	2726,81
MDT22	1801,09	1796,23	1793,40	1785,58	1794,61
MDT23	1954,07	1922,27	1940,70	1934,49	1923,99
MDT24	2131,85	2121,47	2118,53	2113,77	2127,12
Avg $c(s^*)$	1982,98	1963,47	1973,73	1972,37	1975,75
Min $c(s^*)$	1974,95	1959,79	1968,87	1968,06	1959,45
Max $c(s^*)$	1990,40	1969,16	1978,97	1980,09	1988,17
Avg λ	14086	10979	8657	7018	5385

[5 ; 25] getestet. Tabelle 6.2 enthält die Ergebnisse ausgewählter Werte. Wie zu erkennen ist, zeigte sich eine Einstellung von $h = 8$ als für diese Datensätze am günstigsten. Je größer der Parameter gewählt wurde, desto schlechter wurden die durchschnittlichen Ergebnisse, vermutlich auch wegen der deshalb geringeren Anzahl an ausführbaren Iterationen. Ein Wert kleiner acht erscheint zu restriktiv, wie z.B. für Einstellung 5 erkennbar ist. Es wurde daher $h = 8$ für die Lösung dieser MDTTRP-Probleme gewählt.

6.2.4 Tabudauer

Ein essentieller und für Tabusuche-Heuristiken kritischer Parameter ist die Tabudauer. Zu lange Tabudauern können zu restriktiv wirken, wohingegen bei zu geringen Werten die Gefahr eines zyklischen Suchverlaufs besteht. Letzteres wird zwar durch die verwendete Zufallsauswahl der Kandidatenmenge und durch das Langzeitgedächtnis reduziert, ist aber dennoch möglich. Für den die Tabudauer bestimmenden Parameter $\bar{\theta}$ wurden daher fixe Werte zwischen fünf und zehn getestet. Die eigentliche Tabudauer bestimmt sich dann als $\theta = \min\{\text{round}(0,3 \cdot n); \text{round}(\bar{\theta} \cdot \log_{10}(n))\}$, wie in Kapitel 5.2.8 beschrieben. Es zeigte sich, dass eine Einstellung von $\bar{\theta} = 6$, wie sie auch bei den TTRP-Problemen gewählt wurde, bei den vorliegenden MDTTRP-Problemen im Durchschnitt die besten Ergebnisse liefert (vgl. Tabelle 6.3).

6.2.5 Intensivierungsstrategien

Bisher wurden alle MDTTRP-Testläufe mit der I_0 -Strategie ausgeführt, d.h. es erfolgte keine Intensivierung durch Neustarts und es galt $\mu = \infty$. Nun wurden die Strategien I_2 und I_3 , wie sie in Kapitel 6.1.3 beschrieben sind, für die Werte $\mu = 2n$ und $\mu = 5n$ getestet. Hierbei bezeichnet die Variable n die Anzahl der Kunden des behandelten Teilproblems, d.h. bei Intra-Depot-Optimierung in Strategie I_3 die Anzahl der Kunden, die dem behandelten Depot zugeordnet sind bzw. bei CVR-Optimierung die Anzahl der Kunden, die auf dieser Route bedient werden. Die Einstellung von μ wird für alle „Optimierungsstufen“ (Gesamtpproblem, Ein-Depot-Probleme, CVR-Optimierungen) gleichgehalten.

Tabelle 6.3: MDTTRP-Ergebnisse für verschiedene Größen von $\bar{\theta}$

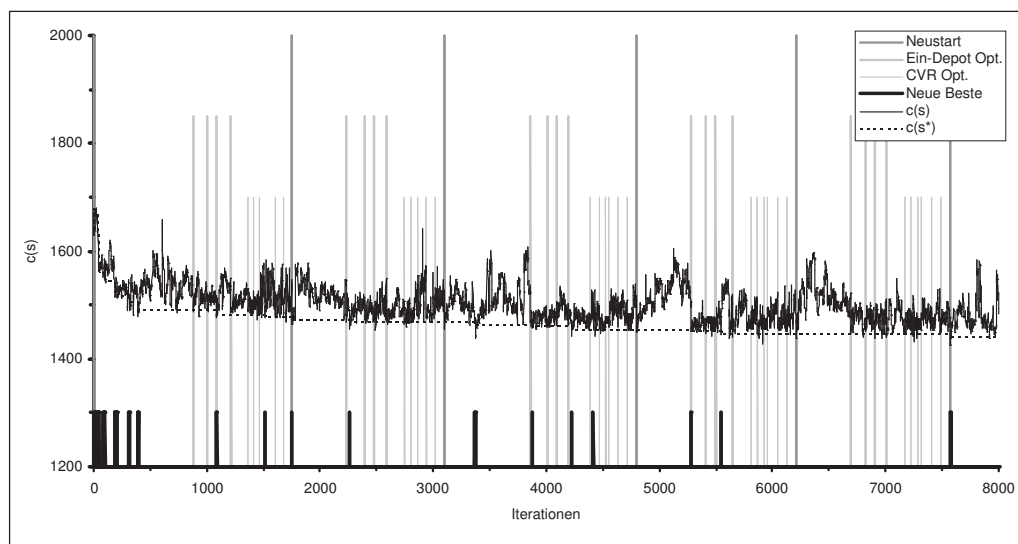
$\bar{\theta}$	5	6	7	8	9
MDT4	1409,66	1394,45	1404,72	1401,72	1401,13
MDT5	1501,18	1488,04	1491,14	1480,30	1481,41
MDT6	1589,28	1571,92	1568,19	1584,72	1588,19
MDT10	2267,64	2255,78	2268,18	2272,46	2266,81
MDT11	2465,95	2426,20	2437,82	2455,14	2436,15
MDT12	2712,79	2694,89	2691,36	2713,96	2693,34
MDT22	1787,86	1796,23	1795,79	1803,14	1806,73
MDT23	1925,08	1922,27	1938,31	1934,73	1964,15
MDT24	2124,87	2121,47	2110,24	2134,50	2126,02
Avg $c(s^*)$	1976,04	1963,47	1967,31	1975,63	1973,77
Min $c(s^*)$	1964,47	1959,79	1962,69	1968,04	1969,26
Max $c(s^*)$	1990,87	1969,16	1977,22	1992,29	1980,32
Avg λ	10872	10979	11015	10954	10976

Tabelle 6.4 zeigt die Ergebnisse dieser Testreihen. Wie zu sehen ist, führt eine Neustart-Strategie in allen Fällen zu einer Verbesserungen gegenüber der einfachen I_0 -Strategie. Überlegen zeigte sich Strategie I_3 . Für beide Werte von μ , insbesondere aber für $\mu = 5n$, konnten deutliche Verbesserungen erzielt werden. Eine temporäre Dekomposition des Gesamtproblems verbunden mit einer Optimierung der Teilprobleme erscheint also vorteilhaft.

Abbildung 6.1 verdeutlicht Strategie I_3 für Testproblem MDT4 mit $\mu = 5n$. Der Optimierungsverlauf von $c(s)$ und $c(s^*)$ für das Gesamtproblem ist unterlegt mit vertikalen Linien. Die kurzen schwarz gekennzeichneten Linien verdeutlichen eine Verbesserung der besten Lösung s^* . Drei in Graustufen dargestellte Linien markieren den Beginn einer neuen Optimierungsstufe. Die bis zu y-Abschnitt 2000 reichenden Linien bezeichnen einen Neustart auf dem Gesamtproblem, die bis zu 1750 reichenden Linien eine beginnende Ein-Depot-Optimierung und die kürzesten grauen Linien den Beginn einer CVR-Optimierung. Wie an der Anzahl der CVR-Neustarts zu erkennen ist, liegen zuerst 5 CVRs mit jeweils mindestens 2 Touren vor. Im Verlauf der Suche wird dann allerdings eine weitere CVR mit mindestens 2 Touren neu aufgebaut. Dies wird durch die diesem Verfahren zugrunde liegende Definition der Shift Moves ermöglicht.

Tabelle 6.4: MDTTRP-Ergebnisse für verschiedene Intensivierungsstrategien

I	I_2		I_3		I_0
μ	$2 \cdot n$	$5 \cdot n$	$2 \cdot n$	$5 \cdot n$	∞
MDT4	1395,85	1397,48	1385,88	1391,59	1394,45
MDT5	1473,90	1468,96	1476,63	1479,91	1488,04
MDT6	1551,67	1566,86	1566,22	1555,18	1571,92
MDT10	2262,48	2261,84	2255,52	2249,37	2255,78
MDT11	2440,31	2455,98	2454,61	2435,15	2426,20
MDT12	2682,51	2690,19	2681,01	2665,51	2694,89
MDT22	1800,88	1796,12	1790,10	1787,62	1796,23
MDT23	1931,32	1921,51	1908,49	1908,20	1922,27
MDT24	2104,27	2096,48	2085,55	2081,74	2121,47
Avg $c(s^*)$	1960,35	1961,71	1956,00	1950,47	1963,47
Min $c(s^*)$	1945,38	1951,67	1934,97	1941,12	1959,79
Max $c(s^*)$	1965,98	1971,53	1967,90	1959,86	1969,16
Avg λ	13006	13667	13922	14904	10979

Abbildung 6.1: I_3 -Optimierungsverlauf für Problem MDT4 mit $\mu = 5n$

Kapitel 7

Entwicklung einer Tabusuche-Heuristik für das PTTRP

In diesem Kapitel wird eine Erweiterung der in Kapitel 5 für das TTRP dargestellten Tabusuche-Heuristik auf das periodische Tourenplanungsproblem bei restringierendem Anhängereinsatz (PTTRP)¹ präsentiert. Dabei können viele Komponenten der TTRP-Tabusuche unverändert übernommen werden. Dies sind der Shifting Penalty Ansatz², die Wahl der Kandidatenmenge, der Tabustatus³, das BA-Akzeptanzkriterium und das Langzeitgedächtnis. Nachfolgend werden daher nur die zu modifizierenden Elemente explizit aufgeführt. Im Anschluss erfolgt eine Sensitivitätsanalyse für ausgewählte Parameter.

¹ Vgl. die Definition des PTTRP in Kapitel 2.4.1.1.

² Die Zielfunktion ergibt sich als $f(s) := c(s) + \alpha \cdot q(s)$, wobei $c(s)$ die Gesamtdistanz und $q(s)$ die gesamte Überkapazität über alle Tage des Planungshorizonts sowie α den Shifting Penalty Parameter bezeichnet.

³ In dem hier vorgestellten PTTRP-Verfahren ist jede Route eindeutig einem Fahrzeug und einem Tag zugeordnet. Dies ermöglicht die Speicherung von Tabu- und Häufigkeitsattributen in Form eines Tripels. Eine Referenz auf eine Route durch Angabe von Fahrzeug und Tag (wie bei Cordeau, Gendreau und Laporte [Cor97]) würde in diesem Ansatz jeweils ein Quadrupel zur Speicherung der Attribute erfordern.

7.1 Modifizierte Komponenten des TTRP-Verfahrens

7.1.1 Startlösung

Bei periodischen Tourenplanungsproblemen bietet sich ein zweistufiges Konstruktionsverfahren für die Generierung einer Startlösung an. Zuerst wird jedem Kunden i ein Besuchsmuster $r \in C_i$ aus der Menge seiner möglichen Besuchsmuster C_i zugeteilt und im Anschluss ein „normales“ Tourenplanungsproblem für jeden Tag $t' = 1, \dots, t$ gelöst. Pro Tag stehen dabei m Fahrzeuge zur Verfügung, wobei jedes Fahrzeug genau eine Route pro Tag fahren kann. Insgesamt sind daher über den ganzen Planungshorizont $nr = m \cdot t$ Routen⁴ maximal möglich. Mehrere Strategien wurden in der Literatur für die Wahl der Besuchsmuster vorgeschlagen. Kapitel 2.3.1.3 gibt hierzu einen Überblick. In diesem Ansatz wird, wie auch bei Angelelli und Speranza [Ang02] oder Cordeau et al. [Cor97, Cor01a], für jeden Kunden i ein zufälliges Besuchsmuster $r \in C_i$ gewählt und die T-Cluster Heuristik aus Kapitel 3.4 für die Lösung der täglichen Tourenplanungsprobleme verwendet.

7.1.2 Nachbarschaftsdefinition

Um im Laufe des Verbesserungsverfahrens eine Änderung der Besuchsmuster zu ermöglichen, wird der Nachbarschaftsdefinition aus Kapitel 5.1.2 ein weiterer Move, ein sog. *Inter-Tag Move* hinzugefügt.⁵ Für jeden Kunden i in Kandidatenmenge M und aktuellem Besuchsmuster $r \in C_i$ werden dann im Rahmen eines Inter-Tag Moves alle alternativen Besuchsmuster $r' \in C_i \setminus r$ evaluiert. Kunden, die an mindestens einem Tag des aktuellen Besuchsmusters die Funktion eines Roots innehaben, werden hiervon ausgenommen. Für einen gegebenen Kunden i sei die binäre Konstante a_{rl} gleich 1, falls und

⁴ Die Anzahl an maximal möglichen Routen nr wird zur Normierung der Langzeitstrafe eingesetzt, vgl. Kapitel 5.1.6.

⁵ Die anderen Moves werden auch als *Intra-Tag Moves* bezeichnet, da sie die Besuchsmuster der Kunden nicht verändern.

nur falls Tag l ($1 \leq l \leq t$) zu Besuchsmuster $r \in C_i$ gehört und 0 sonst. Die TTRP-Nachbarschaft wird dann um folgende Transformation für jeden Kunden $i \in M$, $i \neq \text{Root}$ und jedes zugehörige Besuchsmuster $r' \in C_i \setminus r$ erweitert:

Für jeden Tag $l = 1, \dots, t$ führe aus

- Falls $a_{rl} = 1$ und $a_{r'l} = 0$, entferne Kunde i aus seiner Tour am Tag l .
- Falls $a_{rl} = 0$ und $a_{r'l} = 1$, füge Kunde i so in eine Tour vor, nach oder zu einem seiner h -Nachbarn am Tag l ein, dass der Anstieg in $f(s)$ minimiert wird.

Der Move folgt dem Vorschlag von Cordeau et al. [Cor97, Cor01a], jedoch mit Einschränkung der möglichen Einfügepositionen ausschließlich vor, nach oder zu einem h -Nachbarn des Zieltages (einschließlich dem Depot). TTRP-spezifisch können VC-Kunden in existierende (ggf. leere) Main- und Subtours und TC-Kunden in existierende oder neue Subtours sowie PTRs eingefügt werden. Die Einfüge-Evaluation erfolgt dabei mittels cheapest insertion-Strategie [Joh85].

Der Inter-Tag Move wird durch Binärvariable ν_4 gekennzeichnet, wobei $\nu_4 = 1$ die Anwendung dieses Move-Typs bezeichne. Damit kann der die Nachbarschaft kennzeichnende Vektor (ν_1, ν_2, ν_3) auf $(\nu_1, \nu_2, \nu_3, \nu_4)$ erweitert werden. Falls kein mehrtägiges Problem vorliegt, kann dieser Move-Typ nicht angewendet werden; es gilt $\nu_4 = 0$. Zur Vereinfachung der Schreibweise wird ν_4 in diesen Fällen nicht aufgeführt.

Die Move-Typen Shift, Swap und Root Refining werden bei mehrtägigem Planungshorizont für alle in Kandidatenmenge M enthaltenen Kunden und jeweils für alle Tage des zugehörigen aktuellen Besuchsmusters evaluiert. Sie werden wie in Kapitel 5.1.2 beschrieben als Intra-Tag Transformationen angewendet; eine Änderung der Besuchsmuster erfolgt dabei nicht.

7.1.3 Nachbarschaftsreduktion

Der die Einschränkung der Nachbarschaft bestimmende Parameter h wird bei Vorliegen eines mehrtägigen Planungshorizonts dahingehend modifiziert, dass für einen gegebenen Tag l ($1 \leq l \leq t$) ausschließlich diejenigen Kunden (und das Depot) als Kandidaten für eine h -Nachbarschaftsbeziehung betrachtet werden, bei denen Tag l im aktuellen Besuchsmuster r enthalten ist, d.h. für die gilt $b_{irl} = 1$. Diese Modifikation ist notwendig, da sich sonst evtl. keine bzw. eine zu geringe Anzahl an Einfügepositionen ergeben könnte. Dies würde unter Umständen die Nachbarschaftsevaluierung zu stark einschränken.

7.1.4 Intensivierungsstrategien

Die in Kapitel 5.1.7 für das TTRP und in Kapitel 6.1.3 für das MDTTTRP erweiterten Intensivierungsstrategien finden in analoger Weise auch beim PTTRP Anwendung. Insbesondere sind dies (zusätzlich zu Strategie I_0 ohne Neustarts) Strategie I_2 , bei der nach μ Iterationen ohne Verbesserung der besten Lösung s^* ein Neustart einschließlich CVR-Optimierung aller CVRs (aller Tage) mit mindestens zwei Touren stattfindet, sowie Strategie I_3 , die Strategie I_2 dahingehend erweitert, dass vor den CVR-Optimierungen für jeden Tag des Planungshorizonts eine Intra-Tag-Optimierung durchgeführt wird. Zur Intra-Tag- und CVR-Optimierung wird die TTRP-Tabusuche aus Kapitel 5 mit den besten Parametereinstellungen aus dem TTRP-Tuning, wie sie in Tabelle 5.1 auf Seite 137 aufgeführt sind, genutzt.⁶ Die Ein-Depot- und CVR-Optimierungen enden dabei stets nach μ Iterationen ohne Verbesserung der besten Lösung s^* . Des Weiteren existiert sowohl bei Strategie I_2 als auch bei Strategie I_3 ein Limit von maximal drei Neustarts auf der gleichen Lösung, um die Suche nicht auf einen Teilbereich des Lösungsraumes einzuschränken. Analog zu den MDTTTRP-Strategien, wo bei Intra-Depot- und CVR-Optimierung die Depotzuordnungen unverändert bleiben, werden bei der Intra-Tag- und CVR-Optimierung im Rahmen der PTTRP-Strategien I_2 und I_3 die Besuchsmuster nicht verändert. Die beiden Intensivierungsstrategien werden in Kapitel 7.2.5 evaluiert.

⁶ Um eine falsche Wertzuweisung zu unterbinden, wird Parameter h bei einer CVR-Optimierung auf $h = \infty$ relaxiert.

7.2 Sensitivitätsanalyse der Parameter

7.2.1 Überblick und initiale Einstellungen

Die Analyse erfolgte analog zum Tuning der MDTTRP-Heuristik (vgl. Kapitel 6.2). Die Aussagen bezüglich Rechnertyp, Rechengenauigkeit und generellem Ablauf entsprechen den Angaben in Kapitel 5.2.1. Wegen der verwendeten Zufallskomponente ($\omega = 3$) wurde jede Parametereinstellung 10-mal auf jeden Testdatensatz angewendet und der Durchschnittswert ermittelt. Für die Analyse wurden neun repräsentative Probleme aus den neuen Testdatensätzen⁷ ausgewählt: PT4-PT6, PT10-PT12, PT22-PT24. Anstelle einer Anzahl an auszuführenden Iterationen wurde ein Zeitlimit von 40 Minuten pro Testdatensatz und Parametereinstellung verwendet und es kam (vorerst) keine Intensivierungsstrategie zum Einsatz, d.h. es galt $\mu = \infty$. Eine Ausnahme bildet die Analyse der Intensivierungsstrategien, wo das Zeitlimit für PT10-PT12 und PT22-PT24 auf jeweils 160 Minuten erhöht wurde. Dies erschien aufgrund der langen Rechenzeiten, die für diese Probleme benötigt werden notwendig. Um eine Verzerrung der Ergebnisse durch unterschiedliche Ausgangslösungen zu unterbinden, wurde für jedes Testproblem eine zufällige Startlösung erzeugt und diese für alle Testläufe beibehalten.

Die Parameter wurden mit den besten Werten aus dem TTRP-Tuning, wie sie in der äußersten rechten Spalte in Tabelle 5.1 wiedergegeben sind, initialisiert. Die Einstellungen $\delta = 0,5$, $\omega = 3$ und $\gamma = 0,001$ sowie das BAAkzeptanzkriterium wurden wie beim MDTTRP-Tuning übernommen und nicht weiter untersucht. Getestet wurden -in der angegebenen Reihenfolge- die Nachbarschaftsdefinition, die Nachbarschaftsreduktion durch Parameter h , die Tabudauer und die Intensivierungsstrategien I_2 und I_3 .

7.2.2 Nachbarschaft

Zu Beginn des PTTRP-Tunings wurden drei Kombinationen aus einer Basis-Nachbarschaft $N_{M,h}^B$ und einer Intensivierungs-Nachbarschaft $N_{M,h}^I$ sowie

⁷ Vgl. Kapitel 2.4.1.2.

zwei statische Nachbarschaftsdefinitionen evaluiert, bezeichnet als A bis E. Das Entscheidungskriterium für die Anwendung des Nachbarschafts-Typs bei adaptiven Nachbarschaften wird wie in der Grundheuristik für das TTRP definiert⁸: falls $c(s) > (1 + 0,1/\sqrt{n}) \cdot c(s^*)$ gilt $N_{M,h}^B(s)$, ansonsten $N_{M,h}^I(s)$. Für die statischen Nachbarschaftsdefinitionen (Kombinationen B und D), gilt $N_{M,h}^B(s) = N_{M,h}^I(s)$. Alle Kombinationen verwenden das Root Refining und die Inter-Tag Moves ($\nu_3 = \nu_4 = 1$). Variiert wurden die Einstellungen für ν_1 und ν_2 . Detaillierte Angaben zu den Einstellungen für $(\nu_1, \nu_2, \nu_3, \nu_4)$ und die zugehörigen Testergebnisse sind Tabelle 7.1 zu entnehmen.

Die besten durchschnittlichen Ergebnisse wurden mit Kombination C erreicht. Diese Kombination nutzt für $N_{M,h}^B(s)$ einfache Shift und Swap Moves der Länge $\nu_1 = \nu_2 = 1$ und erweitert ν_1 auf $\nu_1 = 2$ für $N_{M,h}^I(s)$. Der Verzicht auf Swap Moves ($\nu_2 = 0$ für $N_{M,h}^B(s)$) führte im Vergleich zu den anderen Kombinationen bei Kombination A zu schlechten Resultaten. Wie bereits beim TTRP- und MDTTRP-Tuning beobachtet, erscheint eine (selektive) Anwendung von $\nu_1 = 2$ vorteilhaft, wie an den Kombinationen C, D und E erkennbar ist. Es wurde Kombination C mit variabler Nachbarschaftsdefinition gewählt, da damit die besten Ergebnisse erzielt werden konnten.

7.2.3 Nachbarschaftsreduktion

Für den für die PTTRP-Heuristik modifizierten Parameter h wurden verschiedene Werte im Intervall $[5 ; 25]$ getestet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7.2 für ausgewählte Werte zusammengestellt. Im Durchschnitt liefert $h = 8$ die besten Resultate. Je größer der Wert ist, desto schlechter werden die Ergebnisse und desto geringer ist die Anzahl an insgesamt ausgeführten Iterationen. Kleinere Werte erwiesen sich als zu restriktiv. Mit $h = 8$ scheint ein für diese Testprobleme guter Wert gefunden zu sein, zumal sich diese Einstellung auch beim MDTTRP-Tuning ergab und die MDTTRP-Testdatensätze auf den gleichen Ausgangsdatensätzen gründen. Da auch die verbleibenden, hier nicht untersuchten 21 der 30 neuen PTTRP-Testdatensätze auf gleiche Weise erzeugt wurden⁹, scheint ein Übertrag der Einstellung auch auf diese Probleme ohne weitere Tests möglich.

⁸ Vgl. Kapitel 5.2.2.

⁹ Vgl. Cordeau, Gendreau und Laporte [Cor97].

Tabelle 7.1: PTTRP-Ergebnisse für verschiedene Nachbarschaften

	A	B	C	D	E
$N_{M,h}^B$	(1,0,1,1)	(1,1,1,1)	(1,1,1,1)	(2,1,1,1)	(2,1,1,1)
$N_{M,h}^I$	(1,1,1,1)	(1,1,1,1)	(2,1,1,1)	(2,1,1,1)	(2,2,1,1)
PT4	4139,26	4110,43	4093,29	4047,71	4040,20
PT5	4385,06	4371,24	4324,53	4338,73	4302,30
PT6	4965,68	4954,10	4943,46	4958,76	4958,62
PT10	6708,98	6683,79	6658,05	6698,64	6676,12
PT11	7358,82	7329,63	7360,31	7345,07	7365,40
PT12	8261,54	8235,40	8164,48	8204,29	8294,00
PT22	8100,21	8046,18	7979,76	8054,36	8040,45
PT23	9188,86	9205,27	9108,41	9077,03	9162,15
PT24	10457,93	10434,73	10366,97	10426,38	10460,04
Avg $c(s^*)$	7062,92	7041,20	6999,92	7016,77	7033,26
Min $c(s^*)$	7054,41	7029,79	6952,55	7006,84	6996,43
Max $c(s^*)$	7068,80	7051,63	7023,15	7034,96	7057,66
Avg λ	4058	3141	2856	2645	1956

Tabelle 7.2: PTTRP-Ergebnisse für verschiedene Größen von h

h	6	8	10	12	15
PT4	4096,86	4066,35	4069,75	4072,23	4093,29
PT5	4371,46	4320,78	4334,64	4310,52	4324,53
PT6	4966,00	4955,95	4959,79	4941,47	4943,46
PT10	6617,78	6622,29	6663,95	6634,65	6658,05
PT11	7305,29	7261,42	7270,09	7279,59	7360,31
PT12	8126,47	8118,07	8146,46	8207,68	8164,48
PT22	7997,01	7981,46	7968,56	8016,67	7979,76
PT23	9147,55	9082,45	9064,16	9074,68	9108,41
PT24	10412,39	10394,35	10362,52	10401,87	10366,97
Avg $c(s^*)$	7004,53	6978,12	6982,21	6993,26	6999,92
Min $c(s^*)$	6965,98	6963,61	6958,28	6978,60	6952,55
Max $c(s^*)$	7030,96	6985,75	7008,77	7005,40	7023,15
Avg λ	8343	6232	4917	3782	2856

7.2.4 Tabudauer

Die Ergebnisse für verschiedene Werte von $\bar{\theta}$ sind in Tabelle 7.3 wiedergegeben. Getestet wurden fixe Werte für $\bar{\theta}$ im Intervall $[5 ; 10]$. Die eigentliche Tabudauer bestimmt sich als $\theta = \min\{\text{round}(0,3 \cdot n); \text{round}(\bar{\theta} \cdot \log_{10}(n))\}$ wie in Kapitel 5.2.8 beschrieben. Die PTTRP-Tabusuche erwies sich in der Tendenz als weniger sensitiv gegenüber diesem Parameter. Die initiale Einstellung $\bar{\theta} = 6$ liefert gute Ergebnisse und wird basierend auf den Erfahrungen aus dem TTRP- und MDTTRP-Tuning auch für das PTTRP fixiert. Diese Einstellung scheint v.a. in Kombination mit der Zufallsauswahl der Kandidatenmenge ausreichend, um einen zyklischen Suchverlauf effektiv zu unterbinden.

Tabelle 7.3: PTTRP-Ergebnisse für verschiedene Größen von $\bar{\theta}$

$\bar{\theta}$	5	6	7	8	9
PT4	4069,23	4066,35	4103,55	4071,01	4062,67
PT5	4338,60	4320,78	4356,41	4365,18	4365,14
PT6	4958,84	4955,95	4955,59	4953,21	4964,44
PT10	6641,65	6622,29	6616,81	6631,57	6603,99
PT11	7276,31	7261,42	7267,85	7284,16	7249,33
PT12	8135,16	8118,07	8111,64	8096,00	8084,33
PT22	8013,24	7981,46	7988,37	7979,52	8007,26
PT23	9080,29	9082,45	9065,54	9087,78	9104,94
PT24	10368,19	10394,35	10396,83	10348,08	10380,84
Avg $c(s^*)$	6986,83	6978,12	6984,73	6979,61	6980,33
Min $c(s^*)$	6955,88	6963,61	6955,31	6955,72	6932,19
Max $c(s^*)$	7001,80	6985,75	7018,13	6998,87	7000,68
Avg λ	6012	6232	6177	6161	6221

7.2.5 Intensivierungsstrategien

Für die Analyse der Intensivierungsstrategien wurden die zwei Einstellungen $\mu = 2n$ und $\mu = 5n$ getestet. Die Variable n bezeichnet die Anzahl der Kunden des behandelten Teilproblems, d.h. bei Intra-Tag-Optimierung in Strate-

Tabelle 7.4: PTTRP-Ergebnisse für verschiedene Intensivierungsstrategien

I μ	I_2		I_3		I_0
	$2 \cdot n$	$5 \cdot n$	$2 \cdot n$	$5 \cdot n$	∞
PT4	4049,60	4060,53	4060,48	4044,51	4066,35
PT5	4282,49	4277,91	4292,57	4283,13	4320,78
PT6	4904,79	4857,36	4923,21	4872,71	4955,95
PT10	6518,86	6511,96	6522,18	6493,19	6528,65
PT11	7104,72	7123,02	7138,69	7098,30	7169,52
PT12	7895,55	7899,74	7963,30	7901,00	7993,87
PT22	7876,27	7851,27	7877,23	7839,98	7878,39
PT23	8852,20	8864,84	8867,68	8838,39	9010,15
PT24	10001,94	10105,99	9977,32	9990,87	10136,34
Avg $c(s^*)$	6831,83	6839,18	6846,96	6818,01	6895,56
Min $c(s^*)$	6803,62	6818,08	6830,43	6804,71	6873,47
Max $c(s^*)$	6851,79	6861,20	6870,81	6841,12	6921,08
Avg λ	20622	22008	20291	19481	11388

gie I_3 nur Kunden, die an dem entsprechenden Tag eingeplant sind, bzw. bei CVR-Optimierung nur Kunden, die auf dieser Route bedient werden. Wie Tabelle 7.4 zu entnehmen ist, führten die Intensivierungsstrategien I_2 und I_3 zu deutlich besseren Ergebnissen, als die „einfache“ Suche I_0 .¹⁰ Eine eindeutige Aussage bezüglich der Dominanz einer der beiden Intensivierungsstrategien und eines Einstellungswertes für μ erscheint kaum möglich. Basierend auf Beobachtungen des Suchverlaufs, Vorstudien und den guten Ergebnissen bei analoger Anwendung in der MDTTRP-Tabusuche wurde schließlich Strategie I_3 mit $\mu = 5n$ gewählt.

¹⁰ Der Unterschied in der durchschnittlichen Iterationenzahl zwischen den Intensivierungsstrategien I_2 bzw. I_3 zu I_0 rührt daher, dass λ die Gesamtzahl der durchgeführten Iterationen ohne Berücksichtigung der „Optimierungsstufe“ (Gesamtproblem, Intra-Tag-Optimierung, CVR-Optimierung) misst. Bei Intra-Tag- und CVR-Optimierung sind die Rechenzeiten pro Iteration aufgrund der kleineren Nachbarschaft jedoch wesentlich geringer als beim PTTRP-Gesamtproblem. Daraus resultiert die bei gleichem Zeitlimit deutlich geringere Zahl an insgesamt ausgeführten Iterationen bei Strategie I_0 .

Kapitel 8

Einheitliche Darstellung und Evaluation der neuen Algorithmen

Dieses Kapitel präsentiert eine einheitliche Darstellung der in den Kapiteln 5, 6 und 7 vorgestellten Verfahren und im Anschluss daran eine Evaluierung der neuen Algorithmen auf existierenden und neuen Benchmarkproblemen.

8.1 Einheitliche Darstellung der Lösungsverfahren

8.1.1 Die Funktion SEARCH

Im Folgenden wird das „Grundmodul“ der Tabusuche-Heuristiken, genannt SEARCH, beschrieben. Diese Funktion wird in den verschiedenen Phasen der Tabusuche-Verfahren eingesetzt. Die Steuerung wird dabei von einer zentralen Steuerfunktion übernommen wie sie in Kapitel 8.1.2 beschrieben wird.

Der Ablauf der Funktion SEARCH ist in Tabelle 8.1 dargestellt. Die Funktion folgt den Beschreibungen der Kapitel 5.1.1 bis 5.1.6 der TTRP-Tabusuche und berücksichtigt die Modifikationen der MDTTRP-Heuristik aus Kapitel

6 und der PTTRP-Heuristik aus Kapitel 7. Hierbei gilt es zu beachten, dass die Funktion nicht nur auf das vollständige Problem, sondern auch zur Optimierung eines Teilproblems, z.B. einer CVR, genutzt werden kann. Eine Unterscheidung des Anwendungsproblems wird für weitere Ausführungen nicht durchgeführt, jedoch gilt generell, dass alle in der Funktion verwendeten Parameter sich immer auf das vorliegende Problem beziehen. So gilt z.B. bei einer CVR-Optimierung, dass $c(s)$ die Gesamtdistanz der betrachteten CVR darstellt und dass z.B. bei der Kalkulation der Häufigkeitsstrafe die Parameter n , rc und m auf die Anzahl der Kunden, Root-Kandidaten (einschließlich dem Depot) und Zugfahrzeuge in ausschließlich dieser CVR referenzieren, d.h. in diesem Fall gilt z.B. $m = 1$.

Die Suche startet auf einer initialen, nicht notwendigerweise zulässigen Lösung s zu einem gegebenen Problem und bekommt¹ zusätzlich die Werte für den globalen² Iterationenzähler λ und für Variable y , die die Anzahl an Neustarts auf Lösung s steuert. Die Funktion gibt die beste gefundene Lösung s^* und den Wert von λ zurück.

In Stufe (1) wird die Tabusuche initialisiert. Es werden alle Tabudauern τ_{ikl} und Frequenzzähler ρ_{ikl} auf null und der Shifting Penalty Parameter α auf eins gesetzt. Zudem werden der lokale Iterationenzähler $\tilde{\lambda}$ und die Variable λ^* mit eins initialisiert. Letztere speichert die Nummer der Iteration in der in diesem Suchlauf die beste Lösung s^* gefunden wurde. Da bei Anwendung einer Intensivierungsstrategie maximal drei Neustarts auf der gleichen Lösung des Gesamtproblems stattfinden, wird die Variable $\tilde{\eta}$ abhängig von y gesetzt. Beim dritten Neustart auf der gleichen Lösung wird $\tilde{\eta}$ temporär auf $\tilde{\eta} = \infty$ relaxiert. Ansonsten wird $\tilde{\eta}$ gleich dem Wert von μ gesetzt, der maximalen Anzahl an Iterationen ohne Verbesserung der besten Lösung.

Die eigentliche Suche erfolgt auf Stufe (2) bis entweder λ das Iterationenlimit η (Stoppkriterium der Gesamtheuristik) oder der lokale Iterationenzähler $\tilde{\lambda}$

¹ Es wird implizit angenommen, dass der Typ des zu lösenden Problems bekannt ist. Abhängig vom Problemtyp werden die in Kapitel 8.1.3 aufgeführten Parametereinstellungen gewählt.

² Es wird unterschieden zwischen einem globalen und einem lokalen Iterationenzähler. Ersterer wird als λ bezeichnet und misst die Anzahl an insgesamt durchgeführten Iterationen. Letzterer wird als $\tilde{\lambda}$ bezeichnet, ist nur für die Funktion SEARCH definiert und misst die Anzahl an Iterationen seit dem Aufruf der Funktion.

Tabelle 8.1: Funktion SEARCH

Eingabe: Initiale Lösung s , globaler Iterationenzähler λ , Steuervariable y .

Ausgabe: Beste gefundene Lösung s^* , globaler Iterationenzähler λ .

- (1) Setze die beste Lösung $s^* := s$. Falls s unzulässig ist, setze $c(s^*) := \infty$.
 Setze $\tilde{\lambda} := 1$, $\lambda^* := 1$ und $\alpha := 1$.
 Setze $\tau_{ikl} := 0$ und $\rho_{ikl} := 0$ für jedes Attribut (i, k, l) .
 Falls $y \leq 3$, setze $\tilde{\eta} := \mu$; ansonsten setze $\tilde{\eta} := \infty$.
- (2) Solange $(\lambda \leq \eta)$ und $(\tilde{\lambda} \leq \lambda^* + \tilde{\eta})$ führe aus
 - (a) Bestimme die Kandidatenmenge M als $round(n/\omega)$ zufällig ausgewählte Kunden.
 Falls $c(s) > (1 + 0, 1/\sqrt{n}) \cdot c(s^*)$, setze $N(s) := N_{M,h}^B(s)$;
 ansonsten setze $N(s) := N_{M,h}^I(s)$.
 Setze $g(s') := \infty$ und $\tau(s') := \infty$.
 - (b) Für jede Nachbarlösung $\bar{s} \in N(s)$ führe aus
 - Bestimme die Tabudauer $\tau(\bar{s})$ und prüfe das Aspirationskriterium.
 - Setze $g(\bar{s}) := f(\bar{s})$.
 Falls $f(\bar{s}) \geq f(s)$, setze $g(\bar{s}) := g(\bar{s}) + \text{Häufigkeitsstrafe } r(\bar{s})$.
 - Falls $(\tau(\bar{s}) < \tau(s'))$ oder falls $(\tau(\bar{s}) = \tau(s') \text{ und } g(\bar{s}) < g(s'))$, setze die beste Nachbarlösung $s' := \bar{s}$.
 - (c) Für jedes Attribut (i, k, l) in der Attributmenge $B(\bar{s})$ führe aus
 - Entferne Kunde i , wie durch den besten Move bestimmt, aus seiner aktuellen Tour zu Root k' und Route l' .
 - Aktualisiere die Tabuliste: setze $\tau_{ik'l'} := \tilde{\lambda} + \theta$.
 - Füge Kunde i , wie durch den besten Move bestimmt, in eine Tour zu Root k in Route l ein.
 - Aktualisiere das Langzeitgedächtnis: setze $\rho_{ikl} := \rho_{ikl} + 1$.
 - (d) Für jede modifizierte Tour führe aus
 - Wende ein 2-opt-Verfahren an. Setze $c(s') := c(s') + \Delta_{2-opt}$.
 - Wende ein Or-opt-Verfahren an. Setze $c(s') := c(s') + \Delta_{Or-opt}$.
 - (e) Falls $(q(s') < q(s^*))$ oder falls $(q(s') = q(s^*) \text{ und } c(s') < c(s^*))$,
 setze $s^* := s'$, $\lambda^* := \tilde{\lambda}$, $\tilde{\eta} := \mu$.
 - (f) Falls $q(s') = 0$, setze $\alpha := \max(0, 01; \alpha/(1 + \delta))$;
 ansonsten setze $\alpha := \min(100; \alpha \cdot (1 + \delta))$.
 - (g) Setze $\lambda := \lambda + 1$ und $\tilde{\lambda} := \tilde{\lambda} + 1$.

die maximale Anzahl an Iterationen ohne Verbesserung von s^* (Neustartkriterium) überschreitet. Die einzelnen Schritte der Suche können grob wie folgt beschrieben werden³: in (2a) wird insbesondere die Kandidatenmenge M und die Nachbarschaft $N(s)$ für die entsprechende Iteration bestimmt; in (2b) wird jede Lösung $\bar{s} \in N(s)$ untersucht und die beste⁴ Nachbarlösung s' gespeichert; der zu s' gehörige Move, gekennzeichnet durch die Attributmenge⁵ $B(\bar{s})$, wird dann in Stufe (2c) ausgeführt und die Tabuliste und die Häufigkeitszähler werden aktualisiert. Nach einer Post-Optimierung der modifizierten Touren in (2d), wird in (2e) die beste Lösung s^* bezüglich einer Aktualisierung⁶ untersucht. Falls s^* aktualisiert wird, wird zugleich die Nummer der lokalen Iteration in λ^* gespeichert und $\tilde{\eta}$ auf den Wert von μ reinitialisiert. Die Aktualisierung von $\tilde{\eta}$ ist für den Fall $\tilde{\eta} = \infty$ (siehe Stufe (1)) notwendig, da ab diesem Zeitpunkt das Neustart-Stoppkriterium wieder Anwendung findet. Schließlich werden in (2f) der Shifting Penalty Parameter α und in (2g) die Iterationenzähler aktualisiert.

8.1.2 Einheitliche Steuerfunktion

Eine einheitliche Steuerfunktion für die TTRP-, MDTPRP- und PTTRP-Heuristiken zeigt Tabelle 8.2. Es wird ein modularer Aufbau für die Anwendung der Funktion SEARCH zugrunde gelegt und die in den Sensitivitätsanalysen bestimmten Intensivierungsstrategien werden angewendet. Dies ist Strategie I_2 bei TTRP-Problemen und Strategie I_3 bei MDTPRP- und PTTRP-Problemen. Die Schritte der Steuerfunktion können grob wie folgt beschrieben werden:

In Stufe (I) wird das Verfahren mit einer Lösung eines problemspezifischen Konstruktionsverfahrens initialisiert und die notwendigen Funktionsparame-

³ Für eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Schritte wird auf die Kapitel 5, 6 und 7 verwiesen.

⁴ Es findet das BA-Akzeptanzkriterium Anwendung.

⁵ Zur Definition der Attributmenge vgl. Kapitel 5.1.5. Bei PTTRP-Problemen gilt es zu beachten, dass durch Inter-Tag Moves ein einzelner Kunde mehrfach (an verschiedenen Tagen) verschoben werden kann (vgl. Kapitel 7.1.2).

⁶ Eine Lösung wird als besser erachtet, wenn sie eine geringere Überkapazität oder bei gleicher Überkapazität eine geringere Gesamtdistanz aufweist.

Tabelle 8.2: Einheitliche Steuerfunktion der neuen Algorithmen

Ausgabe: Beste gefundene Lösung s^* .

- (I) Generiere eine initiale Lösung s .
Setze die beste Lösung $s^* := s$. Falls s unzulässig ist, setze $c(s^*) := \infty$.
Setze $\lambda := 1$ und $y := 1$.
 - (II) Solange $(\lambda \leq \eta)$ führe aus
 - (a) Setze $y := y + 1$.
 - (b) Wende die Funktion SEARCH auf das vollständige Problem zu s^* an.
Falls eine bessere Lösung gefunden wurde, aktualisiere die beste Lösung s^* und setze $y := 1$.
 - (c) Falls $d > 1$ (bzw. $t > 1$) führe für jedes Depot $d' = 1, \dots, d$ (bzw. jeden Tag $t' = 1, \dots, t$) in s^* aus
 - Wende die Funktion SEARCH auf das Ein-Depot-Problem zu d' (bzw. t') an.
 - Falls eine bessere Lösung gefunden wurde, aktualisiere die beste Lösung s^* und setze $y := 1$.
 - (d) Für jede CVR in s^* mit mindestens zwei Touren führe aus
 - Wende die Funktion SEARCH nur auf diese CVR an.
 - Falls eine bessere Lösung gefunden wurde, aktualisiere die beste Lösung s^* und setze $y := 1$.
 - (III) Wende eine lokale Suche ohne Zufallsauswahl auf die beste Lösung s^* an.
-

ter λ und y werden auf eins gesetzt. Hierbei bezeichnet λ den globalen Iterationenzähler, der die Anzahl an Iterationen unabhängig von der Optimierungsstufe (Gesamtproblem, Intra-Depot- bzw. Intra-Tag-Optimierung, CVR-Optimierung) zählt. Die Variable y misst die Anzahl an Neustarts auf der aktuell besten Lösung s^* .

Die Suche selbst wird in Stufe (II) ausgeführt und gesteuert. Zu Beginn eines vollständigen Durchlaufs wird in Stufe (IIa) die Variable y um eins inkrementiert. Entsprechend der Intensivierungsstrategien wird die Funktion SEARCH zuerst auf das vollständige Problem zur besten Lösung s^* des Ge-

samtproblems angewendet (Stufe (IIb)). Bei Multi-Depot oder periodischen Problemen erfolgt sodann eine Intra-Depot- bzw. Intra-Tag-Optimierung für jedes Depot bzw. jeden Tag des Planungshorizonts mittels SEARCH (Stufe (IIc)). Für alle Problemtypen wird danach eine CVR-Optimierung für alle CVRs mit mindestens zwei Touren mittels SEARCH ausgeführt (Stufe (IId)). Nach jeder Anwendung der Funktion SEARCH wird, falls eine bessere Lösung gefunden wurde, die beste Lösung s^* aktualisiert, sowie y auf $y := 1$ zurückgesetzt. Stufe (II) endet, wenn eine gegebene maximale Anzahl an Iterationen η ausgeführt wurde.

Da eine Zufallsauswahl der Kandidatenmenge, wie sie in Funktion SEARCH zum Einsatz kommt, ein Auffinden eines lokalen Optimums verhindern kann [Gen03], wird zusätzlich am Ende des Verfahrens (Stufe (III)) eine lokale Descent-Suche auf das Gesamtproblem zur besten erhaltenen Lösung s^* angewendet. Hierbei werden alle Kunden betrachtet und die Nachbarschaft des Gesamtproblems mit Parametereinstellung $h = \infty$ verwendet.

8.1.3 Parameterüberblick

Einen einheitlichen Überblick über die verwendeten Parameter und den empfohlenen Einstellungen, wie sie in den Sensitivitätsanalysen ermittelt wurden, geben die Tabellen 8.3 und 8.4.

In Tabelle 8.3 werden die variablen, von der Optimierungsstufe und ggf. dem zugrundeliegenden Problem-Typ abhängigen Parameter dargestellt. Dies sind die Basis-Nachbarschaft $N_{M,h}^B(s)$, die Intensivierungs-Nachbarschaft $N_{M,h}^I(s)$ und der Parameter für die Nachbarschaftsgröße h . Hierbei bezeichnet Stufe (II-b) das Gesamtproblem, Stufe (II-c) eine Intra-Depot- bzw. Intra-Tag-Optimierung und Stufe (II-d) eine CVR-Optimierung in Anlehnung an die Stufen der Steuerfunktion wie sie in Kapitel 8.1.2 beschrieben sind. Bei Anwendung auf das Gesamtproblem gilt es zu beachten, dass bei periodischen und Multidepot-Problemen die TTRP-Nachbarschaft um Inter-Tag bzw. Inter-Depot Moves erweitert wird. Dies ist bei MDTTRP-Problemen durch Asterisken bei den Vektorelementen und bei PTTRP-Problemen durch Angabe von ν_4 gekennzeichnet. Die aktuelle Nachbarschaft $N(s)$ der Lösung

Tabelle 8.3: Variable Parametereinstellungen

Parameter	Stufe (II-b)			Stufe (II-c)	Stufe (II-d)
	TTRP	MDTTRP	PTTRP		
Move-Typ	(ν_1, ν_2, ν_3)	$(\nu_1^*, \nu_2^*, \nu_3)$	$(\nu_1, \nu_2, \nu_3, \nu_4)$	(ν_1, ν_2, ν_3)	(ν_1, ν_2, ν_3)
Basis-Nachbarschaft					
$N_{M,h}^B(s)$	(2,1,1)	(2,1,1)	(1,1,1,1)	(2,1,1)	(2,1,1)
Intensivierungs-Nachbarschaft					
$N_{M,h}^I(s)$	(2,2,1)	(2,2,1)	(2,1,1,1)	(2,2,1)	(2,2,1)
Nachbarschaftsgröße					
h	15	8	8	15	∞

s wird in Stufe (2a) der Funktion SEARCH⁷ als $N_{M,h}^B(s)$ oder $N_{M,h}^I(s)$ bestimmt, wobei die zur Optimierungsstufe gehörige Einstellung der Nachbarschaftsgröße h und eine zufällig gewählte Kandidatenmenge M zugrunde gelegt werden.

Tabelle 8.4 zeigt eine Zusammenstellung der Parameter mit fixen Einstellungen. Der Parameter ω bestimmt in Stufe (2a) der Funktion SEARCH⁸ die Größe der Kandidatenmenge M . Parameter γ wird für die Adjustierung der Häufigkeitsstrafe genutzt und kommt in Stufe (2b) zum Einsatz.⁹ Zur Modifikation des Shifting Penalty Gewichtungsparmeters α auf Stufe (2f) wird die Variable δ genutzt. Für die in Stufe (2c) zu aktualisierende Tabuliste wird die Tabudauer θ festgelegt als $\theta = \min\{\text{round}(0,3 \cdot n); \text{round}(\bar{\theta} \cdot \log_{10}(n))\}$ (vgl. Kapitel 5.2.8). Auf Stufe (1) und Stufe (2e) der Funktion SEARCH wird das lokale Iterationenlimit mittels μ festgesetzt. Anstelle eines Zeitlimits, wie es bei den Sensitivitätsanalysen verwendet wurde, um Aussagen bezüglich der Lösungsgüte verschiedener Parametereinstellungen treffen zu können, wird für „echte“ Optimierungsläufe ein globales Iterationenlimit η festgesetzt. Ein Iterationenlimit wurde gewählt, da mit zunehmender Pro-

⁷ Vgl. Kapitel 8.1.1.

⁸ Vgl. Kapitel 8.1.1.

⁹ Eine Beschreibung zur Anwendung der Häufigkeitsstrafe findet sich in Kapitel 5.1.6.

Tabelle 8.4: Fixe Parametereinstellungen

Parameter	genutzt für	Wert
ω	Kandidatenmenge	3
γ	Häufigkeitsstrafe	0,001
δ	Shifting Penalty	0,5
$\bar{\theta}$	Tabudauer ^a	6
μ	Max. Iterationen lokal	$5n$
η	Max. Iterationen global ^b	TTRP: 15000 MDTTRP, PTTRP: 30000

^a Tabudauer $\theta = \min\{\text{round}(0,3 \cdot n); \text{round}(\bar{\theta} \cdot \log_{10}(n))\}$, vgl. Kapitel 5.2.8.

^b Kein Zeitlimit.

blemgröße die Anzahl an Nachbarschaftsevaluierungen pro Iteration und damit auch die Zeitdauer einer Iteration ansteigt. Eine ausreichende Anzahl an Iterationen muss aber zum Auffinden einer guten Lösung unabhängig vom Problemtyp sichergestellt werden. Für TTRP-Probleme wurde $\eta = 15000$ und für MDTTRP- und PTTRP-Probleme $\eta = 30000$ als guter Kompromiss zwischen Lösungsqualität und Gesamtlaufzeit des Verfahrens ermittelt. Eine geringere Anzahl an Iterationen führte im Allgemeinen zu schlechteren Lösungen. Auf der anderen Seite brachte eine größere Iterationenzahl tendenziell keinen signifikanten Mehrwert. Für einen Einsatz der Verfahren in der Praxis, gilt es den Wert von η in Abhängigkeit von mehreren Faktoren, wie z.B. der verfügbaren Computerausstattung und v.a. der zur Verfügung stehenden Zeit, zu wählen.

Es gilt zu beachten, dass die angegebenen Werte lediglich als Vorschläge für eine mögliche Parametereinstellung zu betrachten sind. Bei Anwendung der Heuristiken auf andere Datensätze sollte immer eine kritische Hinterfragung der Einstellungen erfolgen. Wohingegen sich die fixen Parameter tendenziell als robust erwiesen, zeigten sich die Einstellungen für die variablen Parameter stärker problemspezifisch. Insbesondere sollte der Parameter h einer Analyse unterzogen werden, da zu kleine Werte die Suche auf einen Teilbereich des Lösungsraumes einschränken und zu große Werte die Rechenzeit gegebenenfalls „unnötig“ verlängern. Auch gilt es Interdependenzen zwischen

den einzelnen Parametereinstellungen zu berücksichtigen. Zum Beispiel muss in der Regel der Wert von $\bar{\theta}$ erhöht werden, falls kleinere Werte von ω gewählt werden und umgekehrt.

8.1.4 Kernelemente der neuen Tabusuche-Heuristiken

Die vorgestellten Tabusuche-Heuristiken vereinen eine Vielfalt an strategischen Möglichkeiten die mit Techniken der lokalen Suche umgesetzt werden können. Insbesondere sind dies die folgenden algorithmischen Komponenten:

- Erweiterung des Lösungsraumes auf temporär unzulässige Lösungen und Kontrolle durch einen Shifting Penalty Ansatz.¹⁰
- Anpassung der Nachbarschaftsdefinition mittels Intensivierungs- und Basisnachbarschaft an den Suchverlauf.
- Möglichkeit die Anbindung der Subtouren *jederzeit* im Verlauf der Suche zu ändern, auch wenn dies zu einer Verschlechterung der Zielfunktion führt.¹¹
- Option die Anzahl an Subtouren *jederzeit* im Verlauf der Suche zu variieren.¹²
- Verkleinerung der Nachbarschaft durch Zufallsauswahl einer Kandidatenmenge.
- Nachbarschaftsreduktion durch Einschränkung auf benachbarte Kunden.

¹⁰ Das TTRP-Verfahren von Chao [Cha02] erlaubt keinen Aufbau von Überkapazitäten.

¹¹ Die Neuansbindung der Subtouren wird beim Verfahren von Chao [Cha02] nur am Ende der Descent-Phase evaluiert und es werden ausschließlich verbessernde Anbindungen akzeptiert.

¹² Die in der Konstruktionsphase bestimmte Anzahl an Subtouren je Route wird im Tabusuche-Verfahren von Chao [Cha02] fix beibehalten, wodurch Teile des Lösungsraumes bereits unerreichbar sind.

- Diversifikation durch Zufallsauswahl einer Kandidatenmenge und durch Bestrafung häufig vorkommender Moves mit Hilfe eines Langzeitgedächtnisses.
- Intensivierung durch Neustart auf der bisher besten Lösung in Kombination mit einer temporären mehrstufigen Problemdekomposition und einer Optimierung¹³ der resultierenden Teilprobleme.

Um aus der Vielfalt an möglichen strategischen Maßnahmen eine effektive Kombination herauszuarbeiten, wurden bereits während der Entwicklung und in Vorstudien zu den Sensitivitätsanalysen verschiedene Strategiemassnahmen getestet und zum Teil aufgrund schlechter Ergebnisse verworfen, ohne sie in der Arbeit explizit aufzuführen. Beispielsweise wurden alternative Definitionen des Tabukriteriums und des Aspirationskriteriums, Kombinationen mehrerer Tabukriterien, an den Suchverlauf angepasste Einstellungen verschiedener Parameter, ein Root Refining ausschließlich zur Post-Optimierung, sowie Shift und Swap Moves mit $\nu_1, \nu_2 > 2$ evaluiert.

8.2 Evaluation anhand von Benchmarkproblemen

In den folgenden Abschnitten erfolgt eine Untersuchung der neuen Heuristiken hinsichtlich Qualität der ermittelten Lösungen, dem benötigten Rechenaufwand und der Robustheit des jeweiligen Verfahrens auf verschiedenen Testdatensätzen. Wird ein repräsentativer Durchlauf zugrunde gelegt¹⁴, so wird dabei insbesondere auf die folgenden Fragen -in Anlehnung an Barr et al. [Bar95, S. 14]- eingegangen:

¹³ Das Verfahren von Chao [Cha02] kombiniert einen Neustart mit einer lokalen Descent-Suche für das vollständige Problem. In der vorgestellten Heuristik wird jedoch das Tabusuche-Grundmodul zur Zwischen-Optimierung ausgewählter Teilprobleme eingesetzt. So ist z.B. eine gezielte Verbesserung der CVR-Routen möglich.

¹⁴ Da die neuen Verfahren eine Zufallskomponente beinhalten, werden für jeden Testdatensatz zehn vollständige Durchläufe ausgeführt und der Durchschnittswert zur Entscheidungsfindung herangezogen.

- Von welcher Qualität ist die beste gefundene Lösung?
- Wie lange dauert es, die beste Lösung zu bestimmen?
- Wie schnell findet die Heuristik gute Lösungen?
- Wie robust ist die Methode?
- Wie „weit“ entfernt ist die beste Lösung von einfacher aufzufindenden Lösungen?

Die neuen Heuristiken wurden in C++ unter Verwendung von Microsoft Visual C++ (Version 6.0) programmiert und alle Tests fanden auf einem Dell OptiPlex GX240 PC mit Intel Pentium IV Prozessor, 1,5 GHz Taktfrequenz und 128 MB Arbeitsspeicher unter dem Microsoft Windows 98 Betriebssystem statt. Bei den Berechnungen wurden die Werte auf zwei Stellen hinter dem Komma gerundet. Wie von Cordeau et al. [Cor02a] vorgeschlagen, wurden die erhaltenen Lösungen mit *double*-Präzision nachgerechnet und für die Ergebnis-Präsentation wieder auf zwei Stellen hinter dem Dezimalpunkt gerundet.

8.2.1 Ergebnisse für das TTRP

Die neue TTRP-Tabusuche wurde auf alle 21 aus der Literatur bekannten Testprobleme¹⁵ für das TTRP angewendet. Der Ablauf der Heuristik entspricht dabei den Schilderungen der Kapitel 5 und 8.1. Es wurden die in den Tunings ermittelten Einstellungen, wie sie in Kapitel 8.1.3 zusammengefasst sind, verwendet.

Für jedes der 21 Testprobleme werden in Tabelle 8.5 die Ergebnisse der neu entwickelten Heuristik den Ergebnissen von Chao [Cha02] gegenübergestellt. Die ersten fünf Hauptspalten referenzieren das neue Verfahren. Die erste Hauptspalte zeigt die Werte der initialen Startlösungen, ermittelt mit der T-Cluster Heuristik aus Kapitel 3.4. Alle Startlösungen sind bereits zulässig und alle VC-Kunden befinden sich konstruktionsbedingt auf einer Maintour.

¹⁵ Vgl. Kapitel 2.3.3.2.

Tabelle 8.5: Ergebnisse für die TTRP-Testdaten

ID	Startlösung		$\lambda = 1000$		$\lambda = 5000$		$\lambda = 10000$		$\lambda = 15000$		Chao TS	
	$c(s^*)$	T	$c(s^*)$	T	$c(s^*)$	T	$c(s^*)$	T	$c(s^*)$	T	$c(s^*)$	T
T1	651,87	0,01	582,62	0,62	570,60	2,83	568,58	6,17	567,98	9,51	565,02	4,19
T2	697,51	0,01	644,26	0,57	630,64	2,80	623,16	6,15	619,35	9,60	658,07	5,22
T3	766,25	0,01	669,11	0,73	640,13	3,30	634,19	7,26	629,59	11,24	648,74	6,50
T4	979,79	0,01	820,53	1,31	813,31	5,76	810,99	12,08	809,13	18,49	856,20	7,53
T5	1037,50	0,01	890,60	1,14	871,28	4,69	863,45	9,58	858,98	15,16	949,98	7,06
T6	1173,11	0,01	984,48	1,28	958,95	5,36	953,70	11,83	949,89	18,62	1053,23	7,96
T7	904,77	0,02	844,43	2,75	835,63	11,56	834,05	22,57	832,91	33,60	832,56	16,43
T8	965,90	0,02	892,35	2,05	884,92	8,35	883,10	16,98	881,26	25,66	900,54	11,11
T9	1081,21	0,02	970,08	2,68	960,46	9,67	958,88	20,24	955,95	30,47	971,62	10,18
T10	1167,38	0,03	1076,58	5,54	1060,80	20,97	1056,31	40,36	1052,65	60,94	1073,50	21,72
T11	1274,67	0,03	1138,13	5,66	1112,96	21,47	1108,24	37,84	1107,47	56,17	1170,17	17,10
T12	1438,11	0,03	1204,22	6,33	1189,41	22,58	1185,33	41,94	1184,58	63,71	1217,01	20,27
T13	1485,67	0,05	1332,94	16,80	1314,79	65,42	1299,90	115,52	1296,33	165,41	1364,50	42,34
T14	1611,99	0,04	1419,32	14,48	1395,01	53,09	1386,20	95,14	1384,13	132,06	1464,20	25,96
T15	1748,31	0,04	1540,85	16,98	1508,84	61,37	1494,06	109,25	1488,71	154,10	1540,25 ^a	24,62
T16	1055,23	0,03	1008,09	3,06	1003,39	14,62	1003,00	29,53	1003,00	43,14	1041,36	14,56
T17	1117,22	0,03	1050,89	2,53	1043,43	10,18	1043,17	21,33	1042,79	33,73	1090,46	13,74
T18	1216,24	0,03	1150,39	2,96	1143,20	10,15	1141,94	20,21	1141,94	31,78	1141,36	12,52
T19	874,04	0,01	819,49	1,99	814,72	8,86	814,37	18,64	813,98	28,84	854,02	16,13
T20	950,72	0,01	861,75	1,83	855,68	7,39	853,96	15,37	852,89	24,57	942,39	10,09
T21	1009,38	0,01	933,39	2,22	915,67	8,26	914,23	16,97	914,04	26,84	926,47	9,57
Avg	1105,09	0,02	992,12	4,45	977,32	17,08	972,90	32,14	970,84	47,32	1012,46	14,51
ARPD	15,22	-	3,44	-	1,90	-	1,43	-	1,22	-	5,56	-
Min	-	-	990,26	-	973,77	-	970,87	-	969,43	-	-	-
Max	-	-	994,48	-	981,44	-	976,96	-	974,15	-	-	-

^a Angegebene Lösung ist unzulässig.

Die zweite bis fünfte Hauptspalte gibt die Ergebnisse der neuen Tabusuche für ausgewählte Werte von λ wieder, um den Verlauf der Suche besser zu verdeutlichen. Für jede dieser Spalten werden die Kosten $c(s^*)$ der bei der zugehörigen Iterationenzahl vorliegenden besten Lösung s^* und die zugehörige Laufzeit T in Minuten angegeben. Wegen der verwendeten Zufallsauswahl der Kandidatenmenge wurde jeder Wert als Durchschnitt aus zehn Durchläufen ermittelt. Spalte sechs (Chao TS) enthält die Ergebnisse der Tabusuche-Heuristik von Chao [Cha02, S. 48]. Es wird für jedes Testproblem die Distanz $c(s^*)$ der besten von Chao ermittelten Lösung und die Rechenzeit T (in Minuten auf einem Pentium II 350 MHz)¹⁶ für das Verfahren von Chao mit $K = 50$ (vgl. Kapitel 4.2.12) angegeben. Es gilt anzumerken, dass die von Chao angegebene beste Lösung zu Testproblem T15 unzulässig ist, da sie eine CVR-Route mit ungültiger Struktur aufweist. In der letzten Spalte sind die Distanzen $c(s^{**})$ der besten bekannten Lösung für jedes Problem aufgeführt. In den untersten vier Zeilen sind der Durchschnitt über die aufgeführten Werte (Avg) und deren prozentuale Abweichung zum Durchschnitt der besten bekannten Lösungen (Average Relative Percentage Deviation, ARPD), sowie der Mittelwert über die 21 Minima (Min) und Maxima (Max) aus den zehn zugrunde liegenden Durchläufen angegeben.

Abbildung 8.1 verdeutlicht den tendenziellen Verlauf für die durchschnittlichen Distanzen der 21 Probleme. Die Trendlinie wird mit $Avg\ c(s^*)$ bezeichnet und mit einer durchgezogenen Linie dargestellt. Zusätzlich sind der Durchschnitt der besten bekannten Lösungen ($Avg\ c(s^{**})$) und der besten Lösungen von Chao ($Avg\ c(s^*)\ Chao$) als gestrichelte Linien angegeben.

Wie aus Tabelle 8.5 und Abbildung 8.1 ersichtlich, liefert die neue Tabusuche bessere Ergebnisse als die Methode von Chao. Zum Beispiel ist der ARPD-Wert für die neue Tabusuche bei $\lambda = 15000$ nur 1,22 im Vergleich zu einem Wert von 5,56 für die besten Ergebnisse über alle Kombinationen der Heuristik von Chao. Werden für die neue Heuristik die angegebenen Durchschnittswerte zugrunde gelegt, so konnten bereits in den ersten 1000 Iterationen bessere Lösungen für 15 der 21 Probleme gefunden werden. Bei

¹⁶ Unklar bleibt, ob sich die Angabe der Zeiten in Chao [Cha02] auf die kumulative Laufzeit für zehn Durchläufe oder aber nur auf einen Durchlauf bezieht.

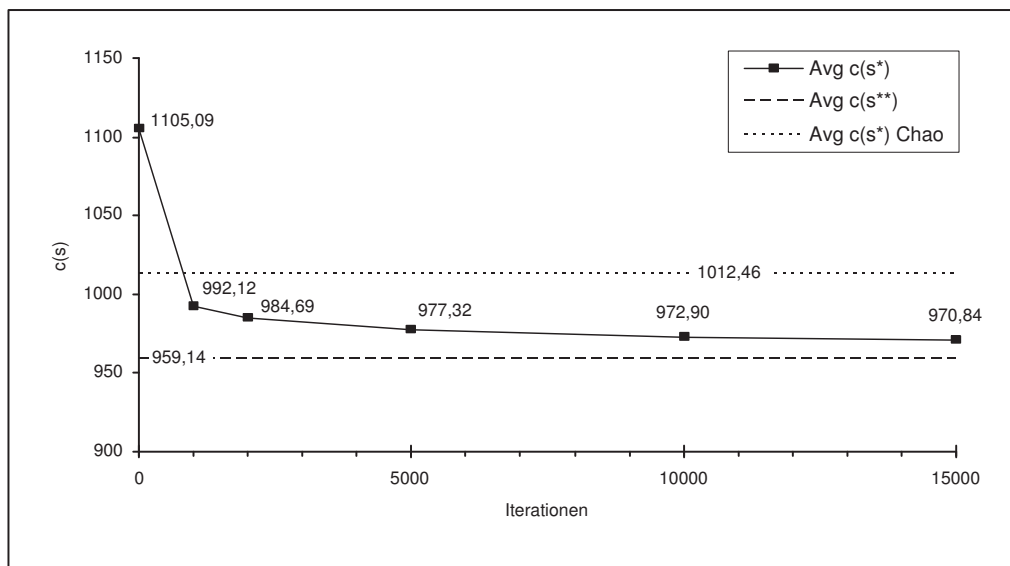


Abbildung 8.1: Tendenzieller Optimierungsverlauf bei TTRP-Problemen

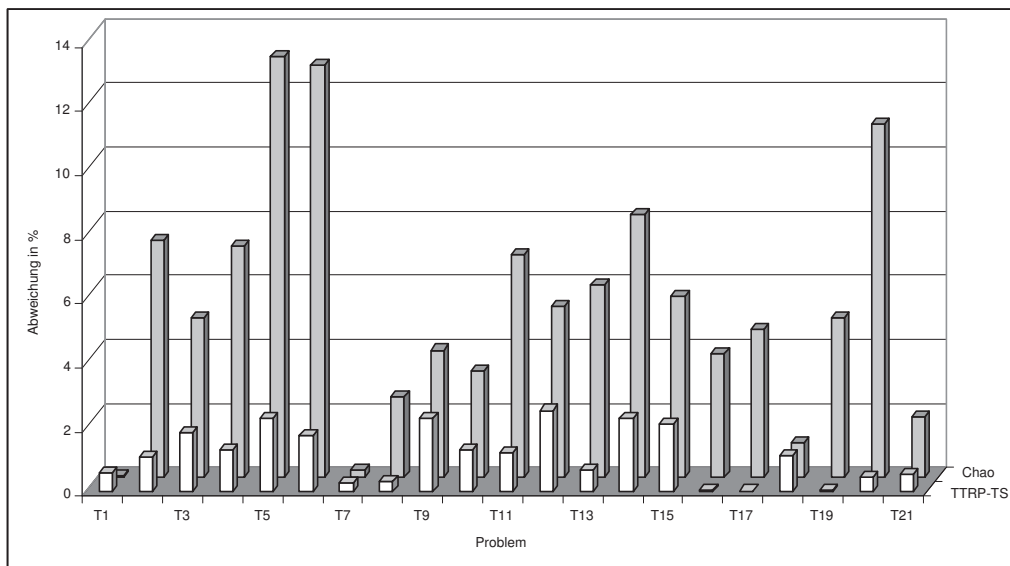


Abbildung 8.2: Prozentuale Abweichung vom besten bekannten Zielfunktionswert

$\lambda = 15000$ sind lediglich drei der 21 Lösungen minimal schlechter als die besten Ergebnisse von Chao, der Großteil von 18 Lösungen jedoch zumeist deutlich besser. Dies wird in Tabelle 8.2 nochmals anhand der prozentualen Abweichungen zur besten bekannten Lösung für jedes der 21 Testprobleme verdeutlicht. Die Abweichungen der Ergebnisse der neuen Heuristik für

$\lambda = 15000$ werden in der vorderen Balkenreihe, die Abweichungen für die besten von Chao ermittelten Werte in der hinteren Balkenreihe dargestellt. Das neue Verfahren scheint daher dem Verfahren von Chao hinsichtlich der erreichten Lösungsqualität überlegen. Diese Aussage gilt ebenfalls für die Robustheit des neuen Verfahrens. Wie aus Abbildung 8.2 für $\lambda = 15000$ ersichtlich, beträgt die maximale Abweichung über alle 21 Testprobleme weniger als 2,5 %.

Ein direkter Vergleich der Laufzeiten ist aufgrund unterschiedlicher Computer nicht möglich. Es scheint jedoch, dass die neue Heuristik mehr Rechenzeit als die Heuristik von Chao benötigt. Hierbei gilt es jedoch anzumerken, dass die neue Tabusuche in einem Programmpaket implementiert wurde, das eine Berücksichtigung weiterer Restriktionen ermöglicht, wie z.B. mehrere Depots, einen mehrtägigen Planungshorizont, zusätzliche Kostenbestandteile in der Zielfunktion und Fahrzeugstandorte auch außerhalb des Depots. Es wird angenommen, dass eine allein stehende Implementierung des Lösungsansatzes zu deutlich geringeren Rechenzeiten führen würde.

Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse und der hier präsentierten Vergleichsstudie war es darüber hinaus möglich, neue beste Lösungen zu allen 21 Testproblemen zu finden. Die Kosten der neuen besten Lösungen sind in der letzten Spalte von Tabelle 8.5 wiedergegeben. Die zugehörigen Tourenpläne sind in Anhang A aufgeführt.

8.2.2 Ergebnisse für das MDTTRP

Die in Kapitel 6 und 8.1 vorgestellte neue MDTTRP-Tabusuche-Heuristik wurde mit den in den Tunings ermittelten Einstellungen, wie sie in Kapitel 8.1.3 zusammengefasst sind, auf die 30 neuen MDTTRP-Benchmarkprobleme angewendet. Eine Beschreibung der Probleme findet sich in Kapitel 2.4.2.2. Da die Testdatensätze MDT1 bis MDT3 und MDT19 bis MDT21 jeweils nur ein Fahrzeug pro Depot enthalten, wurde für diese Probleme auf eine Intra-Depot Optimierung¹⁷ verzichtet, da sie einer CVR-Optimierung¹⁸ entspricht.

¹⁷ Vgl. Stufe (II-c) der Steuerfunktion in Kapitel 8.1.2.

¹⁸ Vgl. Stufe (II-d) der Steuerfunktion in Kapitel 8.1.2.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 8.6 zusammengefasst. Für jede Hauptspalte werden zu einer ausgewählten Iterationenzahl die Distanz $c(s^*)$ der durchschnittlich¹⁹ besten Lösung s^* und die zugehörige durchschnittliche Laufzeit T in Minuten aufgeführt. In der ersten Hauptspalte werden die zugehörigen Startlösungen dargestellt. Diese Lösungen sind zum Teil unzulässig und es wird daher auch der Wert für die Gesamtüberkapazität $q(s^*)$ angegeben. Bereits nach wenigen Iterationen der Tabusuche konnte stets eine zulässige Lösung zu allen Problemen gefunden werden. Es wird daher auf die Angabe von $q(s^*) = 0$ für Spalten mit $\lambda > 0$ verzichtet. Die letzte Spalte enthält die Gesamtdistanz $c(s^{**})$ der besten bekannten Lösung s^{**} des jeweiligen Problems, wie sie von der neuen Heuristik gefunden wurde. Die Tourenpläne der besten bekannten Lösungen sind in Anhang B angegeben.

Abbildung 8.3 verdeutlicht den tendenziellen Verlauf für die durchschnittlichen Distanzen der 30 Probleme. Die Trendlinie wird mit $Avg\ c(s^*)$ bezeichnet und mit einer durchgezogenen Linie dargestellt. Zusätzlich ist der Durchschnitt der besten bekannten Lösungen $Avg\ c(s^{**})$ als gestrichelte Linie angegeben.

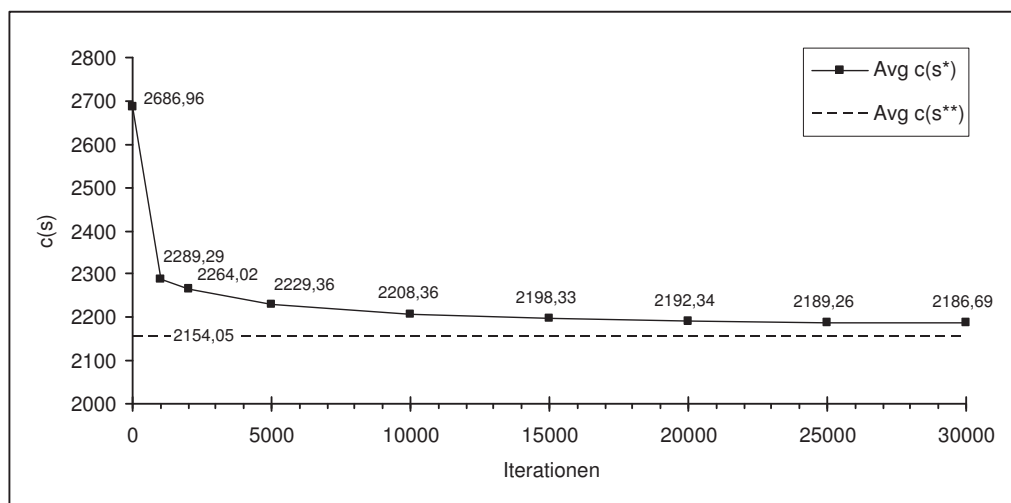


Abbildung 8.3: Tendenzieller Optimierungsverlauf bei MDTTRP-Problemen

¹⁹ Jeder Wert bezeichnet den Durchschnitt aus zehn Durchläufen.

Tabelle 8.6: Ergebnisse für die MDTTRP-Testdaten

ID	Startlösung				$\lambda = 1000$		$\lambda = 10000$		$\lambda = 20000$		$\lambda = 30000$		$c(s^{**})$
	$c(s^*)$	$q(s^*)$	T	$c(s^*)$	T	$c(s^*)$	T	$c(s^*)$	T	$c(s^*)$	T		
MDT1	998,17	0,00	0,01	935,57	0,28	929,48	3,14	927,84	6,44	927,84	9,74	923,97	
MDT2	1128,32	0,00	0,01	1007,38	0,34	982,32	3,75	982,28	7,84	982,28	11,97	981,15	
MDT3	1198,64	0,00	0,01	994,81	0,44	985,05	4,23	982,74	8,70	981,65	13,09	981,64	
MDT4	1672,85	7,00	0,02	1455,09	0,94	1421,01	7,04	1406,66	15,97	1402,25	25,76	1377,84	
MDT5	1835,14	7,00	0,01	1536,08	1,09	1491,43	7,25	1469,68	15,96	1464,68	25,67	1457,64	
MDT6	2044,53	7,00	0,01	1672,36	1,32	1556,20	9,16	1548,21	18,79	1548,21	30,09	1527,90	
MDT7	2201,99	0,00	0,03	1959,96	2,23	1908,93	13,87	1899,81	30,30	1894,40	45,77	1883,06	
MDT8	2479,39	0,00	0,03	2190,45	2,25	2121,51	14,22	2105,03	29,59	2090,86	48,17	2057,09	
MDT9	2745,17	0,00	0,02	2357,77	2,94	2277,63	18,05	2262,59	33,22	2256,42	55,02	2203,03	
MDT10	2659,03	13,00	0,04	2288,95	4,17	2241,91	25,95	2231,24	49,65	2226,67	76,06	2201,36	
MDT11	2967,78	13,00	0,04	2557,24	4,42	2418,89	28,52	2396,09	51,70	2392,74	78,86	2367,74	
MDT12	3325,92	13,00	0,04	2743,59	5,39	2652,21	29,51	2630,75	56,16	2620,22	83,96	2566,78	
MDT13	3156,97	90,00	0,05	2625,86	6,98	2534,57	48,35	2518,05	84,09	2511,06	122,39	2476,33	
MDT14	3542,49	90,00	0,05	2866,59	7,86	2723,55	51,97	2692,09	88,15	2686,90	122,82	2639,06	
MDT15	4044,85	113,00	0,05	3256,58	9,87	3123,92	55,79	3076,48	103,52	3069,91	148,23	2971,52	
MDT16	3340,80	44,00	0,07	2988,71	11,56	2898,28	84,47	2890,75	142,86	2889,12	198,32	2845,53	
MDT17	3728,76	44,00	0,07	3339,80	11,97	3170,66	86,58	3147,43	144,50	3140,63	198,50	3086,32	
MDT18	4342,86	44,00	0,07	3639,34	15,23	3540,69	86,52	3517,08	157,50	3508,90	225,24	3442,90	
MDT19	1309,95	0,00	0,01	1192,51	0,51	1168,60	4,98	1153,00	10,24	1151,75	15,56	1141,83	
MDT20	1483,92	0,00	0,01	1223,82	0,56	1189,76	5,97	1187,62	12,15	1183,01	18,46	1180,69	
MDT21	1533,19	0,00	0,01	1260,49	0,62	1237,92	5,75	1237,18	12,05	1225,56	18,15	1198,38	
MDT22	2050,95	12,00	0,03	1827,49	2,08	1795,37	12,04	1792,25	24,99	1790,68	42,31	1770,77	
MDT23	2287,38	12,00	0,03	2018,68	2,26	1919,45	12,65	1905,32	25,13	1899,12	44,48	1874,81	
MDT24	2627,51	12,00	0,03	2186,87	2,44	2107,79	13,54	2086,33	26,52	2078,72	47,99	2059,76	
MDT25	2676,17	38,00	0,05	2375,20	5,04	2328,98	31,01	2322,82	55,62	2320,56	83,65	2295,43	
MDT26	3010,64	38,00	0,05	2533,58	5,94	2460,43	35,50	2454,64	61,44	2448,82	96,80	2427,13	
MDT27	3432,28	38,00	0,05	2723,06	7,49	2656,48	40,85	2640,18	72,31	2637,58	119,07	2592,70	
MDT28	3754,42	87,00	0,07	3243,70	11,17	3124,65	74,71	3112,40	122,44	3106,08	168,26	3072,30	
MDT29	4227,69	87,00	0,07	3598,65	11,70	3396,11	87,21	3374,25	137,44	3367,60	183,79	3316,32	
MDT30	4801,14	137,00	0,08	4078,59	14,50	3887,12	98,60	3819,43	155,94	3796,50	210,91	3700,55	
Avg	2686,96	31,53	0,04	2289,29	5,12	2208,36	33,37	2192,34	58,71	2186,69	85,64	2154,05	
ARPD	24,74	-	-	6,28	-	2,52	-	1,78	-	1,52	-	0,00	
Min	-	-	-	2248,92	-	2177,12	-	2166,33	-	2162,58	-	-	
Max	-	-	-	2339,21	-	2244,18	-	2221,66	-	2213,76	-	-	

Da derzeit kein alternatives Verfahren zur Lösung von MDTTRP-Problemen existiert, kann kein Vergleich durchgeführt werden. Es wird jedoch angenommen, dass die Ergebnisse einem Vergleich jederzeit standhalten können. Diese Aussage gründet auf den guten Ergebnissen²⁰ der der MDTTRP-Heuristik zugrunde liegenden neuen TTRP-Heuristik und auf Ergebnissen, die mit diesem Verfahren für MDVRP-Probleme erzielt wurden. Zur Lösung von MDVRP-Problemen wurden alle Kunden als VC-Kunden betrachtet. Da neue Subtouren in der Konstruktions- und der Tabusuche-Heuristik²¹ nur bei Vorhandensein eines TC-Kunden angelegt werden, sind stets keine Subtouren vorhanden. Es können daher sowohl die Routentypen PTR als auch CVR angenommen werden, d.h. Fahrzeuge mit oder ohne Anhänger. Eine CVR enthält dann genau eine Maintour und es entfällt das Abkoppeln des Anhängers. Die MDTTRP-Tabusuche wurde dabei ohne Modifikationen und insbesondere ohne weitere Hinterfragung der MDTTRP-Parametereinstellungen²² ausgeführt. Es zeigte sich, dass die MDTTRP-Heuristik bei Anwendung auf die 23 aus der Literatur bekannten klassischen MDVRP-Testprobleme²³ bezüglich den erreichten Ergebnissen mit den besten MDVRP-Verfahren konkurrieren kann, nicht jedoch in Bezug auf die benötigten Rechenzeiten. Da das Verfahren in einem umfangreichen Programmpaket eingebettet ist, würde eine reine Implementierung des neuen MDTTRP-Verfahrens sicherlich zu deutlich geringeren Rechenzeiten führen. Diese Aussage gilt analog für eine Anwendung auf VRP-, MDVRP- oder PVRP-Probleme, wo ausschließlich für den entsprechenden Problemtyp entwickelte Heuristiken im Vergleich zu komplexeren Verfahren, die den Problemtyp als Subproblem einschließen, immer in Bezug auf die Laufzeit dominieren.

Die neue MDTTRP-Heuristik konnte dabei sechs neue beste Lösungen zu den 23 klassischen MDVRP-Problemen finden. Die Tourenpläne sind in Anhang D wiedergegeben. Dies unterstreicht die oben getroffene Aussage bezüglich der Qualität des neuen MDTTRP-Verfahrens insbesondere, da die Heuristik -da nicht Ziel und Zweck dieser Arbeit- weder speziell für MDVRP-Probleme entwickelt, noch explizit dafür optimiert wurde.

²⁰ Vgl. Kapitel 8.2.1.

²¹ Zur Konstruktion einer Startlösung wurde die T-Sweep Heuristik aus Kapitel 3.5 anstelle der T-Cluster Heuristik verwendet, da sie für VRP-Probleme bessere Ergebnisse liefert.

²² Vgl. Kapitel 8.1.3.

²³ Vgl. Kapitel 2.3.2.2.

8.2.3 Ergebnisse für das PTTRP

Tabelle 8.7 zeigt die Ergebnisse der neuen PTTRP-Tabusuche-Heuristik²⁴ bei Anwendung auf die 30 neuen PTTRP-Benchmarkprobleme²⁵. Jeder Wert bezeichnet den Durchschnitt aus zehn Durchläufen mit den in Kapitel 8.1.3 angegebenen Parametereinstellungen. Es sind die Distanzen $c(s^*)$ der durchschnittlichen besten Lösung s^* und die zugehörige durchschnittliche Laufzeit T in Minuten für ausgewählte Werte von λ aufgeführt. In der ersten Hauptspalte werden die Werte der Startlösungen dargestellt und in der äußerst rechten Spalte die Gesamtdistanzen $c(s^{**})$ der besten bekannten Lösung. Die Tourenpläne der besten bekannten Lösungen, wie sie von der neuen Heuristik gefunden wurden, sind in Anhang C angegeben. Auf die Angabe von $q(s^*)$ wird außer bei den Startlösungen verzichtet, da $q(s^*)$ sonst stets null ist.

Abbildung 8.4 verdeutlicht den tendenziellen Verlauf für die durchschnittlichen Distanzen der 30 Probleme. Die Trendlinie wird mit $Avg\ c(s^*)$ bezeichnet und mit einer durchgezogenen Linie dargestellt. Zusätzlich ist der Durchschnitt der besten bekannten Lösungen $Avg\ c(s^{**})$ als gestrichelte Linie angegeben.

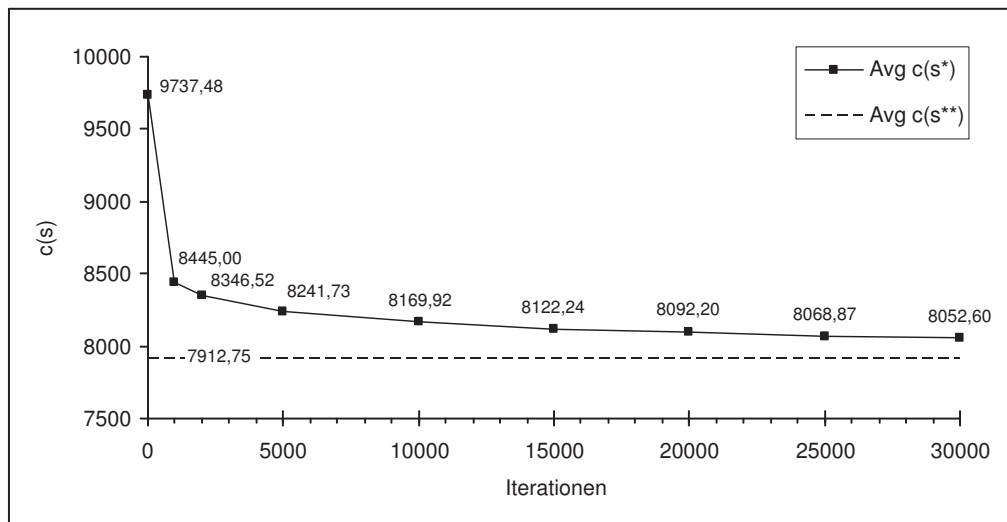


Abbildung 8.4: Tendenzieller Optimierungsverlauf bei PTTRP-Problemen

²⁴ Vgl. Kapitel 7 und 8.1.

²⁵ Vgl. Kapitel 2.4.1.2.

Tabelle 8.7: Ergebnisse für die PTTRP-Testdaten

ID	Startlösung			$\lambda = 1000$			$\lambda = 10000$			$\lambda = 20000$			$\lambda = 30000$		
	$c(s^*)$	$q(s^*)$	T	$c(s^*)$	T		$c(s^*)$	T		$c(s^*)$	T		$c(s^*)$	T	$c(s^{**})$
PT1	2701,68	5,70	0,01	2428,74	0,67		2358,02	4,82		2351,35	10,91		2347,63	17,45	2318,52
PT2	3047,25	0,00	0,01	2676,13	0,71		2514,41	5,95		2503,96	13,56		2493,05	22,00	2449,89
PT3	3386,81	0,00	0,01	2801,57	0,91		2534,00	6,91		2507,14	14,19		2505,53	23,64	2466,29
PT4	4667,55	5,50	0,03	4128,20	3,14		4072,61	17,73		4051,52	34,78		4039,40	56,43	3965,31
PT5	5013,13	0,00	0,03	4387,35	3,03		4310,07	16,71		4297,12	32,25		4284,94	47,97	4235,50
PT6	5856,91	0,00	0,03	5066,63	3,22		4885,38	19,59		4841,19	36,78		4806,34	55,38	4672,81
PT7	6826,06	0,00	0,05	5828,90	5,98		5700,63	35,68		5662,61	62,60		5636,08	88,96	5531,59
PT8	7786,51	0,00	0,05	6507,44	6,87		6269,27	41,35		6199,76	70,21		6173,88	101,17	6069,17
PT9	8623,87	0,00	0,05	7298,27	7,81		7053,22	45,60		6970,19	86,34		6920,54	125,71	6698,13
PT10	7580,74	0,00	0,08	6658,63	12,74		6505,48	83,93		6472,75	144,85		6462,05	202,37	6390,20
PT11	8515,52	6,90	0,08	7343,51	14,25		7143,80	88,07		7103,47	148,35		7081,26	206,17	7008,38
PT12	9909,81	0,00	0,08	8239,87	15,92		7923,03	110,83		7861,89	178,98		7839,01	244,96	7677,40
PT13	9003,39	144,30	0,10	7629,96	25,58		7412,25	189,94		7359,99	311,25		7342,73	417,59	7240,44
PT14	10111,52	136,10	0,11	8428,53	28,24		8086,62	182,21		7986,29	324,26		7945,92	440,69	7798,14
PT15	11240,17	138,70	0,12	9588,57	32,73		9148,13	252,91		8998,26	448,81		8921,23	570,98	8767,83
PT16	10164,78	4,30	0,15	8960,28	36,93		8729,76	301,96		8675,52	481,54		8641,56	663,79	8556,06
PT17	11092,81	0,00	0,16	9790,72	43,47		9518,64	318,16		9457,16	470,88		9416,73	650,63	9248,18
PT18	12768,12	0,00	0,17	11162,92	43,79		10848,37	330,57		10742,86	515,34		10674,34	727,46	10509,01
PT19	6227,27	0,00	0,03	5548,26	3,71		5475,48	16,51		5444,26	28,83		5411,88	44,48	5294,05
PT20	6959,69	0,00	0,03	6026,10	3,44		5852,59	16,17		5816,23	29,60		5774,51	43,78	5696,58
PT21	7540,44	0,00	0,03	6298,30	3,59		6056,31	18,63		6016,95	33,13		5990,58	47,32	5899,64
PT22	9287,11	22,60	0,08	8121,84	13,93		7906,88	74,16		7871,14	121,50		7848,47	165,58	7740,43
PT23	10635,00	26,40	0,09	9122,29	16,59		8838,51	84,67		8773,23	123,34		8746,92	132,01	8668,57
PT24	12301,41	12,00	0,09	10612,88	20,21		10158,73	118,78		10029,59	184,94		9963,16	247,85	9758,97
PT25	12844,64	0,00	0,16	11618,85	45,34		11362,40	252,38		11296,56	405,24		11263,58	564,27	11126,72
PT26	13992,54	0,00	0,17	12586,72	46,98		12216,68	323,90		12117,47	464,08		12075,71	590,98	11914,08
PT27	15976,15	0,00	0,19	14091,04	51,69		13737,72	282,86		13597,10	430,16		13532,93	611,01	13317,92
PT28	16969,11	157,90	0,25	14792,15	91,87		14361,30	531,86		14213,81	811,30		14166,61	1087,28	13937,62
PT29	19108,25	163,60	0,28	16433,89	111,64		15854,47	690,67		15640,91	1056,13		15529,79	1300,69	15287,31
PT30	21986,02	209,10	0,30	19171,44	114,47		18262,83	777,08		17905,75	1158,06		17741,60	1680,06	17136,75
Avg	9737,48	34,44	0,10	8445,00	26,98		8169,92	174,69		8092,20	274,41		8052,60	372,62	7912,75
ARPD	23,06	-	-	6,73	-		3,25	-		2,27	-		1,77	-	0,00
Min	9429,08	-	-	8293,67	-		8051,11	-		7986,68	-		7948,35	-	-
Max	10072,30	-	-	8607,96	-		8286,83	-		8196,13	-		8159,39	-	-

Wie auch bei den MDTTRP-Testdaten existiert derzeit kein alternatives Verfahren zur Lösung von PTTRP-Problemen. Daher muss auch hier ein direkter Verfahrensvergleich entfallen. Analog zur Anwendung auf MDVRP-Probleme wurde das Verfahren auf die 32 aus der Literatur bekannten klassischen PVRP-Probleme²⁶ angewendet. Hierbei wurden alle Kunden als VC-Kunden betrachtet. Ohne weitere Modifikationen der Tabusuche²⁷ und mit den gegebenen Parametereinstellungen konnten auch für die PVRP-Probleme gute Ergebnisse erzielt werden, allerdings mit -im Vergleich zu speziell für diese Problemstellung konzipierten Verfahren- hohen Rechenzeiten. Ohne dass die Heuristik speziell für diese Problemstellung entwickelt und optimiert worden ist, wurden bei diesen Testläufen vier neue beste Lösungen zu den 32 bekannten klassischen PVRP-Problemen gefunden. Die zugehörigen Tourenpläne sind in Anhang E wiedergegeben.

Die erhaltenen PVRP-Lösungen und die guten Ergebnisse der dem PTTRP-Verfahren zugrunde liegenden TTRP-Heuristik erlauben auch hier die Annahme, dass das Verfahren einem Vergleich standhalten kann.

²⁶ Vgl. Kapitel 2.3.1.2.

²⁷ Zur Konstruktion einer Startlösung wurde die T-Sweep Heuristik aus Kapitel 3.5 anstelle der T-Cluster Heuristik verwendet.

Kapitel 9

Zusammenfassung

Primäres Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung neuer heuristischer Lösungsverfahren für die logistische Tourenplanung bei restringierendem Anhänger-einsatz (Truck and Trailer Routing Problem, TTRP). Kennzeichnend für dieses kombinatorische Optimierungsproblem ist, dass Fahrzeuge einen Anhänger mitführen, jedoch ein Teil der Kunden nur ohne Anhänger angefahren werden kann. Dies erfordert insbesondere das An- und Abkoppeln von Anhängern im Verlauf einer Fahrzeugroute. Dadurch stellt sich bei der Tourenplanung zugleich die Frage nach den optimalen Anhängerstellplätzen, nach der Anzahl an An- und Abkoppelvorgängen sowie nach der optimalen Bedienreihenfolge für die Kunden unterschiedlichen Typs auf einer Fahrzeugroute. Dieser speziellen Variante eines kombinierten Standort- und Tourenplanungsproblems kam trotz ihrer großen Praxisrelevanz bisher nur wenig Aufmerksamkeit zu.

Erstmals wurden im Rahmen dieser Arbeit auch zwei Erweiterungen des Tourenplanungsproblems bei restringierendem Anhängereinsatz betrachtet. Dies ist zum einen eine Erweiterung des Problems um mehrere Fahrzeug-Depots (Mehrdepot-Tourenplanung bei restringierendem Anhängereinsatz, MDTTRP), zum anderen die Betrachtung eines mehrtägigen Planungshorizonts (periodische Tourenplanung bei restringierendem Anhängereinsatz, PTTRP). Bei letzterem ist jedem Kunden eine Menge an gewünschten Bedienmustern zugeteilt, die jeweils bestimmen, an welchen Tagen des Planungshorizonts die Bedienung des Kunden zu erfolgen hat. Diese beiden Er-

weiterungen fügen dem zugrunde liegenden Tourenplanungsproblem bei restringierendem Anhängerereinsatz eine zusätzliche Entscheidungsstufe hinzu, indem es zusätzlich eine optimale Zuordnung der Kunden zu den Depots bzw. ein optimales Bedienmuster für jeden Kunden zu bestimmen gilt. Die Interdependenz der Problemrestriktionen erschwert dabei das Auffinden einer guten bzw. optimalen zulässigen Lösung und macht einen Einsatz von heuristischen Lösungstechniken notwendig.

Um die neuen Problemstellungen einordnen zu können, wurden die gängigsten Varianten von logistischen Tourenplanungsproblemen dargestellt. Fokussiert betrachtet wurden die zugrunde liegende periodische und Mehrdepot-Tourenplanung und die Tourenplanung bei restringierendem Anhängerereinsatz. Für jedes dieser Problemtypen wurden eine präzise Problembeschreibung sowie ein Überblick zu existierenden Benchmarkproblemen und heuristischen Lösungsansätzen präsentiert. Des Weiteren erfolgte eine Vorstellung neuer mathematischer Formulierungen für das TTRP und das PTTRP, wobei letztere auch die Abbildung der MDTTRP-Problemstellung ermöglicht. Für die in dieser Arbeit entwickelten Lösungsverfahren wurde die Metaheuristik Tabusuche genutzt, da sie derzeit die beste Optimierungsmethode für komplexe Tourenplanungsprobleme ist. Um das notwendige theoretische Hintergrundwissen bereitzustellen, erfolgte eine Einführung in die Grundlagen dieser Methode und eine Beschreibung der bekanntesten Tabusuche-Verfahren für Tourenplanungsprobleme. Des Weiteren wurden die bekanntesten Konstruktionsverfahren für Tourenplanungsprobleme vorgestellt, da sie in den meisten Tabusuche-Heuristiken zum Erzeugen einer guten initialen Lösung genutzt werden.

Zur Lösung des TTRP wurden im Rahmen dieser Arbeit zwei Konstruktionsheuristiken, bezeichnet als T-Cluster und T-Sweep sowie eine Tabusuche-Heuristik entwickelt. Von den neuen Konstruktionsheuristiken konnte insbesondere die T-Cluster Heuristik gute Lösungen für die bekannten Benchmarkprobleme ermitteln. Ein Vergleich mit existierenden Heuristiken verdeutlicht die Qualität dieser Heuristik. Auch die Tabusuche-Heuristik scheint den für diesen Problemtyp existierenden Algorithmen überlegen zu sein. Die neu entwickelte Tabusuche-Heuristik kombiniert neue und bewährte Designelemente und setzt gezielt Intensivierungs- und Diversifikationsstrategien zur effizien-

enten und effektiven Untersuchung des Lösungsraumes ein. Mit der neuen Tabusuche-Heuristik konnten neue beste Lösungen zu allen 21 aus der Literatur bekannten Testproblemen gefunden werden.

Für das PTTRP und MDTRP wurde ebenfalls jeweils ein Tabusuche-Verfahren vorgestellt. Da beide Probleme erstmalig behandelt wurden, erfolgte eine Definition neuer Benchmarkprobleme. Die für die neuen Testdaten erhaltenen Lösungen dienen somit als Zielvorgabe für kommende Entwicklungen. Die Qualität beider Verfahren konnte jedoch bereits durch Übertrag auf verwandte Problemstellungen festgestellt werden. So konnte das Mehrdepot-Verfahren sechs neue beste Lösungen und das periodische Verfahren vier neue beste Lösungen zu bekannten Testdatensätzen der zugrunde liegenden, bereits eingehend behandelten Tourenplanungsprobleme ohne Anhänger finden, obwohl dies nicht das primäre Anwendungsgebiet dieser Heuristiken ist.

Die gute Qualität der mit den neuen Heuristiken ermittelten Ergebnisse lässt für einen Übertrag der vorgestellten Verfahren auf ähnliche Problemstellungen ebenfalls gute Ergebnisse erwarten.

Anhang A

Lösungen für das TTRP

Nachfolgende Tabellen zeigen die Tourenpläne der besten bekannten Lösungen für die 21 in Kapitel 2.3.3.2 beschriebenen TTRP-Probleme T1-T21. Die Spalten enthalten die folgenden Informationen: die Nummer der Route (ID), den Fahrzeugtyp (FT), wobei Typ 1 ein Fahrzeug ohne Anhänger und Typ 2 ein Fahrzeug mit Anhänger kennzeichnet, sowie den Typ (TT), die Ladung (L), die Distanz und die Kundenreihenfolge der zugehörigen Tour. Um TC-Kunden explizit auszuweisen, werden sie in den nachfolgenden Tabellen mit Fettdruck wiedergegeben. Der erste und letzte Kunde einer Tour bezeichnet den Root dieser Tour.

T1: Gesamtdistanz 564,68

ID	FT	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	95	36,89	51- 12 - 47 -18-51
2	1	MT	97	71,36	51- 46 -11- 9 - 50 - 16 -2- 1 -51
3	2	MT	193	132,98	51-38-49-30-34-21-29-20-35-36-3-28-22-32-51
4	2	MT	99	97,07	51-44-15-45-33-39-10-5-51
		ST	100	86,02	44- 37 - 17 -4-13- 41 -40- 19 -42-44
5	2	MT	174	128,19	51-27-48-8-31-26-23-43-24-25-14-6-51
		ST	19	12,17	23- 7 -23

T2: Gesamtdistanz 612,75

ID	FT	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	99	48,27	51- 46 - 11 -5- 12 - 47 -51
2	1	MT	100	100,06	51- 37 - 15 -45-33-39-10- 49 - 9 -51
3	2	MT	79	77,31	51-2-20-29-38-51
		ST	39	33,05	20-3- 36 - 35 -20
		ST	78	48,05	29-21- 34 -30- 50 - 16 -29
4	2	MT	50	39,59	51-4-18-51
		ST	98	82,18	4- 17 - 44 -42- 19 -40- 41 -13-4
		ST	49	27,88	18- 14 - 25 -18
5	2	MT	15	16,00	51-27-51
		ST	82	69,07	27-8-26- 31 - 28 -22- 1 - 32 -27
		ST	88	71,30	27-48- 23 - 7 -43-24-6-27

T3: Gesamtdistanz 618,04

ID	FT	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	96	47,46	51- 32 - 11 - 38 -5- 12 -51
2	1	MT	97	96,48	51- 17 - 37 - 15 - 45 - 33 -39-10- 49 - 46 -51
3	2	MT	30	42,05	51-2-51
		ST	67	52,58	2- 20 - 35 - 36 -3-2
		ST	95	60,37	2- 16 - 50 - 9 - 30 - 34 - 21 - 29 -2
4	2	MT	41	29,53	51-18-51
		ST	97	84,80	18- 47 - 44 -42- 19 -40- 41 -18
		ST	60	46,98	18- 4 -13- 25 -18
5	2	MT	30	28,46	51-6-27-51
		ST	87	66,59	27-48-8- 26 - 31 - 28 - 22 - 1 -27
		ST	77	62,74	6- 14 -24-43- 7 - 23 -6

T4: Gesamtdistanz 798,53

ID	FT	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	99	26,23	76-67- 34 -4- 75 -76
2	1	MT	79	52,30	76-51-16- 3 - 44 -17-76
3	1	MT	94	46,36	76- 68 - 45 - 27 - 52 - 46 -76
4	1	MT	100	82,27	76-8-54-13- 57 - 15 -5- 29 -76
5	2	MT	134	94,16	76-74-21-61-69-36-47-48-30-76
		ST	63	36,54	36-71- 60 -70-20-37-36
6	2	MT	198	109,78	76-40-32-50-18-24-49-56-23-63-33-76
7	2	MT	200	105,30	76-35-19-14-59-66-65-11-53-7-76
8	2	MT	116	65,53	76-6-73-1-62-28-2-76
		ST	84	47,87	1-22-64- 42 - 41 - 43 -1
9	2	MT	106	65,23	76-12-72-10-38-58-26-76
		ST	91	66,97	72- 39 - 9 -25-55-31-72

T5: Gesamtdistanz 839,62

ID	FT	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	94	65,99	76- 27-57-15-5-29-45 -76
2	1	MT	99	68,67	76- 4-13-54-8-35-7 -76
3	1	MT	95	30,86	76- 67-46-52-34 -76
4	1	MT	100	50,66	76- 6-33-73-62-68-75 -76
5	2	MT	134	94,16	76-74-21-61-69-36-47-48-30-76
		ST	63	36,54	36- 71-60-70 -20-37-36
6	2	MT	188	133,90	76-51-16-49-24-18-50-25-55-31-10-26-76
7	2	MT	129	88,74	76-53-11-59-14-19-76
		ST	70	27,62	11-66- 65-38 -11
8	2	MT	110	94,83	76-2-28-22-56-23-63-76
		ST	90	47,87	22-64- 42-41-43-1 -22
9	2	MT	20	16,12	76-17-76
		ST	89	35,39	17- 3-44-32-40 -17
		ST	83	48,25	17- 12-58-72-39-9 -17

T6: Gesamtdistanz 933,26

ID	FT	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	99	26,23	76- 75-4-34-67 -76
2	1	MT	98	51,10	76- 39-9-40-17 -76
3	1	MT	100	68,10	76- 52-27-57-15-5-45 -76
4	1	MT	97	73,88	76- 58-38-65-10-72-12 -76
5	2	MT	22	28,64	76-30-76
		ST	96	79,94	30- 29-37-20-70-60-71 -69- 36 -30
		ST	77	34,49	30- 74-21-47-48 -30
6	2	MT	71	113,95	76-31-25-24-49-76
		ST	86	70,30	49- 23-42 -64- 41-56 -49
		ST	42	37,50	25-55- 18-50 -25
7	2	MT	194	111,82	76-13-54-19-14-59-66-11-53-76
8	2	MT	26	29,12	76-2-76
		ST	99	58,14	2- 33-16-63-43-1-73 -2
		ST	74	48,85	2- 62 -22-61- 28 -2
9	2	MT	0	0,00	76-76
		ST	86	42,11	76- 46-8-35-7-26 -76
		ST	97	59,08	76- 32-44-3-51-6-68 -76

T7: Gesamtdistanz 830,48

ID	FT	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	149	74,83	101-58-2-57-41- 22 -75- 74-72-73-21 -40-53-101
2	1	MT	75	36,74	101- 94-59-95 -101
3	1	MT	148	72,35	101-12- 80-68-77-3-81-33 -50-1-101
4	1	MT	136	57,41	101- 97-92-37-98-100-91-85-93-99-96-6 -101
5	2	MT	242	155,01	101-31-88-62-10-63-90-32-20-66-65-71-35-9-51-30-70-69-101
6	2	MT	231	148,28	101-27-52-7-82-48-19-11-64-49-36-47-46-8-45-83-18-101
7	2	MT	234	150,80	101-28-76-79-78-34-29-24-54-55-25-39-67-23-56-4-26-101
8	2	MT	243	135,06	101-89-60-5-84-17-61-16-86-38-44-14-43-15-42-87-13-101

T8: Gesamtdistanz 878,36

ID	FT	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	146	91,26	101- 53-40-21-73-72-74-22-41 -15-43-57-2- 58 -101
2	1	MT	149	49,29	101- 94-95-59-98-85-99-96-6 -101
3	1	MT	149	78,87	101- 27-69-1-33-81 -34-78- 79-3-77-76 -101
4	1	MT	148	92,48	101- 97-92-37-100-91 -44-38-14-42- 87-13 -101
5	2	MT	137	117,61	101-28-50-51-9-35-71-65-66-20-70-101
		ST	73	41,79	70-10- 63-90-32-30 -70
6	2	MT	15	18,00	101-89-101
		ST	150	75,88	89- 93-61-16 -86-17- 84-5-60-83 -18-89
7	2	MT	73	58,76	101-26-4-54-12-101
		ST	117	64,34	4- 55-25 -39-67-23- 75-56 -4
		ST	54	35,68	54- 80-68 -29-24-54
8	2	MT	247	154,42	101-52-7-48-82-8-45-46-47-36-49-64-11-19-62-88-31-101

T9: Gesamtdistanz 934,47

ID	FT	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	149	51,11	101- 94-95-97-87-13-58-40-53 -101
2	1	MT	149	53,68	101- 89-6-96-99-93-85-98-37-92-59 -101
3	1	MT	149	61,45	101- 28-12-80-68-77-76-50-1-69-27 -101
4	1	MT	142	91,42	101-52- 88-62-10-63-90-32-30-70-31 -101
5	2	MT	107	134,07	101-54-24-29-35-71-65-66-20-101
		ST	116	57,54	35- 9-51-81-33-3-79-78-34 -35
6	2	MT	12	31,62	101-18-101
		ST	90	55,10	18- 82-8-45-17-84-5-60-83 -18
		ST	142	104,18	18- 7-48 -19-11-64-49-36- 47 -46-18
7	2	MT	17	22,36	101-26-101
		ST	147	88,88	26- 21-75-56 -23-67-39- 25-55 -4-26
8	2	MT	5	50,99	101-42-101
		ST	94	65,06	42-43-15- 41-22-74-72-73-2-57 -42
		ST	139	67,01	42- 100-91-61-16-86 -38- 44-14 -42

T10: Gesamtdistanz 1039,07

ID	FT	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	150	53,66	151- 147-6-104-99-59-98-37-92 -97-117-13-58-151
2	1	MT	144	84,15	151- 69-132 -50- 77-3-79-129-121-29 -24-134-109-151
3	1	MT	149	66,35	151-53-40-21-73-72-74- 133-22 -41-145- 115-2 -151
4	1	MT	149	48,05	151-111-76-116- 68-80-150 -12-138-28-151
5	1	MT	150	67,24	151- 118-60 -83- 125-45-8 -114-18-52-151
6	2	MT	107	71,24	151-102-33-81-51-122-70-101-1-151
		ST	143	63,17	81-78-34-135- 35 -136-65-71-103-9-120-81
7	2	MT	110	61,44	151-31-108-62-148-88-127-151
		ST	139	62,22	108- 10-30-20-66-128-131-32 -90- 63-126 -108
8	2	MT	250	135,70	151-27-106-7-123-19-107-11-64-49-143-36-47-46-124-48-82-146-151
9	2	MT	230	113,98	151-26-149-130-55-25-139-39-67-23-75-56-4-110-105-151
		ST	18	4,47	130- 54 -130
10	2	MT	178	82,62	151-89-5-84-17-113-86-141-16-61-96-151
		ST	70	33,27	141- 140-38 -14-119- 44 -141
11	2	MT	248	91,53	151-112-94-95-93-85-91-100-42-142-43-15-57-144-87-137-151

T11: Gesamtdistanz 1094,11

ID	FT	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	149	48,05	151-111- 76-116-68-150-80-12 -138-28-151
2	1	MT	144	79,95	151- 109-54-130 -134-24- 29-121-79-3-77 -151
3	1	MT	147	78,99	151- 27-50-102-33-81-120 -34-78- 129 -151
4	1	MT	150	91,97	151-106- 7-62-126-63 -90- 32-131-108-10-69-132 -151
5	1	MT	29	10,00	151-112-151
6	1	MT	140	66,17	151- 2-115 -145-41- 22-133-74-72-73-21-53 -151
7	2	MT	103	71,00	151-1-51-122-30-70-101-31-127-151
		ST	146	72,07	51- 9 -103-71- 135-35 -136-65-66- 128-20 -51
8	2	MT	232	135,01	151-146-88-148-123-107-11-64-49-143-36-47-46-124-48-82-52-151
		ST	17	6,32	123- 19 -123
9	2	MT	88	48,18	151-105-26-149-110-40-58-151
		ST	150	70,75	110-4-55-25-139- 39 -67-23-56- 75 -110
10	2	MT	134	84,69	151-13-87-42-142-14-43-15-57-144-137-151
		ST	112	39,31	14- 38-140 -86- 141-44-119 -14
11	2	MT	38	43,69	151-18-83-89-151
		ST	134	44,89	83-84-17-113- 16 -61-5- 118-60 -83
		ST	74	22,10	83- 114-8-45-125 -83
12	2	MT	27	24,08	151-94-151
		ST	134	35,58	94- 117-97-92-37-98-100 -91- 85-93-99-104 -94
		ST	87	21,32	94- 95-59-96-147-6 -94

T12: Gesamtdistanz 1155,13

ID	FT	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	150	86,90	151- 27-132-69-101-70-122-30-131-32 -90- 63-126-10-146 -151
2	1	MT	148	51,85	151- 26-149-109-150-80-68-12 -138- 28 -151
3	1	MT	143	79,75	151- 13-117-97-42-142 -43-15- 57-144-87-137-53 -151
4	1	MT	150	50,95	151- 147-6-59-104-5-118-60-89 -151
5	1	MT	149	65,50	151- 105-40-21-73-74-133-22 -41-145- 115-2 -58-151
6	1	MT	150	49,37	151- 96-99-93-85-98-37-92-95-94 -151
7	2	MT	20	54,20	151-1-51-151
		ST	130	67,46	51-103-71- 135-35-136 -65-66- 128-20 -51
		ST	98	39,06	51- 9-120 -34-78- 81-33 -51
8	2	MT	52	56,51	151-82-48-151
		ST	146	64,67	48- 123-19-107-11 -64- 49 -143-36- 47 -48
9	2	MT	5	42,52	151-110-151
		ST	148	58,25	110- 139-39 -67-23-56- 75-72 -110
		ST	93	51,48	110- 4-25-55 -24-134- 54-130 -110
10	2	MT	109	78,10	151-84-17-113-86-61-112-151
		ST	134	52,48	61- 91-100-119-14-38-140-44-141-16 -61
11	2	MT	19	18,44	151-111-151
		ST	144	53,10	111- 50-102-79-129-29-121-3-77-116-76 -111
12	2	MT	24	31,07	151-127-52-151
		ST	128	69,30	52-18-83- 114-8-125-45 -46- 124-7-106 -52
		ST	95	34,17	127- 88-148-62-108-31 -127

T13: Gesamtdistanz 1287,18

ID	FT	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	144	41,56	200-112-183-147- 118-60 -166-200
2	1	MT	146	54,62	200-180-21-198-110- 4-155 -179-149-26-200
3	1	MT	145	40,12	200-27-167-127-190-31-162- 69-132 -200
4	1	MT	141	47,63	200-13-95- 151-92-37-98 -59- 104-99 -96- 6 -200
5	1	MT	144	47,53	200- 138-154 -12-109-177- 80-150 -68-200
6	1	MT	107	27,54	200-53-105-40- 58-152 -156-200
7	1	MT	147	65,32	200-73-171-74- 133-22 -41-145- 115-178-2 -200
8	2	MT	247	126,01	200-176-51-9-103-161-71-135-35-136-65-66-188-20-128-70-101-200
9	2	MT	106	68,42	200-52-7-123-19-182-148-88-146-200
		ST	140	58,04	19- 107-175 -11-64-49-143-36- 47-168 -19
10	2	MT	220	109,21	200-130-165-25-170-67-39-23-186-56-75-197-72-200
		ST	28	7,16	39- 139-187 -39
		ST	2	2,83	165- 55 -165
11	2	MT	138	88,14	200-117-97-87-172-42-142-14-43-15-57-144-137-200
		ST	112	43,03	14- 38-140 -44-191- 91-193 -100-192-119-14
12	2	MT	238	98,76	200-195-54-134-163-24-29-121-169-78-34-164-120-81-33-50-200
13	2	MT	174	83,19	200-153-82-48-124-46-174-8-114-199-83-18-89-200
		ST	32	6,00	153- 194-106 -153
		ST	44	11,10	174- 125-45 -174
14	2	MT	173	82,18	200-1-122-30-160-131-32-90-108-159-62-200
		ST	32	4,47	108- 189-10 -108
		ST	42	22,19	90- 126-63 -181-90
15	2	MT	248	87,58	200-94-93-85-61-16-141-86-113-17-173-84-5-200
16	2	MT	94	36,34	200-28-184-196-76-111-200
		ST	142	28,24	196- 102 -157-185- 79-129-3-158 -77- 116 -196

T14: Gesamtdistanz 1353,08

ID	FT	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	148	77,38	200-177- 134-163 -24- 29-121 -169- 129-79-3-158 -200
2	1	MT	150	75,65	200-109- 54-130-165-55 -25- 187-139-4-155 -149-200
3	1	MT	136	42,63	200- 132-69-101-162-31-190-127 -167-200
4	1	MT	147	48,88	200-28- 76-196-77-157-102 -50-111-200
5	1	MT	146	32,00	200- 156 -112- 183-94-152-58 -200
6	1	MT	140	46,21	200- 147-6-96-104-99-59-92-151 -97- 95-117 -200
7	1	MT	150	45,84	200- 184-116-68-80-150 -12- 154-138 -200
8	2	MT	193	93,55	200-176-1-122-51-103-66-188-128-160-30-70-27-200
		ST	34	12,07	160- 131-32 -160
		ST	9	4,47	188- 20 -188
9	2	MT	177	127,21	200-82-48-124-46-36-143-49-64-11-19-123-52-146-200
		ST	40	9,12	124- 168-47 -124
		ST	33	7,77	11- 107-175 -11
10	2	MT	100	57,47	200-26-195-179-110-197-72-200
		ST	143	52,79	197- 56-186 -39-170-67-23-75-197
11	2	MT	109	75,16	200-137-144-57-15-43-142-87-13-200
		ST	140	56,59	142-14- 38-140-44-141-191-119 -192- 172-42 -142
12	2	MT	123	77,09	200-33-81-120-164-34-78-185-200
		ST	119	43,10	120- 135-35 -136-65-71-161-9-120
13	2	MT	34	28,13	200-89-166-200
		ST	129	38,01	166- 83 -199- 125-45 -174- 8-114 -18-166
		ST	44	10,47	166- 118-60 -166
14	2	MT	194	84,48	200-5-84-173-17-113-86-16-61-85-93-200
		ST	54	13,80	85- 91-193-100-37-98 -85
15	2	MT	54	48,21	200-182-148-88-200
		ST	148	46,82	148- 62-159-126-63 -181-90- 108-10-189 -148
		ST	48	16,80	182- 7-153-106-194 -182
16	2	MT	97	40,56	200-105-180-198-21-40-53-200
		ST	147	40,80	21- 2-178-115 -145-41- 22-133-74-171 -73-21

T15: Gesamtdistanz 1457,61

ID	FT	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	150	55,74	200- 96-59-98-85-100-37-92-151-97-117 -200
2	1	MT	145	76,14	200- 198-110-197-56-186-23-75-72-21 -200
3	1	MT	150	60,19	200- 153-106-194-7-182-62-159-148-88 -200
4	1	MT	149	34,12	200- 112-13-94-183-6-147-89 -200
5	1	MT	149	52,90	200-166- 60-118-5-93-104-99-95 -200
6	1	MT	149	49,20	200- 12-177-80-150-68-116-196-184 -200
7	1	MT	129	30,70	200- 156-58-152-40-180-105-53 -200
8	1	MT	147	47,41	200- 27-132-69-1-101-162-31-190-127-146 -200
9	2	MT	88	94,51	200-51-71-164-34-78-169-200
		ST	148	46,26	71-65-136- 35-135-120-9-103-161 -71
10	2	MT	84	126,60	200-90-181-64-49-143-36-46-200
		ST	150	45,57	90- 108-189-10-123-19-107-175-11-126-63 -90
11	2	MT	30	38,48	200-26-179-200
		ST	141	58,18	179- 130-165-55-25-170-67-39-187-139 -179
		ST	79	24,64	179- 195-149-4-155 -179
12	2	MT	13	50,99	200-61-200
		ST	92	36,07	61- 173-84-17-113-86-16 -61
		ST	142	52,11	61- 91-193-192-119-14-38-140-44-141-191 -61
13	2	MT	35	19,67	200-28-111-200
		ST	150	44,33	111- 176-50-102-157-33-81-185-77-76 -111
		ST	45	8,94	28- 138-154 -28
14	2	MT	37	48,38	200-52-82-18-200
		ST	86	24,64	82-48- 168-47 -124-82
		ST	117	33,53	18- 114-8-174-45-125-199-83 -18
15	2	MT	54	53,56	200-122-30-70-167-200
		ST	132	44,77	30- 20-188-66-128-160-131-32 -30
16	2	MT	9	26,68	200-137-200
		ST	94	49,61	137-144-57-15-43-142- 42-172 -87-137
		ST	147	46,02	137- 73-171-74-133-22 -41-145- 115-178-2 -137
17	2	MT	0	0,00	200-200
		ST	145	77,66	200- 109-54-134-163-24-29-121-129-79-3-158 -200

T16: Gesamtdistanz 1002,49

ID	FT	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	148	119,67	121- 6-5-10-9-13-14-15-11-4-3-1-2 -121
2	1	MT	148	64,55	121- 105-106-96-93-91-90-114-18-118-83-113 -84-112-81-119-121
3	1	MT	94	25,05	121-87- 92-89-85-86-111 -82-88-121
4	2	MT	249	229,50	121-104-73-76-78-80-79-53-55-58-56-60-63-66-64-62-61-65- -59-57-54-52-110-95-121
5	2	MT	242	201,01	121-94-97-115-40-43-45-48-51-50-49-46-47-44-41-42-39-38-37-109-121
6	2	MT	169	178,97	121-117-7-8-12-17-16-19-25-23-26-20-21-108-121
		ST	81	44,07	25- 22-24 -27-33-30-31-34-36-29- 35-32 -28-25
7	2	MT	196	135,67	121-120-107-103-67-69-70-71-74-77-68-98-116-100-99-101-102-121
		ST	48	4,00	74- 72-75 -74

T17: Gesamtdistanz 1042,35

ID	FT	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	150	118,94	121- 6-7-9-14-15-11-10-5-4-3-1-2 -88-121
2	1	MT	143	47,31	121-87- 92-89-91-90-18-118-114-94-93-96-106-105 -121
3	1	MT	112	45,50	121-119-81-117- 83-113 -84-112-85- 86-111 -82-121
4	2	MT	100	186,77	121-110-52-53-55-56-80-79-68-103-104-121
		ST	144	44,21	55-54-57-59-65- 61-62 -64-66-63-60-58-55
5	2	MT	157	177,42	121-109-37-41-42-48-45-43-40-115-97-95-121
		ST	58	25,21	48-51-50- 49-46-44-47 -48
		ST	26	8,61	42- 39-38 -42
6	2	MT	65	159,78	121-8-12-19-108-121
		ST	136	60,94	19- 25-22-24-27-33-30-31-34-36 -29- 35-32 -28- 23-26 -21- 20 -19
		ST	13	14,14	12- 13 -12
		ST	31	8,61	19- 17-16 -19
7	2	MT	95	105,85	121-120-107-67-98-116-100-99-101-102-121
		ST	145	39,07	67- 69-70 -71- 74-72-75 -78-77- 76-73 -67

T18: Gesamtdistanz 1129,16

ID	FT	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	149	114,90	121- 85-6-7-9-10-11-15-4-5-3-1-2 -81-121
2	1	MT	145	50,01	121- 88-111-86-89-91-90-114-18-118-83-113-117-84-112-82 -121
3	1	MT	141	49,06	121- 105-106-107-104-103-100-99-101-102-96-94-93-92-87 -121
4	2	MT	90	213,89	121-78-79-80-56-60-63-66-59-110-121
		ST	129	35,68	60- 64-62-61-65-57-54-52-53-55-58 -60
		ST	28	6,00	78- 77 -78
5	2	MT	109	175,81	121-108-109-42-45-43-40-115-97-121
		ST	135	41,37	42- 39-38-37-41-44-47-46-49 -50-51-48-42
6	2	MT	45	183,45	121-29-12-8-121
		ST	44	33,85	29- 35-31-27-30-33-34-36 -29
		ST	131	51,53	29- 32-28-25-24-22-19-16-17-21-20-23-26 -29
		ST	25	17,85	12- 13-14 -12
7	2	MT	64	65,80	121-119-120-98-116-95-121
		ST	140	89,97	98- 67-69-70-71-75-72-74-73-76 -68-98

T19: Gesamtdistanz 813,50

ID	FT	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	150	77,45	101- 5-3-4-2-1 -91-88- 86-87 -90-101
2	1	MT	130	59,47	101-43-42-46-50-51-48-45-44-40-41-101
3	1	MT	150	43,59	101- 67-65 -63-74-62-66-101
4	1	MT	150	44,68	101- 21-22-26-28 -30- 27-25-24-20 -101
5	2	MT	120	108,97	101-81-82-83-84-85-89-101
		ST	120	38,39	81-80- 79-77 -73-70-71-76-78-81
6	2	MT	250	113,46	101-69-68-57-59-60-58-56-53-54-55-64-61-72-101
7	2	MT	230	101,41	101-75-98-96-95-94-92-93-97-100-99-6-101
		ST	20	6,00	6- 7 -6
8	2	MT	210	102,86	101-29-34-36-39-38-37-33-35-31-52-49-47-101
		ST	30	4,00	33- 32 -33
9	2	MT	150	87,83	101-10-11-13-15-19-18-17-23-101
		ST	70	17,07	15- 16-14 -12-15
		ST	30	8,32	11- 8-9 -11

T20: Gesamtdistanz 848,93

ID	FT	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	150	77,45	101-90- 87-86 -88-91- 1-2-4-3-5 -101
2	1	MT	150	62,25	101- 47-49 -50-51- 48-46-45-44-40-41-42 -43-101
3	1	MT	150	50,51	101- 67-65-63 -74- 61-64-69 -101
4	1	MT	140	40,44	101- 21-22-26-28-27-25-24-20 -101
5	2	MT	120	108,97	101-89-85-84-83-82-81-101
		ST	120	38,39	81- 78-76 -71-70-73- 77-79 -80-81
6	2	MT	80	87,52	101-68-54-72-62-101
		ST	60	15,40	54- 59-57-55 -54
		ST	100	22,99	54-60- 58-56 -53-54
		ST	10	6,00	62- 66 -62
7	2	MT	210	98,80	101-75-98-96-95-94-93-97-100-99-6-101
		ST	20	4,00	93- 92 -93
		ST	20	6,00	6- 7 -6
8	2	MT	90	90,65	101-52-31-35-34-29-30-23-101
		ST	150	28,39	34-36-39- 38-37-33-32 -34
9	2	MT	140	85,77	101-10-11-13-15-19-18-17-101
		ST	70	17,07	15- 16-14 -12-15
		ST	30	8,32	11- 9-8 -11

T21: Gesamtdistanz 909,06

ID	FT	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	140	66,24	101-90- 87-86-84-85-88-89 -91-101
2	1	MT	150	63,64	101- 43-42-40-44-46-45-48-51-50-52-49-47 -101
3	1	MT	150	66,16	101- 67-65-63-62-66-69-61-64-68-41 -101
4	1	MT	150	42,20	101- 20-24-25-27-28-26-23-22-21 -101
5	1	MT	120	50,36	101- 10-11-8-9-6-4-7-3-5 -101
6	2	MT	130	124,99	101-74-72-80-81-82-83-101
		ST	110	28,39	81- 79-77 -73- 70 -71- 76-78 -81
7	2	MT	40	80,10	101-54-101
		ST	60	15,40	54- 55-57-59 -54
		ST	100	22,99	54- 60-58-56 -53-54
8	2	MT	100	84,84	101-75-99-100-97-98-101
		ST	40	10,00	75- 2-1 -75
		ST	110	21,21	97- 93-92 -94- 95-96 -97
9	2	MT	30	71,57	101-31-29-101
		ST	10	10,00	29- 30 -29
		ST	30	10,00	31- 32 -31
		ST	150	36,22	31- 33-34-36-39-38-37 -35-31
10	2	MT	70	72,25	101-15-13-101
		ST	120	32,53	15- 17-18 -19- 16-14-12 -15

Anhang B

Lösungen für das MDTTRP

Nachfolgende Tabellen zeigen die Tourenpläne der besten bekannten Lösungen für die 30 in Kapitel 2.4.2.2 beschriebenen MDTTRP-Probleme MDT1-MDT30. Die Spalten enthalten die folgenden Informationen: die Nummer der Route (ID), das zugehörige Depot (Dp), den Typ (TT), die Ladung (L), die Distanz und die Kundenreihenfolge der zugehörigen Tour. Die Angabe des Fahrzeugtyps entfällt, da jedes Testproblem einen homogenen Fuhrpark besitzt. Um TC-Kunden explizit auszuweisen, werden sie in den nachfolgenden Tabellen mit Fettdruck wiedergegeben. Der erste und letzte Kunde einer Tour bezeichnet den Root dieser Tour.

MDT1: Gesamtdistanz 923,97

ID	Dp	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	49	MT	127	175,10	49-35-9-39-43-46-42-34-49
		ST	71	83,14	49-37-7-41-36- 31-44-32 -49
2	50	MT	0	0,00	50-50
		ST	18	11,41	50- 10 -50
		ST	100	116,05	50-22-27- 3-6 -48- 11 -45-50
3	51	MT	141	261,49	51-16-29-5-8-13-33-20-19-4-1-51
		ST	18	25,41	1- 28-14 -1
4	52	MT	111	208,41	52-2-15-25-23-26-18-17-40-38-30-52
		ST	71	42,97	38- 12 -21- 24-47 -38

MDT2: Gesamtdistanz 981,15

ID	Dp	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	49	MT	0	0,00	49-49
		ST	71	83,14	49- 32-44-31 -36-41- 7-37 -49
		ST	92	158,81	49-42-46-43-9- 35 -49
2	50	MT	0	0,00	50-50
		ST	100	116,05	50-22-27- 3-6 -48- 11-45 -50
		ST	40	22,23	50- 34-10 -50
3	51	MT	37	39,56	51-1-16-51
		ST	96	142,63	1- 29-5-8 -13-33-20-1
		ST	26	128,32	1-19-4- 14-28 -1
4	52	MT	0	0,00	52-52
		ST	98	207,58	52- 38 -40-17-18-26-23- 25-15 -2-52
		ST	97	82,85	52-30- 47-12-21-24 -39-52

MDT3: Gesamtdistanz 981,64

ID	Dp	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	49	MT	0	0,00	49-49
		ST	92	158,81	49- 35-9-43 -46-42-49
		ST	71	83,14	49- 32-44-31-36-41-7-37 -49
2	50	MT	0	0,00	50-50
		ST	100	116,05	50- 45-11-48-6-3 -27-22-50
		ST	40	22,23	50- 34-10 -50
3	51	MT	25	11,07	51-16-51
		ST	38	148,26	51- 28-14-4 -19- 1 -51
		ST	96	151,66	16-20-33-13- 8-5-29 -16
4	52	MT	0	0,00	52-52
		ST	97	82,85	52- 39-24-21-12-47-30 -52
		ST	98	207,58	52- 2-15-25-23-26 -18-17-40- 38 -52

MDT4: Gesamtdistanz 1377,84

ID	Dp	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	97	MT	173	431,99	97-37-44-17-7-5-39-27-68-8-13-63-43-41-70-59-97
		ST	12	11,47	37- 73-62 -37
2	97	MT	119	123,68	97-84-86-93-38-92-20-55-74-19-81-97
		ST	44	33,31	20- 16-64 -20
3	98	MT	134	99,86	98-94-9-69-25-95-87-32-98
		ST	27	17,97	32- 47-1-65 -32
		ST	34	11,82	25- 60-72 -25
4	98	MT	0	0,00	98-98
		ST	44	16,86	98- 33-88 -78-98
5	99	MT	149	189,73	99-2-10-48-6-51-50-76-3-12-53-71-36-66-56-99
		ST	44	35,03	2- 80-24-14-67-18 -2
6	99	MT	0	0,00	99-99
		ST	70	42,44	99- 42-22 -85-96-99
7	100	MT	29	12,83	100-89-52-100
		ST	81	61,32	52-45-31-4- 77-90 -61-52
		ST	76	45,74	100- 11-28 -54-57-29-58-100
8	100	MT	172	213,56	100-21-26-91-46-15-83-75-40-49-34-82-35-79-100
		ST	12	30,23	15- 23-30 -15

MDT5: Gesamtdistanz 1457,64

ID	Dp	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	97	MT	191	485,95	97-86-93-38-92-20-7-5-39-27-68-8-13-63-43-41-84-97
2	97	MT	13	6,38	97-81-97
		ST	90	88,17	81- 73 -17- 64-16-55 -74-19-81
		ST	88	59,22	81- 62-44-37-69-9 -81
3	98	MT	0	0,00	98-98
		ST	88	43,69	98- 88-47-65-87-32 -98
		ST	12	6,24	98- 78 -98
4	98	MT	0	0,00	98-98
		ST	94	84,45	98- 33-1-95-25-72-60 -94-98
5	99	MT	150	191,46	99-96-36-71-53-12-3-76-50-51-6-48-10-2-99
		ST	44	35,03	2- 80-24-14-67-18 -2
6	99	MT	0	0,00	99-99
		ST	69	45,26	99- 42-22 -85- 66-56 -99
7	100	MT	0	0,00	100-100
		ST	94	69,79	100- 28 -54- 29-59-70-61-52-89 -100
		ST	92	44,62	100- 45-79-26 -91- 21-11 -100
8	100	MT	153	222,36	100-31-4-34-49-40-75-83-15-46-57-58-100
		ST	21	22,62	31- 82-35 -31
		ST	9	22,18	4- 77-90 -4
		ST	12	30,23	15- 23-30 -15

MDT6: Gesamtdistanz 1527,90

ID	Dp	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	97	MT	97	290,16	97-81-93-38-68-27-8-13-63-43-86-97
		ST	88	81,68	93-92-20- 55-44-19-74 -93
2	97	MT	0	0,00	97-97
		ST	87	63,35	97- 73-62-37-17-69-9 -97
		ST	89	69,66	97- 60-72-25-59-70-41-84 -97
3	98	MT	0	0,00	98-98
		ST	87	248,62	98-94- 64-16 -39- 5-7 -98
		ST	44	16,86	98- 78-88-33 -98
4	98	MT	0	0,00	98-98
		ST	95	68,42	98- 32-87-95-65-47-1 -98
5	99	MT	0	0,00	99-99
		ST	95	103,43	99- 10-48-6-24-80-18-14-67 -99
6	99	MT	0	0,00	99-99
		ST	94	151,33	99- 2-51-50-76-3-12 -53- 71-36-66 -99
		ST	74	43,85	99- 42-22-85-56-96 -99
7	100	MT	0	0,00	100-100
		ST	85	81,90	100- 61-90-77-4-31-35-82 -100
		ST	95	49,37	100- 54-57-29-58-52-89 -100
8	100	MT	0	0,00	100-100
		ST	95	211,81	100- 46-15-30-23 -83-75-40-49-34-100
		ST	95	47,46	100- 45-79-26-91-21-28-11 -100

MDT7: Gesamtdistanz 1883,06

ID	Dp	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	145	MT	151	199,88	145-133-129-73-14-127-121-40-69-119-110-114-27-13-71-145
		ST	37	23,80	121- 88-52 -121
2	145	MT	0	0,00	145-145
		ST	94	54,96	145- 80-3-139-132-1-95 -26-145
3	145	MT	0	0,00	145-145
		ST	81	43,20	145- 91-45 -87- 109-107 -11-145
		ST	32	14,18	145- 17-62-39 -145
4	146	MT	190	219,52	146-24-70-79-19-141-74-100-72-50-10-112-12-78-108-37-146
5	146	MT	189	412,08	146-135-105-101-115-83-125-34-111-61-36-57-85-67-55-98- -49-116-76-120-54-126-68-46-51-146
6	146	MT	0	0,00	146-146
		ST	81	59,82	146-117-56-8-75- 4-6 -146
7	147	MT	83	71,15	147-2-142-137-64-97-147
		ST	69	118,69	142-131-9- 89-140 -47- 136-60 -113-142
8	147	MT	142	135,63	147-124-44-42-38-20-103-31-118-144-147
9	147	MT	0	0,00	147-147
		ST	80	46,58	147- 130-99-23-122-81 -147
		ST	53	22,44	147- 48-102-94 -147
10	148	MT	163	227,57	148-86-21-66-53-90-7-30-77-134-32-96-138-84-106-148
11	148	MT	174	124,90	148-22-58-25-128-33-93-59-82-29-65-148
12	148	MT	0	0,00	148-148
		ST	75	70,39	148-63-5-35-28- 41-15-143 -92-148
		ST	94	38,27	148-16- 123-18-104-43 -148

MDT8: Gesamtdistanz 2057,09

ID	Dp	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	145	MT	109	173,16	145-10-127-121-40-69-119-110-13-71-145
		ST	37	23,80	121- 88-52 -121
		ST	30	45,91	110- 27-114 -110
2	145	MT	0	0,00	145-145
		ST	93	174,44	145- 133-73 -50-72-100- 74-141-112-12 -145
		ST	89	64,23	145- 109-107 -5-28-35-11-145
3	145	MT	0	0,00	145-145
		ST	93	57,06	145- 91-45-87-129-14-80-3-62 -145
		ST	95	46,91	145- 17-139-132-1-95-26-39 -145
4	146	MT	0	0,00	146-146
		ST	89	102,24	146- 24-70 -79-19-78-108-37-146
		ST	89	89,07	146-135- 105-101-115-83-56-8 -75- 4-6 -146
5	146	MT	141	388,45	146-51-46-126-54-120-76-116-49-98-55-67-85-57-36-34-125-117-146
		ST	33	39,34	34- 111-61 -34
6	147	MT	22	24,92	147-2-147
		ST	72	140,92	2- 64-137 -77-30-134-97-2
		ST	88	138,61	2-113- 60-136 -47- 140-89 -9-131-142-2
7	147	MT	142	135,63	147-144-118-31-103-20-38-42-44-124-147
8	147	MT	0	0,00	147-147
		ST	88	49,55	147- 130-99-23-81-32 -147
		ST	53	22,44	147- 94-102-48 -147
9	148	MT	189	144,64	148-65-33-93-59-82-29-53-90-7-66-148
10	148	MT	14	35,45	148-22-148
		ST	91	44,59	22-58- 68-25-128-123-18 -22
		ST	45	12,38	148- 104-43 -148
11	148	MT	0	0,00	148-148
		ST	86	103,33	148-92- 63-41-15-143-106-84-122-138-96-21-86-16 -148

MDT9: Gesamtdistanz 2203,03

ID	Dp	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	145	MT	0	0,00	145-145
		ST	73	34,83	145- 91-45-87-129-133-17-62 -145
		ST	94	170,64	145-40- 69 -119-110- 114-27-13 -145
2	145	MT	0	0,00	145-145
		ST	95	51,17	145- 26-139-132-1-95-71-39 -145
		ST	94	101,92	145- 80-3-121-52-88-127-14-73 -145
3	145	MT	0	0,00	145-145
		ST	89	64,23	145- 109-107-5-28-35-11 -145
4	146	MT	185	500,90	146-108-78-10-50-72-100-34-36-57-85-67-55-98-49-116-76-120-54-126-146
5	146	MT	0	0,00	146-146
		ST	93	125,10	146- 70-79-74-141-112-12-19-24 -146
		ST	86	67,71	146- 37-51-46-6-4-75-117 -146
6	146	MT	0	0,00	146-146
		ST	89	128,39	146- 8-56-125-61-111-83-115-101-105-135 -146
7	147	MT	66	167,91	147-124-142-77-30-134-147
		ST	37	39,97	134- 90-7 -134
		ST	69	118,69	142-131-9- 89-140 -47- 136-60 -113-142
8	147	MT	0	0,00	147-147
		ST	76	59,48	147- 130-99-144-118 -147
		ST	84	113,57	147- 44-38-20-103-31-42 -147
9	147	MT	0	0,00	147-147
		ST	92	48,78	147- 23-122-81-32-102-94 -147
		ST	86	59,63	147- 2-137-64-97-48 -147
10	148	MT	0	0,00	148-148
		ST	90	89,71	148- 21-66-53-82-29-16 -148
		ST	93	96,59	148- 128-33-93-59-65 -148
11	148	MT	0	0,00	148-148
		ST	95	74,33	148- 86-18-123-25-68-58-22 -148
12	148	MT	0	0,00	148-148
		ST	57	77,13	148- 63-41-15-143-84-138-96-106-92 -148
		ST	45	12,38	148- 43-104 -148

MDT10: Gesamtdistanz 2201,36

ID	Dp	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	193	MT	181	122,34	193-148-12-152-89-165-65-32-141-42-56-68-193
2	193	MT	180	268,92	193-117-5-192-76-181-21-35-172-30-2-60-95-193
3	193	MT	22	32,33	193-154-18-193
		ST	70	53,18	18-90- 63 -153- 189 -15-18
4	193	MT	130	63,91	193-82-104-71-121-67-50-161-180-193
		ST	43	10,80	71- 9 - 177 -71
5	194	MT	129	205,30	194-125-107-111-11-122-57-46-183-116-110-25-79-194
		ST	48	39,73	25- 149 - 73 -108-142-25
6	194	MT	85	36,24	194-178-133-128-58-3-194
		ST	80	59,41	128-145-157- 139 - 130 -97- 129 - 59 -128
7	194	MT	155	129,16	194-38-14-138-70-13-174-131-176-80-155-150-81-7-173-194
		ST	17	11,02	7- 74 - 72 -7
8	194	MT	0	0,00	194-194
		ST	64	16,75	194- 123 - 188 -137-194
9	195	MT	170	175,62	195-34-39-47-162-132-85-127-159-55-19-109-167-16-195
10	195	MT	163	147,63	195-93-134-53-160-52-187-36-168-33-171-99-115-195
		ST	11	12,55	53- 64 - 24 -53
11	195	MT	30	27,33	195-190-135-195
		ST	87	19,70	135- 186 - 91 - 106 - 66 -135
12	195	MT	19	10,96	195-62-195
		ST	83	37,53	62-77- 10 - 98 - 22 - 69 - 113 - 27 -62
13	196	MT	0	0,00	196-196
		ST	84	24,80	196- 124 - 83 - 41 - 94 - 175 -8-196
		ST	90	70,25	196- 49 - 28 - 84 - 136 - 29 -6-26- 114 - 43 - 102 - 96 - 169 -196
14	196	MT	175	246,35	196-112-182-140-31-147-40-20-105-1-86-120-4-158-170-45-87-92-196
15	196	MT	148	88,75	196-44-119-23-51-151-101-143-163-144-196
		ST	23	10,34	44- 185 - 17 -44
		ST	5	11,30	101- 88 - 164 -101
16	196	MT	185	269,18	196-54-156-61-191-118-126-75-166-48-179-103-146-184-78-100-37-196

MDT11: Gesamtdistanz 2367,74

ID	Dp	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	193	MT	37	43,87	193-161-50-71-193
		ST	68	22,84	71- 82-104-9-177 -71
		ST	27	13,99	161- 68-180 -161
		ST	43	18,36	71- 67-121 -71
2	193	MT	180	268,92	193-117-5-192-76-181-21-35-172-30-2-60-95-193
3	193	MT	36	51,51	193-154-115-18-193
		ST	77	59,65	115- 69-22 -168- 33-171-99 -115
		ST	60	40,28	18-90-153- 189-15 -18
4	193	MT	144	118,91	193-148-12-152-65-32-141-42-56-193
		ST	35	15,72	152- 89-165 -152
5	194	MT	40	52,13	194-110-25-194
		ST	86	103,30	25-142-116- 183-46 -57-122-108- 73-149 -25
		ST	58	29,59	194- 125-178-58-3 -194
6	194	MT	78	133,62	194-128-133-107-111-11-79-194
		ST	90	70,85	128- 59-129-97 -19- 109-167-157-145 -128
7	194	MT	107	107,23	194-7-81-150-155-174-13-70-14-38-194
		ST	17	11,02	7- 74-72 -7
		ST	31	24,00	174- 80-176-131 -174
8	194	MT	0	0,00	194-194
		ST	67	19,12	194- 173-188-123-137 -194
9	195	MT	142	209,27	195-134-160-162-132-55-159-127-85-52-187-36-195
		ST	27	23,33	160- 24-64-53 -160
10	195	MT	0	0,00	195-195
		ST	85	55,99	195- 16-139-130-39-47-34 -195
		ST	69	24,26	195- 91-186 -190-195
11	195	MT	0	0,00	195-195
		ST	88	50,72	195- 135-66-138-106-27-113 -195
12	195	MT	0	0,00	195-195
		ST	65	27,05	195- 93-10-98-77-62 -195
13	196	MT	0	0,00	196-196
		ST	85	37,04	196- 8-175-94-41-136-84-28-83 -196
		ST	88	63,76	196- 112-164-88-151-182-101-143-163-63-49-124 -196
14	196	MT	164	248,12	196-45-170-158-4-120-86-1-105-20-40-147-140-51-196
		ST	17	8,49	140- 31 -140
15	196	MT	72	40,85	196-144-44-37-100-196
		ST	88	62,00	100- 78-184-102-43-114-26-54-29-6-169-96 -100
		ST	23	10,34	44- 17-185 -44
16	196	MT	183	301,60	196-156-61-191-118-126-75-166-48-179-103-146-87-23-119-92-196

MDT12: Gesamtdistanz 2566,78

ID	Dp	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	193	MT	92	289,54	193-5-35-21-181-118-126-141-32-193
		ST	20	27,70	5- 76-192 -5
		ST	64	51,48	32- 42-56-9 -32
2	193	MT	20	24,94	193-12-193
		ST	81	52,80	12- 89-117-65-165 -12
		ST	83	60,89	12- 152-80-176-131-174 -13-12
3	193	MT	12	28,91	193-18-193
		ST	75	70,68	18- 99-33-171-90-153 -18
		ST	89	49,21	18- 161-50-121-67-189-15 -18
4	193	MT	0	0,00	193-193
		ST	83	51,76	193- 82-104-177-71-68-180 -193
		ST	79	53,13	193- 154-115-69-22-113-27-148 -193
5	194	MT	120	189,93	194-155-95-60-2-30-172-116-194
		ST	62	77,48	116- 183-46-57-122-108-142 -116
6	194	MT	0	0,00	194-194
		ST	88	63,47	194- 157-145-59-97-129-128-58 -194
		ST	88	143,89	194- 149-73 -11-111-107- 133-178-125 -194
7	194	MT	0	0,00	194-194
		ST	87	78,93	194- 25-110-150-81-7-74-72-173 -194
		ST	79	26,00	194- 123-188-38-3 -194
8	194	MT	0	0,00	194-194
		ST	39	17,66	194- 79-137 -194
9	195	MT	143	210,25	195-36-168-187-52-85-127-159-55-132-195
10	195	MT	0	0,00	195-195
		ST	65	27,05	195- 62-77-98-10-93 -195
		ST	69	24,26	195- 190-186-91 -195
11	195	MT	0	0,00	195-195
		ST	75	57,21	195- 135-14 -70- 138-66-106 -195
12	195	MT	0	0,00	195-195
		ST	80	96,11	195- 34-167-109-19-162-160-53-64-24 -134-195
		ST	83	55,68	195- 16-139-130-39-47 -195
13	196	MT	72	93,79	196-51-120-23-196
		ST	67	121,69	120- 86 -105-20-40-147- 1 -120
		ST	38	60,55	23-4-158- 170-45 -23
14	196	MT	0	0,00	196-196
		ST	84	88,45	196- 163-143-101-182-140-31-151-88-164-112 -196
		ST	83	27,31	196- 144-63-49-124-83-41-94 -196
15	196	MT	7	31,10	196-100-196
		ST	90	153,49	100- 54-156-61 -191-75-166-48-179-100
		ST	87	54,77	100- 26-114-43-102-103-146-184-78 -100
16	196	MT	0	0,00	196-196
		ST	88	59,42	196- 37-92-87 -119- 185-17-44 -196
		ST	85	47,25	196- 28-84-136-29-6-169-96-175-8 -196

MDT13: Gesamtdistanz 2476,33

ID	Dp	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	241	MT	180	188,83	241-4-129-90-22-228-209-117-16-1-194-75-241
2	241	MT	177	193,96	241-189-150-149-44-104-168-184-48-21-96-224-160-60-84-241
3	241	MT	178	119,55	241-91-33-131-57-114-200-19-180-223-94-39-51-154-241
4	241	MT	129	55,35	241-81-217-102-133-61-158-157-241
		ST	38	13,77	157- 211-15 -157
5	241	MT	45	11,70	241-193-142-241
		ST	84	30,17	142- 187-80-197-177-55-203 -142
		ST	47	18,66	193-161- 124-11 -193
6	242	MT	177	216,47	242-85-221-240-14-7-97-25-69-234-169-236-171-138-140-139-175-242
7	242	MT	103	56,03	242-121-100-29-151-183-188-213-212-242
		ST	38	12,20	29- 235-20 -29
		ST	35	12,11	213- 101-35 -213
8	242	MT	70	41,31	242-132-141-165-59-148-79-242
		ST	51	13,12	59- 115-125-214-231 -59
		ST	24	9,26	141- 153-56 -141
		ST	21	6,52	148- 105-227 -148
9	242	MT	148	58,83	242-182-137-174-49-87-113-136-62-77-198-242
		ST	19	16,93	49- 208-128 -49
10	242	MT	0	0,00	242-242
		ST	82	22,43	242-225-207- 106-202-64 -162- 30 -242
11	243	MT	174	303,04	243-186-31-219-89-38-93-78-41-199-45-8-226-82-190-243
12	243	MT	142	128,07	243-192-74-222-6-195-172-116-181-83-135-37-243
		ST	37	8,88	83- 28-230 -83
13	243	MT	137	183,96	243-111-156-42-191-167-120-53-103-112-243
		ST	41	38,48	42- 152-126 -42
14	243	MT	96	54,08	243-206-185-66-9-170-243
		ST	30	6,47	66- 73-24 -66
		ST	34	9,90	9- 12-32 -9
15	243	MT	55	32,61	243-145-3-205-10-243
		ST	28	12,34	145- 108-146-118 -145
		ST	37	12,71	243- 166-5 -243
		ST	41	6,44	205- 107-13 -205
16	244	MT	157	127,54	244-36-210-173-65-159-220-86-58-155-88-92-67-244
		ST	9	8,46	88- 50-71 -88
17	244	MT	79	43,68	244-144-163-63-26-238-244
		ST	81	25,46	26- 99-179 -218- 196-17-23 -26
18	244	MT	142	145,06	244-232-134-95-130-76-98-110-68-47-215-27-122-244
		ST	36	6,30	232- 147-2 -232
19	244	MT	43	14,18	244-72-143-244
		ST	80	27,20	72- 201-123 -204- 34-239-237 -72
		ST	22	7,39	244- 18-54 -244
		ST	25	11,52	72- 43 -72
20	244	MT	179	165,35	244-119-164-178-176-109-70-46-52-216-40-233-127-229-244

MDT14: Gesamtdistanz 2639,06

ID	Dp	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	241	MT	105	150,32	241-33-57-114-117-209-223-241
		ST	74	36,96	223- 180-19-200-1-16 -223
2	241	MT	174	192,28	241-161-150-149-44-104-168-184-48-21-96-224-160-60-189-241
3	241	MT	126	80,11	241-75-131-194-154-51-129-4-61-158-241
		ST	37	20,38	51- 90-94-39 -51
4	241	MT	70	23,54	241-142-193-157-241
		ST	38	13,77	157- 15-211 -157
		ST	68	25,51	193- 11-124 -84-91-193
5	241	MT	18	14,27	241-81-241
		ST	86	25,92	81- 20-235-187-29-217 -81
		ST	75	29,69	81- 80-197-177-55-203 -81
6	242	MT	131	179,13	242-136-139-140-138-171-236-169-234-69-25-97-113-242
		ST	49	55,28	236-42- 126-152 -236
7	242	MT	0	0,00	242-242
		ST	78	27,71	242- 106-64-202-77-198-30 -242
		ST	88	47,56	242- 100-101-35-151-188-213 -242
8	242	MT	18	29,90	242-165-242
		ST	90	40,05	165- 59-183-102 -133- 125-214-231-115 -165
		ST	71	20,89	165- 148-105-227-79-132-141 -165
9	242	MT	74	52,40	242-85-221-240-174-137-182-242
		ST	57	21,69	240- 201-123-239-204 -240
		ST	46	29,26	174- 49-87-128-208 -174
10	242	MT	0	0,00	242-242
		ST	61	20,50	242- 225-212 -121- 207-162 -242
11	243	MT	180	301,41	243-6-219-89-38-93-78-41-199-45-8-226-82-195-172-116-243
12	243	MT	0	0,00	243-243
		ST	37	12,71	243- 166-5 -243
		ST	85	50,39	243- 112-185-206-32 -243
13	243	MT	31	19,61	243-145-3-243
		ST	84	26,55	3- 111-156-13-107-205-10 -3
		ST	57	27,76	145-175-62- 146-118-108 -145
14	243	MT	180	210,70	243-192-103-53-120-191-167-31-186-222-74-170-243
15	243	MT	0	0,00	243-243
		ST	88	65,95	243-37-135- 28-230-83 -181-243
		ST	90	48,47	243- 12-9-66-24-73-190 -243
16	244	MT	89	96,89	244-67-92-155-58-159-210-36-244
		ST	9	3,18	244- 238 -244
		ST	27	16,73	210- 65-173 -210
		ST	52	99,57	159-22-228- 86-220 -159
17	244	MT	46	30,75	244-144-163-244
		ST	41	28,98	163- 63-88-50-71 -163
		ST	87	43,63	163- 23-26-218-122-27-127-229-196-17 -163
18	244	MT	20	14,16	244-72-244
		ST	89	27,64	72- 34-179-99-237-43 -72
		ST	69	23,51	244- 18-54-56-153-143 -244
19	244	MT	139	160,69	244-119-164-109-70-46-52-216-40-233-244
		ST	37	17,90	164- 176-178 -164
20	244	MT	82	98,77	244-14-7-134-68-47-215-244
		ST	59	61,12	68-110-98-76- 95-130 -68
		ST	39	14,90	134- 232-2-147 -134

MDT15: Gesamtdistanz 2971,52

ID	Dp	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	241	MT	96	150,24	241-223-209-117-114-57-241
		ST	74	36,96	223- 16-1-200-19-180 -223
2	241	MT	89	163,47	241-189-224-96-44-104-168-21-160-241
		ST	35	20,99	168- 184-48 -168
		ST	20	7,07	241- 193 -241
		ST	36	36,85	189- 60-149-150 -189
3	241	MT	11	35,66	241-154-241
		ST	64	36,52	154- 51-39-94-90-129 -154
		ST	89	66,34	154- 15-61-210-173-65-4 -154
4	241	MT	0	0,00	241-241
		ST	86	53,81	241- 33-131-194-75-211-157 -241
		ST	82	35,47	241- 161-11-124-84-91 -241
5	241	MT	0	0,00	241-241
		ST	89	34,08	241- 142-80-197-177-55 -241
		ST	90	44,04	241- 203-81-217-102-133-158 -241
6	242	MT	77	173,89	242-97-25-69-234-169-236-140-242
		ST	70	73,08	236- 138-171-42-126-152 -236
7	242	MT	10	40,02	242-37-242
		ST	78	36,02	242- 121-100-101-35-213-212 -242
		ST	90	44,83	37- 151-29-187-235-20 -135-37
8	242	MT	0	0,00	242-242
		ST	83	53,23	242- 148-59-115-125-214-231-183-188 -242
		ST	84	29,97	242- 225-207-106-64-202-77-198 -242
9	242	MT	0	0,00	242-242
		ST	78	54,20	242- 85-240-201-221-153-56 -242
		ST	33	7,58	242- 30-162 -242
10	242	MT	0	0,00	242-242
		ST	83	36,41	242- 132-141-165-105-227-79 -242
		ST	88	64,05	242- 182-137-174-208-128-49-87-113 -242
11	243	MT	166	350,94	243-222-6-41-78-93-38-89-219-186-31-167-191-243
		ST	4	30,81	41- 45-199 -41
12	243	MT	49	86,14	243-74-172-116-243
		ST	71	27,95	116- 181-83-28-230 -116
		ST	51	43,12	172- 195-8-226-82 -172
13	243	MT	0	0,00	243-243
		ST	84	40,24	243- 10-205-107-13-156-111 -243
		ST	68	28,52	243- 3-145-5-166 -243
14	243	MT	79	107,47	243-120-53-103-192-243
		ST	48	19,00	192- 185-112 -192
		ST	53	22,25	192- 24-73-66 -192
15	243	MT	0	0,00	243-243
		ST	80	50,07	243- 108-175-139-136-62-146-118 -243
		ST	85	30,43	243- 32-12-206-9-190-170 -243
16	244	MT	38	53,35	244-67-92-244
		ST	84	116,65	92-159-22-228- 86-220 -58-92
		ST	23	17,25	67- 119 -67
		ST	28	13,63	244- 36-54-18 -244
17	244	MT	0	0,00	244-244
		ST	89	32,91	244- 143-43-179-99 -244
		ST	88	37,30	244- 72-123-204-34-239-237 -244
18	244	MT	20	51,08	244-14-244
		ST	73	49,83	14- 215-47-2-147-232 -14
		ST	87	93,88	14-7- 95-130 -76-98-110- 68-134 -14
19	244	MT	77	159,49	244-52-46-70-109-155-244
		ST	82	41,47	155- 164-178-176-71-50-88 -155
		ST	9	3,18	244- 238 -244
20	244	MT	0	0,00	244-244
		ST	90	43,71	244- 26-23-17-63-163-144 -244
		ST	90	86,02	244- 218-122-27-216-40-233-127-229-196 -244

MDT16: Gesamtdistanz 2845,53

ID	Dp	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	289	MT	171	212,65	289-44-224-266-104-59-136-119-275-110-248-169-131-69-289
2	289	MT	40	20,00	289-86-265-289
		ST	50	12,56	289- 264 -172- 39 -289
		ST	80	38,61	265-160- 185-251-194 -256-220-265
3	289	MT	131	79,68	289-72-8-90-112-41-276-25-218-285-289
		ST	43	20,55	41- 140-213 -147-41
4	289	MT	168	135,18	289-77-60-200-105-103-243-20-216-261-273-150-28-277-253-180-281-289
5	290	MT	175	253,77	290-75-202-165-187-35-193-257-24-226-56-10-51-144-280-288-148-198-290
6	290	MT	141	237,36	290-260-283-32-115-48-43-70-158-142-258-263-186-120-152-290
		ST	32	8,37	32- 31-79 -32
7	290	MT	174	177,81	290-284-53-233-4-157-240-89-71-85-222-92-235-27-5-171-15-290
8	290	MT	108	59,38	290-184-49-67-117-11-247-153-290
		ST	61	12,78	184- 255-269-254 -184
9	290	MT	0	0,00	290-290
		ST	73	32,16	290- 38-221-17-146 -204-54- 245 -290
		ST	82	24,74	290- 66-114-177 -135- 272-282 -290
10	290	MT	51	17,50	290-179-156-100-290
		ST	81	33,66	100- 3-173-217 -262- 231-242 -100
		ST	25	8,24	179- 109-111 -179
11	291	MT	170	203,99	291-84-197-149-212-42-68-205-80-159-286-34-287-76-19-291
12	291	MT	0	0,00	291-291
		ST	81	24,26	291- 98-195 -166- 267-102-252 -291
		ST	83	41,62	291- 228-139-81-167 -33- 108-47-163 -291
13	291	MT	175	76,45	291-106-215-182-30-121-128-230-278-143-122-291
14	291	MT	160	165,09	291-21-45-22-161-164-93-6-214-271-124-132-201-12-291
15	291	MT	139	114,19	291-129-46-259-225-37-141-192-154-1-246-291
		ST	34	20,18	46- 52-241-162-196 -46
16	291	MT	78	54,95	291-175-279-270-137-78-291
		ST	36	8,58	137- 87-74 -137
		ST	53	35,17	78- 14-116 -91-78
17	292	MT	162	169,73	292-151-250-234-97-29-36-219-26-123-199-189-9-178-207-208-292
18	292	MT	141	92,64	292-40-18-82-203-61-227-239-155-23-292
		ST	27	8,77	155- 183-170 -155
19	292	MT	105	83,30	292-232-95-210-130-88-238-16-236-223-292
		ST	39	20,40	95- 127-99 -55-95
		ST	24	6,69	130- 138-229 -130
20	292	MT	145	161,00	292-237-126-50-206-94-7-244-134-63-174-73-292
		ST	27	13,03	73- 13-113 -73
21	292	MT	87	67,10	292-209-58-101-268-190-125-145-292
		ST	47	11,58	190- 118-176 -190
		ST	26	8,71	145- 83-168 -145
22	292	MT	0	0,00	292-292
		ST	79	40,43	292-191-107- 133-188-249-211-181 -292
		ST	67	32,67	292- 274-65-2-96-62-57 -64-292

MDT17: Gesamtdistanz 3086,32

ID	Dp	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	289	MT	173	215,11	289-44-224-266-104-59-136-119-275-110-248-169-200-72-77-289
2	289	MT	0	0,00	289-289
		ST	50	12,56	289- 264-172-39 -289
3	289	MT	85	108,11	289-69-105-103-243-20-150-28-60-289
		ST	34	15,97	150- 273-261 -150
		ST	55	23,56	69- 112-90-8 -69
4	289	MT	24	34,29	289-220-289
		ST	75	39,24	220- 194-256-276 -25- 185-251 -220
		ST	74	49,76	220- 41-140-213-147-131 -220
5	289	MT	0	0,00	289-289
		ST	75	31,70	289-86-285- 218-160-265 -289
6	289	MT	0	0,00	289-289
		ST	84	42,59	289- 180 -277-253-190- 176-118-281 -289
7	290	MT	134	251,29	290-187-35-193-257-24-226-56-10-51-61-288-135-290
		ST	40	31,62	187- 202-165-171-5 -187
8	290	MT	131	225,22	290-260-283-115-48-43-70-158-142-258-263-186-120-152-290
		ST	42	22,19	283- 79-31-32 -283
9	290	MT	108	99,39	290-262-284-53-233-92-235-27-15-290
		ST	65	95,92	92-4-157- 240-89 -71-85-222-92
10	290	MT	7	11,94	290-100-290
		ST	82	41,33	100- 204-54-217-173-3-255 -100
		ST	82	29,43	100- 242-231-269-254-184 -100
11	290	MT	0	0,00	290-290
		ST	78	25,22	290- 179-111 -247- 156 -290
		ST	83	71,06	290- 38-75-144-280-148-198 -101- 114-66-177 -290
12	290	MT	0	0,00	290-290
		ST	83	51,80	290- 49-67 -117-11-153- 109 -290
		ST	77	19,26	290- 282-272-146-17-221-245 -290
13	291	MT	122	201,73	291-286-159-80-205-68-42-212-149-34-76-291
		ST	45	13,69	34- 287-197 -34
14	291	MT	24	17,76	291-246-291
		ST	70	58,86	246- 1-154-45-21-108-47-163 -246
		ST	80	49,75	246- 196-162-241-52-259-26-46 -129-246
15	291	MT	19	33,72	291-182-291
		ST	45	15,46	291- 98-252-102-267 -291
		ST	56	18,87	182-30- 121-128 -182
		ST	41	13,86	182- 215-33 -182
16	291	MT	87	113,14	291-278-230-124-271-132-201-12-291
		ST	85	79,07	201- 22 -161-164-93- 6-214 -201
17	291	MT	0	0,00	291-291
		ST	70	19,72	291- 19-228-139-81-167-106 -291
		ST	85	49,17	291- 175-270-279 -88-166- 195 -291
18	291	MT	89	88,29	291-137-78-216-91-143-122-84-291
		ST	41	11,21	91- 14-116 -91
		ST	36	8,58	137- 87-74 -137
19	292	MT	158	204,07	292-73-174-208-207-178-9-189-141-192-37-199-225-219-36-29-97-234-292
		ST	16	9,51	36- 123 -36
20	292	MT	161	188,09	292-50-206-63-134-244-7-94-239-227-203-82-18-292
21	292	MT	16	33,95	292-223-236-292
		ST	81	42,89	236- 16-238-130-138-229-210 -236
		ST	75	38,97	236- 133-127-99 -55- 95 -236
22	292	MT	53	43,59	292-151-250-23-292
		ST	69	35,24	23- 155-183-170-62-57 -23
		ST	27	14,65	250- 113-13 -250
23	292	MT	0	0,00	292-292
		ST	68	38,49	292- 181-232-249-188-107-191 -292
		ST	84	49,86	292- 211-145-83-168-125 -268-58-292
24	292	MT	0	0,00	292-292
		ST	81	26,46	292- 64-237-126-96-2-65-274 -292
		ST	46	19,08	292- 40-209 -292

MDT18: Gesamtdistanz 3442,90

ID	Dp	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	289	MT	130	214,98	289-104-59-136-119-275-110-248-169-105-200-289
		ST	43	27,13	169- 140-213-147 -169
2	289	MT	33	62,81	289-44-25-289
		ST	70	32,15	25- 256-112-41-276 -25
		ST	52	52,38	44- 120-186-263-266-224 -44
3	289	MT	65	109,91	289-20-243-103-216-28-289
		ST	66	30,35	216- 78-74-87-137 -216
		ST	43	33,86	28- 150-261-273 -28
4	289	MT	0	0,00	289-289
		ST	85	51,04	289- 218-185-251-194-220-265 -289
		ST	50	12,56	289- 264-172-39 -289
5	289	MT	0	0,00	289-289
		ST	79	63,57	289- 160-69-90-131-8-72-77 -289
6	289	MT	0	0,00	289-289
		ST	68	37,72	289- 86-285-117-11-281 -289
		ST	85	46,00	289- 180-118-176-190-253-277-60 -289
7	290	MT	109	262,06	290-75-187-257-24-226-56-10-51-61-203-101-290
		ST	66	49,83	187- 193-35-5-171-165-202 -187
8	290	MT	98	242,23	290-283-115-48-258-142-43-158-70-157-4-290
		ST	42	22,19	283- 79-31-32 -283
9	290	MT	17	75,43	290-92-290
		ST	80	22,46	290- 177-135-272-282 -290
		ST	74	84,53	92- 235-27-85-71-89-240 -222-92
10	290	MT	14	39,28	290-262-290
		ST	77	28,81	262- 231-242-269-254-152 -262
		ST	81	38,42	262- 260-233-53-284-217-173-3 -262
11	290	MT	0	0,00	290-290
		ST	83	81,27	290- 66-114-198-148-288-280-144-15-204-54 -290
		ST	78	21,97	290- 38-221-17-146-245-156 -290
12	290	MT	0	0,00	290-290
		ST	62	26,30	290- 179-109-153-111 -290
		ST	85	40,80	290- 247-67-49-184-255-100 -290
13	291	MT	5	35,18	291-76-291
		ST	61	35,13	76- 143-230-278-122 -76
		ST	53	27,12	76- 91-116-14 -76
		ST	56	16,74	291- 252-195-267 -291
14	291	MT	0	0,00	291-291
		ST	68	17,17	291- 167-81-139-228-106 -291
		ST	82	52,05	291- 175-270-279-130-88-102 -291
15	291	MT	25	76,84	291-149-291
		ST	67	21,11	149- 197-287-34 -149
		ST	70	134,58	149- 286-159-80-205-68-42-212-149
16	291	MT	42	122,34	291-124-271-161-291
		ST	66	57,55	161-164-93- 6-214 -161
		ST	61	37,99	161- 22-1-154 -161
17	291	MT	0	0,00	291-291
		ST	85	82,67	291- 12-128-121-132-201-45-21-108-47-163 -291
		ST	78	65,72	291- 166-219-36-123-26-46-98 -291
18	291	MT	0	0,00	291-291
		ST	85	54,36	291- 129-241-52-259-162-196-246 -291
		ST	82	46,65	291- 19-84-215-182-30-33 -291
19	292	MT	80	174,67	292-208-207-178-244-7-94-206-50-292
		ST	56	104,86	178-9-189-141- 192-37-225-199 -178
		ST	29	26,97	208-134- 63-174 -208

Fortsetzung MDT18

ID	Dp	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
20	292	MT	22	39,30	292-18-82-292
		ST	82	51,02	82- 227-239-155-183-170 -82
21	292	MT	0	0,00	292-292
		ST	85	73,85	292- 95-210-229-138-55-99-127-107 -292
		ST	85	43,55	292- 151-223-133-188-249 -292
22	292	MT	0	0,00	292-292
		ST	81	77,01	292- 274-234 -97-29- 238-16-236-191 -292
		ST	85	33,87	292- 65-2-96-126-62-57-23 -292
23	292	MT	0	0,00	292-292
		ST	84	36,92	292- 268-58-209-40 -292
24	292	MT	0	0,00	292-292
		ST	85	48,43	292- 250-13-113-73-237-64 -292
		ST	76	39,22	292- 232-83-168-125-145-211-181 -292

MDT19: Gesamtdistanz 1141,83

ID	Dp	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	73	MT	0	0,00	73-73
		ST	96	204,51	73-27-6-33-65-10-31- 20-18 -71-36-73
2	74	MT	0	0,00	74-74
		ST	100	144,33	74-26-23-1-64-47- 12-68 -74
		ST	93	83,97	74-49-61-37-58- 7-43 -74
3	75	MT	43	33,23	75-69-8-75
		ST	81	82,82	8-45-15- 16-3-56 -8
		ST	70	31,52	8-34-44-22-54 -8
4	76	MT	196	288,49	76-13-59-51-17-41-50-57-24-63-5-72-53-46-28-29-52-76
5	77	MT	0	0,00	77-77
		ST	74	90,33	77-66-48-21-55-4-40-67-14-77
		ST	97	61,81	77-30- 42-19-9 -11-60-70-77
6	78	MT	0	0,00	78-78
		ST	98	120,82	78-35-2- 38-39 -32-62-25-78

MDT20: Gesamtdistanz 1180,69

ID	Dp	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	73	MT	0	0,00	73-73
		ST	96	204,51	73-27-6-33- 65-10-31-20-18 -71-36-73
2	74	MT	0	0,00	74-74
		ST	93	83,97	74- 49-61 -37-58- 7-43 -74
		ST	100	144,33	74- 68-12 -47-64-1-23-26-74
3	75	MT	0	0,00	75-75
		ST	99	99,34	75-45-15- 16-3-56-34 -75
		ST	97	63,35	75- 8-54-22-44 -62-69-75
4	76	MT	141	277,54	76-28-72-5-63-24-57-50-41-17-51-59-13-76
		ST	13	31,33	28- 53-46 -28
		ST	42	13,50	76- 29-52 -76
5	77	MT	0	0,00	77-77
		ST	74	90,33	77-14-67- 40-4-55-21-48-66 -77
		ST	97	61,81	77-70-60- 11-9-19-42 -30-77
6	78	MT	0	0,00	78-78
		ST	96	110,68	78-25-32- 39-38-2-35 -78

MDT21: Gesamtdistanz 1198,38

ID	Dp	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	73	MT	0	0,00	73-73
		ST	96	204,51	73- 27 -6-33- 65 - 10 - 31 - 20 - 18 -71-36-73
2	74	MT	0	0,00	74-74
		ST	93	83,97	74- 43 - 7 -58-37- 61 - 49 -74
		ST	100	144,33	74- 68 - 12 - 47 - 64 -1- 23 -26-74
3	75	MT	0	0,00	75-75
		ST	99	99,34	75- 45 - 15 - 16 - 3 - 56 - 34 -75
		ST	97	63,35	75-69- 62 - 44 - 22 - 54 - 8 -75
4	76	MT	0	0,00	76-76
		ST	100	239,89	76-13- 59 - 51 - 17 -41-50-57-24-63- 46 -76
		ST	96	100,16	76- 52 - 28 -5-72- 53 - 29 -76
5	77	MT	0	0,00	77-77
		ST	97	61,81	77- 70 - 60 - 11 - 9 - 19 - 42 - 30 -77
		ST	74	90,33	77- 14 - 67 - 40 - 4 - 55 - 21 - 48 - 66 -77
6	78	MT	0	0,00	78-78
		ST	96	110,68	78- 35 - 2 - 38 - 39 - 32 -25-78

MDT22: Gesamtdistanz 1770,77

ID	Dp	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	145	MT	189	253,14	145-39-93-141-116-82-84-27-80-57-29-73-7-96-122-145
2	145	MT	0	0,00	145-145
		ST	91	75,47	145- 28 - 102 -101-25-63-129- 53 - 40 -145
3	146	MT	148	165,37	146-50-128-51-118-18-4-103-113-61-22-90-146
		ST	39	12,52	22- 38 - 8 - 16 -22
4	146	MT	0	0,00	146-146
		ST	90	62,09	146-23-42-35- 10 - 104 - 34 - 109 -146
		ST	90	43,38	146-127- 97 - 74 -140- 106 -133-146
5	147	MT	190	214,53	147-32-62-37-88-126-87-6-117-79-70-67-105-76-147
6	147	MT	155	81,00	147-56-24-43-92-41-136-91-33-147
		ST	11	9,36	56- 135 - 46 -56
7	148	MT	123	252,27	148-134-121-119-49-143-69-9-120-26-110-12-142-148
8	148	MT	74	48,85	148-132-65-77-19-148
		ST	91	54,89	77- 15 - 125 -45- 68 - 108 -139- 3 - 5 -77
9	149	MT	0	0,00	149-149
		ST	72	20,55	149- 85 - 1 - 64 - 83 -149
		ST	92	43,66	149-21- 124 - 52 - 14 - 112 -138-149
10	149	MT	184	121,59	149-36-95-86-89-94-60-58-100-30-2-48-107-149
11	150	MT	185	187,58	150-17-98-130-78-20-137-31-131-55-81-144-72-150
		ST	2	6,95	130- 111 -130
12	150	MT	84	48,53	150-54-115-75-71-99-150
		ST	8	13,24	54- 59 -54
		ST	88	55,78	115- 44 - 123 -11- 66 - 47 -114-13-115

MDT23: Gesamtdistanz 1874,81

ID	Dp	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	145	MT	166	245,11	145-122-96-57-29-7-73-84-82-116-141-93-39-145
		ST	23	17,23	84- 80-27 -84
2	145	MT	0	0,00	145-145
		ST	93	62,78	145- 28-102 -101-25-63- 34 -145
		ST	76	72,14	145-129-13- 11-66-47-114-53-40 -145
3	146	MT	116	159,68	146-90-113-103-4-18-118-51-128-50-146
		ST	71	33,63	113- 38-8-16-22-61 -113
4	146	MT	0	0,00	146-146
		ST	95	63,86	146- 133-140-109-104-10-35-42 -23-146
		ST	61	36,94	146- 106-74-97-127 -146
5	147	MT	177	169,03	147-32-62-87-6-117-79-70-67-105-136-41-147
6	147	MT	0	0,00	147-147
		ST	89	43,64	147- 56-24-46-135-33-91 -147
		ST	75	51,75	147- 15-125-68-108 -45-147
7	148	MT	167	321,50	148-142-12-110-26-120-9-69-143-49-126-88-37-119-121-134-148
8	148	MT	0	0,00	148-148
		ST	90	57,04	148-132-65- 77-139-5-3 -19-148
9	149	MT	0	0,00	149-149
		ST	85	27,66	149- 83-64-1-76-85 -149
		ST	89	35,36	149- 21-36-112-14-138 -149
10	149	MT	0	0,00	149-149
		ST	95	72,36	149- 107-48-2-30-100 -149
		ST	92	88,40	149- 124-58 -60-94-89- 86-95-52 -149
11	150	MT	161	201,03	150-72-92-81-55-131-31-137-98-20-78-75-150
		ST	14	19,65	98- 111-130 -98
12	150	MT	0	0,00	150-150
		ST	83	42,00	150- 123-44-115-59 -54-150
		ST	88	54,02	150- 99-71-17-144-43 -150

MDT24: Gesamtdistanz 2059,76

ID	Dp	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	145	MT	19	53,23	145-122-73-145
		ST	77	152,69	73- 93 -141-116-82-73
		ST	76	82,79	73- 84-27-80-57-29 -96- 7 -73
2	145	MT	0	0,00	145-145
		ST	93	79,71	145- 129-114-13-11-66-47-39-53-40 -145
		ST	93	62,78	145- 34-63-25 -101- 102-28 -145
3	146	MT	84	159,43	146-128-51-118-18-4-103-90-146
		ST	85	52,48	128- 8-38-16-22-61-113 -128
4	146	MT	0	0,00	146-146
		ST	90	43,38	146- 127-97-74-140-106-133 -146
		ST	84	59,09	146- 23-50-42-35-10-104-109 -146
5	147	MT	0	0,00	147-147
		ST	93	148,72	147-37- 88-126-87-6 -62-147
		ST	94	63,95	147- 32-45-108-68-125-15 -147
6	147	MT	0	0,00	147-147
		ST	85	40,53	147- 56-24-46-135-33 -147
		ST	91	56,62	147- 136-64-85-1-76-91 -147
7	148	MT	96	220,07	148-134-121-119-49-143-69-9-12-142-148
		ST	27	45,67	12- 120-26-110 -12
8	148	MT	0	0,00	148-148
		ST	90	57,04	148- 19-3-5-139-77-65-132 -148
9	149	MT	0	0,00	149-149
		ST	93	33,44	149- 107-83-138-14-112 -149
		ST	92	70,95	149- 100-30-2-48-21 -149
10	149	MT	0	0,00	149-149
		ST	89	86,96	149- 124-95-86-89-94-60-58 -149
		ST	88	113,69	149- 36-52 -67-70-79- 117 -105-149
11	150	MT	0	0,00	150-150
		ST	94	96,54	150-78- 20-130-17-71-99 -150
		ST	95	82,07	150- 72-144-43 -92- 41-59 -150
12	150	MT	0	0,00	150-150
		ST	87	40,71	150- 75-115-44-123-54 -150
		ST	91	157,20	150- 81-55 -131-31-137- 98-111 -150

MDT25: Gesamtdistanz 2295,43

ID	Dp	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	217	MT	179	212,65	217-47-78-117-56-3-2-103-24-42-58-79-36-123-172-217
2	217	MT	100	55,13	217-59-23-214-120-105-150-217
		ST	69	21,62	59- 180-110-64-39 -59
3	217	MT	114	73,89	217-67-86-29-153-101-190-169-174-151-140-30-167-217
		ST	22	10,01	169- 161-13 -169
4	218	MT	177	185,91	218-148-102-31-84-195-107-69-182-21-189-156-218
5	218	MT	0	0,00	218-218
		ST	73	32,24	218-207- 108-16-73 -5-218
6	218	MT	111	149,52	219-124-6-88-194-168-186-82-26-171-11-219
		ST	23	10,99	124- 205-41-162 -124
		ST	34	16,89	26- 137-12 -26
7	219	MT	163	210,95	219-209-95-77-32-141-14-147-60-15-20-130-143-43-4-219
		ST	11	19,24	143- 18-1 -143
8	219	MT	131	103,94	219-202-52-45-106-63-198-94-80-115-152-219
		ST	48	11,18	219- 135-177-149 -219
9	219	MT	136	243,06	220-210-62-159-10-91-129-55-28-99-70-40-100-220
		ST	42	22,26	99- 213-112-66 -99
10	220	MT	179	117,64	220-144-37-98-38-193-142-192-90-27-54-203-166-216-191-178-220
11	220	MT	13	25,75	220-158-220
		ST	89	43,33	158- 119-68 -104- 163-199-126 -158
		ST	74	26,20	158- 139-157-184-83-146-133 -158
12	220	MT	180	171,01	221-116-212-132-22-61-196-185-34-44-17-8-96-165-155-221
13	221	MT	85	59,10	221-201-97-50-74-200-221
		ST	90	39,18	50-49-160-93- 208-57 -50
14	221	MT	0	0,00	221-221
		ST	73	27,61	221-215-170- 131-122 -109-221
		ST	81	41,50	221- 51-48 -145- 183-134 -71-114- 75-181 -221
15	221	MT	175	203,41	222-127-121-118-76-35-128-85-7-25-72-33-92-211-46-176-222
16	222	MT	76	64,85	222-204-187-197-89-138-179-222
		ST	34	22,02	138- 164-9 -81-138
		ST	52	16,05	89-173- 136-175 -89
		ST	15	10,80	222- 113-188 -222
17	222	MT	0	0,00	222-222
		ST	87	47,51	222- 206-154 -87-111-53- 125-19-65 -222

MDT26: Gesamtdistanz 2427,13

ID	Dp	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	217	MT	166	211,16	217-47-78-117-56-3-2-103-24-42-58-79-36-217
2	217	MT	0	0,00	217-217
		ST	86	52,96	217- 150-120-214-23 -105-217
		ST	87	46,23	217-167-30-140- 68-119-67 -217
3	217	MT	0	0,00	217-217
		ST	85	36,74	217- 59-39-64-110-180-172 -217
		ST	89	71,44	217-86- 123-29-153 -101- 216-191-161-13-169 -190-217
4	218	MT	129	165,22	218-102-84-31-69-182-35-128-85-118-218
		ST	49	33,76	118- 76-189 -21- 156 -118
5	218	MT	0	0,00	218-218
		ST	85	33,78	218- 73-16-121 -127- 108 -218
		ST	71	28,09	218- 131-122-109 -148- 5 -218
6	218	MT	15	17,60	218-197-207-218
		ST	87	60,49	197-187- 89-173-136-175-183-134-145 -197
7	219	MT	1	32,63	219-209-219
		ST	86	58,51	209- 12-26-171-11-202-205-41-162-124 -209
		ST	89	111,53	209-88-194-168-186-82- 137 -209
8	219	MT	160	204,68	219-43-143-130-20-15-60-147-14-141-32-77-95-6-219
		ST	11	19,24	143- 1-18 -143
9	219	MT	17	24,15	219-152-219
		ST	90	77,96	152-52-45-106-63-198- 94-80 -152
		ST	63	18,16	219-4- 135-177-149 -219
10	220	MT	136	243,06	220-100-40-70-99-28-55-129-91-10-159-62-210-220
		ST	42	22,26	99- 66-112-213 -99
11	220	MT	0	0,00	220-220
		ST	85	37,84	220- 139-133-146-83-184-157-144 -220
		ST	88	61,83	220- 37-98-38-193-142 -192-178-220
12	220	MT	0	0,00	220-220
		ST	88	66,33	220-174- 151-158-104-115-163-199-126 -220
13	221	MT	0	0,00	221-221
		ST	81	34,39	221- 181-201-97-200-170-215 -221
		ST	90	31,22	221- 51-48-71-116-75-114 -221
14	221	MT	104	113,62	221-74-107-195-93-50-221
		ST	75	31,10	93- 160-49-57-208 -93
15	221	MT	157	170,08	221-212-132-22-61-196-185-34-44-17-8-96-165-155-221
16	222	MT	62	68,60	222-53-54-46-176-111-87-222
		ST	58	34,89	54- 203-166 -90-27-54
		ST	56	121,36	46- 92 -25-7-72- 33 -211-46
17	222	MT	0	0,00	222-222
		ST	80	55,46	222- 188-113 -138-81- 9-164-179 -222
		ST	68	30,74	222-204- 154-206-65-125-19 -222

MDT27: Gesamtdistanz 2592,70

ID	Dp	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	217	MT	147	203,59	217-79-58-42-24-103-2-3-56-117-78-217
		ST	26	46,61	117- 60-15 -117
2	217	MT	0	0,00	217-217
		ST	86	52,96	217- 105-23-214-120-150 -217
		ST	75	46,07	217- 167-30-140-174-169-13-161-190 -217
3	217	MT	0	0,00	217-217
		ST	75	45,02	217- 110-180-123-153-101-29-86 -217
		ST	89	50,18	217- 172-36-47-39-64-59-67 -217
4	218	MT	121	175,28	218-74-195-107-69-182-102-218
		ST	32	37,42	102- 21-31-84 -102
5	218	MT	0	0,00	218-218
		ST	79	59,79	218- 156-189-76-118-121-16 -218
		ST	69	30,18	218- 73-108-127-207 -218
6	218	MT	0	0,00	218-218
		ST	71	28,09	218- 131-122-109-148-5 -218
7	219	MT	0	0,00	219-219
		ST	90	63,10	219- 149-135-11-171-26-12-137 -219
		ST	89	48,33	219- 202-152-115-199-163-104-177 -219
8	219	MT	35	48,93	219-4-43-143-219
		ST	70	94,67	143-130-20-147- 14-141-18 -143
		ST	65	64,98	143- 1-32-77 -95- 41-162-205 -143
9	219	MT	0	0,00	219-219
		ST	90	100,64	219- 80-94-198 -63-106-45-52-219
		ST	89	140,42	219- 124-6-88-194-168-186-82-209 -219
10	220	MT	120	228,51	220-210-62-70-159-10-91-129-55-28-220
		ST	50	36,92	28- 99-66-112-213 -28
11	220	MT	0	0,00	220-220
		ST	65	27,83	220- 157-184-83-146-139 -220
		ST	72	70,40	220- 178-191-216-90-27 -192-220
12	220	MT	0	0,00	220-220
		ST	90	46,43	220- 151-119-68-158-126-133 -220
		ST	84	72,00	220- 142-193-40-100-38-98-37-144 -220
13	221	MT	0	0,00	221-221
		ST	75	33,97	221- 114-116-71-145-48-51 -221
		ST	86	40,65	221- 75-155-165-97-200-201 -221
14	221	MT	72	75,40	221-96-17-8-50-221
		ST	90	39,18	50- 49-160-93-208-57 -50
15	221	MT	0	0,00	221-221
		ST	37	12,06	221- 170-215 -221
		ST	87	142,45	221- 181-44-34-185-196 -61-22-132-212-221
16	222	MT	12	66,55	222-211-46-222
		ST	80	57,96	46- 176-87-111-53-203-166-54 -46
		ST	85	151,49	211- 92-25-85-35-128 -7-72- 33 -211
17	222	MT	0	0,00	222-222
		ST	86	68,97	222- 188-89-173-136-175-134-183-197-187 -222
		ST	79	54,92	222- 179-164-9-81-138-113 -222
18	222	MT	0	0,00	222-222
		ST	68	30,74	222- 19-125-65-206-154-204 -222

MDT28: Gesamtdistanz 3072,30

ID	Dp	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	289	MT	138	246,42	289-175-235-229-135-113-195-33-82-107-256-53-57-96-236-289
		ST	28	23,98	82- 58-210 -82
2	289	MT	79	70,62	289-83-146-13-23-154-26-55-47-289
		ST	46	24,39	154- 36-147-142-240 -154
		ST	27	9,72	83- 164-52 -83
3	289	MT	89	110,82	289-104-234-67-187-197-80-289
		ST	49	36,20	197- 30-24-95-64-50 -197
		ST	29	8,21	67- 272-217 -67
4	289	MT	161	75,60	289-288-161-94-87-69-268-51-40-246-289
5	290	MT	169	170,33	290-108-153-124-269-168-225-176-287-140-32-92-201-18-251-290
6	290	MT	120	86,74	290-276-126-180-249-86-244-122-290
		ST	24	9,63	180- 259-119 -180
		ST	22	7,22	86- 35 -86
7	290	MT	78	43,67	290-179-100-274-17-157-233-10-290
		ST	81	27,59	17- 192-22-166-129-277 -17
8	290	MT	129	60,57	290-263-98-62-206-14-54-123-290
		ST	30	6,20	290- 118-160 -290
9	291	MT	166	167,36	291-91-196-15-220-239-162-224-245-285-200-215-156-291
10	291	MT	59	47,11	291-1-248-208-21-145-29-291
		ST	68	37,10	208-286-222-7- 242 -16-208
		ST	40	9,45	248- 2-258 -248
11	291	MT	15	15,33	291-275-291
		ST	71	31,34	275- 49-205 -232- 28-20 -275
		ST	84	24,28	275- 141-43-42-151-34-134 -275
12	291	MT	58	64,56	291-262-199-191-211-170-291
		ST	80	45,31	191-241-39- 11-204 -254-130-191
		ST	22	8,42	211- 212-178 -211
		ST	9	10,37	262- 106-139 -262
13	292	MT	162	237,83	292-31-3-252-125-167-183-120-194-198-5-45-137-186-218-292
14	292	MT	102	91,27	292-214-136-231-270-216-228-8-257-292
		ST	30	12,69	136- 273-227 -136
15	292	MT	0	0,00	292-292
		ST	84	35,79	292- 163-247-25-114-97 -292
		ST	85	43,31	292- 267-226-264-284-213 -219-292
16	292	MT	101	52,68	292-127-159-283-271-61-221-181-66-292
		ST	69	33,02	271-253- 133-12-73 -172-271
17	293	MT	170	253,88	293-169-121-237-148-81-255-74-250-150-105-89-282-174-59-293
18	293	MT	160	191,95	293-110-230-111-102-132-99-63-41-78-90-243-203-293
19	293	MT	99	49,85	293-79-185-115-202-76-109-131-46-293
		ST	59	18,23	185-128- 152-158 -185
20	293	MT	77	48,66	293-6-72-155-88-38-27-293
		ST	21	4,84	88- 44 -88
		ST	72	33,52	88- 68-56-101-71 -88
21	294	MT	158	162,05	294-48-279-281-238-278-209-19-116-182-60-171-84-294
22	294	MT	147	162,64	294-173-165-188-4-223-85-149-37-117-261-294
		ST	22	11,84	261- 143-190 -261
23	294	MT	143	100,41	294-9-266-189-70-280-138-103-65-75-265-112-294
		ST	26	8,50	65- 77-184 -65
24	294	MT	24	9,03	294-260-294
		ST	68	31,76	260-93-207- 193-177 -144-260

MDT29: Gesamtdistanz 3316,32

ID	Dp	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	289	MT	138	246,42	289-175-235-229-135-113-195-33-82-107-256-53-57-96-236-289
		ST	28	23,98	82- 58-210 -82
2	289	MT	0	0,00	289-289
		ST	79	49,66	289- 83 -146- 26-55-164-52 -47-289
		ST	70	23,98	289- 62-14-206-246 -289
3	289	MT	66	92,84	289-104-234-187-197-80-289
		ST	52	29,69	234- 67-217-272 -234
		ST	49	36,20	197- 50-64-95-24-30 -197
4	289	MT	108	66,50	289-288-23-13-161-268-51-40-289
		ST	53	35,29	23- 154-36-240-147-142 -23
5	290	MT	3	74,30	290-153-290
		ST	84	50,24	153-124-269- 284-213-25-114-264 153
		ST	72	40,90	153- 180-119-259-226-219 -153
6	290	MT	59	55,99	290-108-126-276-290
		ST	69	24,94	126-249- 35-86 -126
		ST	41	16,00	108- 179-100 -108
7	290	MT	12	38,32	290-251-290
		ST	60	30,59	251- 22-166-261-143-190 -251
		ST	84	40,38	251- 192-18-201-92-32-129 -251
8	290	MT	0	0,00	290-290
		ST	79	28,20	290- 118-122-244-98-263-160 -290
		ST	85	49,55	290- 265-112-10-157-17-277 -274- 233 -290
9	291	MT	160	169,34	291-156-196-15-220-239-162-224-245-285-215-208-291
10	291	MT	0	0,00	291-291
		ST	84	43,30	291- 43-28-232-205-49-275 -291
		ST	85	44,71	291- 42-1-258-2-248-21 -291
11	291	MT	0	0,00	291-291
		ST	82	31,45	291- 29-145-151-34-134-20-141 -291
		ST	82	38,09	291- 106-139-262 -94-69-87-291
12	291	MT	33	62,10	291-91-191-291
		ST	80	45,31	191-130-254- 204-11 -39-241-191
		ST	46	33,52	91- 212-170-199-178-211 -91
13	292	MT	169	237,90	292-45-5-198-194-120-183-167-125-252-3-231-270-292
14	292	MT	60	60,64	292-271-253-172-127-292
		ST	68	45,97	172-186- 227-273 -136-137-172
		ST	40	13,19	172- 133-12-73 -172
15	292	MT	26	28,15	292-66-181-292
		ST	69	103,70	292-140-287-176- 225-168 -292
		ST	75	39,16	181- 76-109-115-46-131 -181
16	292	MT	0	0,00	292-292
		ST	83	61,78	292-257- 163-247 -8-228- 216-31-214-218 -292
		ST	85	49,26	292- 159-283 -61- 202 -221- 267-97 -292
17	293	MT	166	152,33	293-6-16-7-59-200-174-282-89-105-150-148-237-121-169-293
18	293	MT	0	0,00	293-293
		ST	82	35,17	293-79- 185-152 -128- 158 -293
		ST	81	75,60	293- 44-88-68-56-101-222-286 -293
19	293	MT	170	291,56	293-250-81-255-74-102-132-99-63-111-41-78-230-90-293
20	293	MT	66	40,37	293-72-155-38-27-293
		ST	48	17,14	155- 242-71 -155
		ST	49	23,62	27- 110-243 -203-27
21	294	MT	130	155,95	294-279-278-209-19-116-182-60-171-294
22	294	MT	132	142,48	294-173-117-85-223-4-165-188-144-294
		ST	19	26,95	117- 37-149 -117
23	294	MT	105	108,40	294-189-70-280-138-103-123-54-294
		ST	23	15,63	189- 281-238 -189
24	294	MT	0	0,00	294-294
		ST	79	32,57	294- 260-93-193-177-207-84 -294
		ST	82	36,98	294- 9-48-266-77-184-65-75 -294

MDT30: Gesamtdistanz 3700,55

ID	Dp	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	289	MT	87	230,55	289-104-234-53-256-107-82-33-195-289
		ST	52	29,69	234- 272-217-67 -234
		ST	28	23,98	82- 58-210 -82
2	289	MT	62	133,96	289-96-254-57-289
		ST	38	30,10	96- 236-154-240-36 -96
		ST	51	30,87	254- 11-220-204 -254
3	289	ST	13	2,18	289- 246 -289
		MT	0	0,00	289-289
		ST	84	41,85	289- 83-288-146-164-52-47 -289
4	289	ST	81	74,46	289- 50-64-187-197-30-24-95-80 -289
		MT	0	0,00	289-289
		ST	77	27,81	289- 206-14-54-62 -289
5	290	ST	84	72,83	289- 55-26-23-13-268-51 -40-289
		MT	43	151,56	290-140-176-287-269-124-290
		ST	80	55,04	124- 32-92-201-18-166-22 -124
6	290	ST	42	35,79	124- 284-213-264-226-153 -124
		MT	24	74,55	290-249-290
		ST	78	44,92	249- 180-259-119-232-205 -249
7	290	ST	64	24,94	249- 126-86-35 -249
		MT	0	0,00	290-290
		ST	79	43,14	290- 233-274-277-129-17-157-10 -290
8	290	ST	79	28,20	290- 160-263-98-244-122-118 -290
		MT	0	0,00	290-290
		ST	82	37,08	290- 265-65-184-77-75-112 -290
9	291	ST	81	38,65	290- 179-100-108-276 -290
		MT	100	138,33	291-200-174-105-89-282-285-156-291
		ST	70	50,01	291- 262-142-147-170-199-139-106 -291
10	291	MT	4	57,32	291-215-291
		ST	85	41,83	215- 59-101-56-68-7 -215
		ST	73	36,19	291- 275-49-28-20-141 -291
11	291	MT	0	0,00	291-291
		ST	83	29,14	291- 43-134-34-151-42-145-29 -291
		ST	79	42,50	291- 69-161-94-87 -291
12	291	MT	6	66,13	291-130-291
		ST	84	83,30	130-239-162-224- 245-15-39 -130
		ST	80	45,75	130- 191-211-178-212-91-196-241 -130
13	292	MT	99	215,29	292-3-252-120-183-125-167-228-292
		ST	70	52,95	3- 198-194-5-136 -3
		MT	10	45,20	292-186-292
14	292	ST	84	39,14	186- 137-45-73-12-133-172 -186
		ST	73	57,09	186- 227-273-231-270-216-31-214 -186
		MT	0	0,00	292-292
15	292	ST	77	48,02	292- 267-66 -181- 76-109-202 -292
		ST	77	65,06	292- 257-168-225-8-247-163 -292
		MT	0	0,00	292-292
16	292	ST	80	22,98	292- 25-114-219-97 -292
		ST	80	47,32	292- 221-61-271-283-159-218-127 -292
		MT	159	279,66	293-150-250-81-255-74-102-132-99-63-111-293
17	293	MT	0	0,00	293-293
		ST	79	52,88	293- 71-242-222-286-16-6 -293
		ST	84	58,85	293- 38-27-203-128-253-158 -79-293
18	293	MT	0	0,00	293-293
		ST	80	87,50	293- 44-169-121-148-237-88-155-72 -293
		ST	76	91,82	293- 110-243-90-78-41 -230-293
19	293	MT	0	0,00	293-293
		ST	80	87,50	293- 44-169-121-148-237-88-155-72 -293
		ST	76	91,82	293- 110-243-90-78-41 -230-293
20	293	MT	0	0,00	293-293
		ST	80	37,56	293- 248-208-21-1-2-258 -293
		ST	85	43,29	293- 152-185-115-131-46 -293

Fortsetzung MDT30

ID	Dp	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
21	294	MT	52	84,80	294-278-60-171-294
		ST	60	81,29	278- 209 -182- 116 -19-278
22	294	MT	66	81,72	294-144-188-165-173-294
		ST	85	93,01	165-117- 37-149-85-223 -4-165
23	294	MT	0	0,00	294-294
		ST	84	72,23	294- 266-48-279-238-281-189-103-123 -294
		ST	82	130,90	294-175-235-229- 135-113 -70-280-138-294
24	294	MT	0	0,00	294-294
		ST	80	62,45	294- 251-192-261-143-190-193-177 -294
		ST	75	26,86	294- 9-84-207-93-260 -294

Anhang C

Lösungen für das PTTRP

Nachfolgende Tabellen zeigen die Tourenpläne der besten bekannten Lösungen für die 30 in Kapitel 2.4.1.2 beschriebenen PTTRP-Probleme PT1-PT30. Die Spalten enthalten die folgenden Informationen: die Nummer der Route (ID), den zugehörigen Tag (T), den Typ (TT), die Ladung (L), die Distanz und die Kundenreihenfolge der zugehörigen Tour. Die Angabe des Fahrzeugtyps entfällt, da jedes Testproblem einen homogenen Fuhrpark besitzt. Um TC-Kunden explizit auszuweisen, werden sie in den nachfolgenden Tabellen mit Fettdruck wiedergegeben. Der erste und letzte Kunde einer Tour bezeichnet den Root dieser Tour.

PT1: Gesamtdistanz 2318,52

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	146	311,09	49-36-16-5-8-1-4-19-22-45-7-49
		ST	46	61,53	45- 10-11-3-6 -45
2	1	MT	112	212,53	49-37-35-9-42-46-21-2-49
		ST	25	24,72	21- 12-24 -21
3	2	MT	171	396,43	49-2-23-15-38-40-17-18-5-8-13-33-20-1-4-49
		ST	6	17,37	38- 12 -38
		ST	18	25,41	1- 14-28 -1
4	2	MT	0	0,00	49-49
		ST	97	148,66	49- 44 -9-34- 11-3-6-10 -7-49
5	3	MT	131	284,65	49-7-22-19-4-1-29-8-5-16-49
		ST	62	102,91	22- 10-11-6-3 -27-22
6	3	MT	34	84,93	49-9-39-2-49
		ST	74	71,09	39- 24-12 -21-43-39
7	4	MT	163	343,30	49-2-30-15-25-23-26-18-17-5-8-13-20-1-4-41-49
		ST	27	47,66	30- 47-12 -30
		ST	9	22,00	1- 14 -1
8	4	MT	0	0,00	49-49
		ST	98	151,53	49- 32 -9-48- 3-6-11-10 -7-49
		ST	10	12,71	49- 31 -49

PT2: Gesamtdistanz 2449,89

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	24	70,12	49-36-23-49
		ST	81	140,28	23- 25-15 -40- 38-12-24 -2-23
		ST	95	221,12	36-26-18-17- 5-8 -1-4- 14-28 -36
2	1	MT	0	0,00	49-49
		ST	97	145,34	49- 7-10-45-6-3-11 -9-49
3	2	MT	41	210,69	49-22-19-4-1-49
		ST	82	144,62	1-20-13- 8-5 -16-1
4	2	MT	0	0,00	49-49
		ST	99	140,78	49-9-39- 21-12-47 -30-2-49
		ST	92	130,50	49- 7-10-6-3-11-34 -37-49
5	3	MT	0	0,00	49-49
		ST	98	267,82	49-23- 15 -18-17- 5-8 -1-4- 14 -49
		ST	99	134,52	49- 44-32 -9-43- 24-12-2-31 -49
6	3	MT	0	0,00	49-49
		ST	83	139,17	49- 35-11 -48- 3-6-10-7 -49
7	4	MT	53	202,84	49-16-1-4-19-41-49
		ST	96	142,63	1- 29-5-8 -13-33-20-1
8	4	MT	0	0,00	49-49
		ST	96	155,53	49- 7-22-27-3-6-11 -10-49
		ST	93	203,92	49-2- 12-21 -46-42-9-49

PT3: Gesamtdistanz 2466,29

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	25	87,34	49-16-49
		ST	97	250,56	16- 1-4 -19-20-13- 8-5-29 -16
		ST	19	17,22	49- 44-32 -49
2	1	MT	0	0,00	49-49
		ST	93	203,92	49- 9 -42-46- 21-12-2 -49
		ST	98	155,22	49- 41 -22- 6-3-48-11-10-7 -49
3	2	MT	0	0,00	49-49
		ST	99	172,34	49- 9-24-47-12-15-25-23-2 -49
		ST	99	250,44	49- 36 -18-17- 5-8-1-4-14-28 -49
4	2	MT	0	0,00	49-49
		ST	95	130,66	49- 37-11-3-6-45-10-7 -49
5	3	MT	25	87,34	49-16-49
		ST	96	249,58	16- 5-8 -13-33-20-19- 4-1 -16
6	3	MT	0	0,00	49-49
		ST	99	139,95	49- 31-2-30-12-21-43 -9-49
		ST	96	155,53	49- 10-11-6-3 -27-22- 7 -49
7	4	MT	0	0,00	49-49
		ST	100	254,72	49- 23-26 -18-17- 5-8-1-4-14 -49
		ST	93	177,40	49- 2-15 -40- 38-12-24-39 -9-49
8	4	MT	0	0,00	49-49
		ST	95	134,07	49- 7-10-6-3-11-34 -35-49

PT4: Gesamtdistanz 3965,31

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	171	454,33	97-21-79-45-52-61-4-13-8-27-39-5-7-97
		ST	9	22,18	4- 77-90 -4
		ST	10	16,37	21- 28-11 -21
2	1	MT	115	234,27	97-2-10-48-6-51-12-3-53-36-15-97
		ST	43	33,64	2- 80-24-14-18 -2
		ST	12	30,23	15- 30-23 -15
3	1	MT	91	90,26	97-25-81-44-37-9-97
		ST	91	78,72	37-17- 16 -20-74-19- 62-73 -37
4	1	MT	0	0,00	97-97
		ST	82	46,73	97- 1-22-42-88-33-47 -97
5	2	MT	163	319,62	97-29-58-70-41-43-13-8-38-92-20-19-86-84-59-97
		ST	21	27,86	20- 16 -20
6	2	MT	165	253,57	97-32-9-17-5-7-6-10-2-78-97
		ST	29	83,10	2- 24-3-12-14-18 -2
7	2	MT	91	80,48	97-15-46-91-21-57-97
		ST	91	152,09	91-26-35-31-4-34-40- 23 -91
		ST	7	13,53	21- 11 -21
8	2	MT	0	0,00	97-97
		ST	28	37,76	97- 1-22 -97
9	3	MT	155	440,11	97-95-54-89-45-4-63-13-8-27-39-5-7-94-97
		ST	34	26,86	54- 28-11 -21-54
10	3	MT	139	223,89	97-2-10-48-6-50-76-3-12-36-71-15-97
		ST	24	34,92	2- 18-67-14-24 -2
		ST	12	30,23	15- 30-23 -15
11	3	MT	117	87,34	97-9-69-17-44-37-25-97
		ST	78	70,49	44-19-20- 16-64 -44
12	3	MT	0	0,00	97-97
		ST	78	48,91	97- 65-47-33-42-22-1 -97
13	4	MT	155	309,45	97-29-41-43-13-8-68-38-93-19-55-17-9-97
		ST	39	41,55	55-20- 16 -55
14	4	MT	129	250,82	97-5-7-6-10-2-96-56-66-85-97
		ST	29	83,10	2- 18-14-12-3-24 -2
		ST	24	11,09	85- 22 -85
15	4	MT	179	247,69	97-21-26-82-35-31-4-34-49-40-75-83-15-46-97
		ST	7	13,53	21- 11 -21
		ST	8	28,95	46- 23 -46
16	4	MT	0	0,00	97-97
		ST	85	41,67	97- 1-32-87-60-72 -97

PT5: Gesamtdistanz 4235,50

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	97	455,54	97-4-13-8-27-39-5-7-17-97
		ST	95	95,69	17- 16 -20- 55 -19- 62-73-9 -17
2	1	MT	107	216,78	97-2-10-48-6-51-3-12-36-15-97
		ST	23	33,53	2- 18-14-24 -2
		ST	12	30,23	15- 30-23 -15
		ST	46	48,17	36- 66-56-42-22 -36
3	1	MT	0	0,00	97-97
		ST	81	70,05	97- 21-26-11-28 -54- 29 -97
4	1	MT	0	0,00	97-97
		ST	95	42,81	97- 87-32-33-78-88 -1-97
5	2	MT	100	282,61	97-81-19-93-38-8-13-43-41-97
		ST	81	71,00	19- 44 -17- 16 -20-19
		ST	11	18,32	41- 59-70 -41
6	2	MT	126	307,32	97-85-53-3-12-2-10-6-7-5-94-97
		ST	43	33,64	2- 80-24-14-18 -2
		ST	24	11,09	85- 22 -85
7	2	MT	122	237,76	97-46-15-83-75-40-49-34-4-31-97
		ST	9	22,18	4- 77-90 -4
		ST	20	12,37	31- 35 -31
		ST	8	28,95	46- 23 -46
8	2	MT	13	30,81	97-57-97
		ST	93	64,17	57- 21-11-45-61-52-89 -57
		ST	88	85,19	97- 1-47-9-69-37-25 -97
9	3	MT	110	456,01	97-4-63-13-8-27-39-5-7-17-97
		ST	80	94,79	17- 9 -19-20- 16 -17
10	3	MT	149	228,84	97-96-2-10-48-6-50-76-3-12-36-71-15-97
		ST	12	30,23	15- 30-23 -15
		ST	23	33,53	2- 24-14-18 -2
11	3	MT	0	0,00	97-97
		ST	82	70,34	97- 95-29-28-11-26-21 -97
12	3	MT	0	0,00	97-97
		ST	91	50,68	97- 65-32-33-42-22 -1-97
13	4	MT	148	322,85	97-84-86-19-74-20-92-38-68-8-13-43-41-58-97
		ST	44	33,31	20- 64-16 -20
14	4	MT	106	249,23	97-2-10-6-7-5-17-97
		ST	30	84,49	2- 24 -3-12- 14-67-18 -2
		ST	59	37,82	17- 9-37-44 -17
15	4	MT	54	76,91	97-15-46-91-97
		ST	59	42,16	91- 79-45-11-21 -91
		ST	80	154,39	91- 23 -40-34-4-31- 35-82 -91
16	4	MT	0	0,00	97-97
		ST	90	71,70	97- 22-1-47-60-25-72 -97

PT6: Gesamtdistanz 4672,81

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	0	0,00	97-97
		ST	90	276,30	97- 41 -43-13-8- 19-44 - 37 -97
		ST	94	218,33	97-94- 7-5-16 -20- 17 -97
2	1	MT	0	0,00	97-97
		ST	92	212,40	97- 2-10-48-6-24-18-14-3-12 -97
3	1	MT	0	0,00	97-97
		ST	94	122,28	97- 11-79-35-31-4-45 -97
4	1	MT	0	0,00	97-97
		ST	93	112,24	97- 21-46-23-15-22-1 -97
		ST	95	56,13	97- 65-32-9-60-72 -97
5	2	MT	83	335,29	97-86-13-8-27-38-92-20-97
		ST	85	194,51	20- 16-64-7-5 -39-20
6	2	MT	0	0,00	97-97
		ST	95	244,80	97- 15-30-23 -83-75-40-34-4- 61-89 -97
		ST	91	212,67	97- 1-2-10-6-24-18-14-3-12-36 -97
7	2	MT	0	0,00	97-97
		ST	95	70,74	97- 57-21-26-11-28-29-95 -97
		ST	79	106,75	97- 25-19-17-9 -97
8	2	MT	0	0,00	97-97
		ST	95	59,01	97- 47-33-78-42-22-85 -97
9	3	MT	54	290,91	97-43-13-8-93-20-97
		ST	55	143,92	20- 5-7-16 -20
		ST	85	103,26	43- 90-77-4-31-35-45 -43
10	3	MT	0	0,00	97-97
		ST	93	112,24	97- 21-46-23-15-22-1 -97
		ST	92	212,40	97- 12-3-14-18-24-6-48-10-2 -97
11	3	MT	13	61,61	97-81-97
		ST	94	80,84	81- 9-37-17-44-19 -81
		ST	86	89,72	81- 84-41-52-11-58-70-59 -81
12	3	MT	0	0,00	97-97
		ST	47	20,52	97- 87-32 -97
13	4	MT	71	336,53	97-63-13-8-27-68-38-20-97
		ST	86	227,88	20- 74-19-55-16-7-5 -39-20
14	4	MT	13	126,90	97-51-97
		ST	89	77,73	51- 24-80-2-10-6 -51
		ST	91	146,87	51- 14-18-67-96-56-66-36-71-53-12-3-76-50-51
15	4	MT	0	0,00	97-97
		ST	95	87,16	97- 25-73-62-17-69-9 -97
		ST	94	212,12	97- 15-30-23 -40-49-34-4- 82-26 -97
16	4	MT	0	0,00	97-97
		ST	90	74,01	97- 91-21-11-28-54-29 -97
		ST	82	46,73	97- 1-22-42-88-33-47 -97

PT7: Gesamtdistanz 5531,59

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	187	420,47	145-65-33-120-54-98-49-55-67-85-57-36-61-34-83-56-8-24-19-145
2	1	MT	186	308,52	145-16-21-29-53-90-7-30-77-9-64-2-97-32-145
3	1	MT	151	288,61	145-12-10-121-40-69-119-110-27-103-20-31-145
		ST	37	23,80	121- 88-52 -121
4	1	MT	14	44,79	145-22-145
		ST	95	85,15	22- 18-25-68-6-4 -51-46-58-22
5	1	MT	55	49,93	145-5-11-35-28-145
		ST	93	93,78	11-26- 1-13-3 -14- 17-39 -11
		ST	40	34,42	11- 107-109-45 -11
6	1	MT	0	0,00	145-145
		ST	95	88,50	145- 41-99-130-23-122-81-143-15 -145
7	2	MT	111	212,07	145-108-24-70-19-74-72-50-10-12-145
		ST	79	181,66	24-135-105-101-34-36-8- 4-6 -37-24
8	2	MT	97	189,94	145-27-31-20-38-44-42-145
		ST	92	155,57	44-124-2-9- 89-140 -47- 136-60 -44
9	2	MT	189	245,56	145-22-25-33-59-29-82-30-134-7-66-21-86-145
10	2	MT	90	83,52	145-28-35-71-26-11-5-145
		ST	92	77,35	26- 95-1-13-132-3-80 -14-73-133- 17-62 -26
11	2	MT	14	48,15	145-63-106-92-145
		ST	92	71,04	106- 23-94-48-102 -32-138-106
		ST	74	40,16	92-16- 18-104-43 -92
		ST	4	15,86	63-15 -63
12	3	MT	190	427,64	145-25-126-54-76-116-49-55-67-57-36-61-111-34-125-56-8-75-68-58-145
13	3	MT	166	259,27	145-84-32-2-64-137-9-131-20-31-35-28-145
		ST	21	44,10	84- 15-41-23 -84
14	3	MT	152	227,85	145-16-21-96-7-30-53-29-65-33-128-22-145
		ST	22	12,03	16- 18 -16
15	3	MT	55	79,11	145-5-26-11-145
		ST	92	163,54	26- 3-52 -40-69-27-13- 1 -26
		ST	27	19,77	26- 39-17 -26
16	3	MT	132	195,52	145-46-51-24-79-19-12-10-127-14-129-87-145
		ST	30	20,04	51- 4-6 -51
		ST	28	10,42	87- 45-91 -87
17	4	MT	154	349,60	145-117-8-115-34-36-100-72-50-141-19-70-24-37-145
		ST	30	24,45	117- 6-4 -117
18	4	MT	125	126,98	145-22-25-33-93-59-29-16-145
		ST	63	30,37	16- 123-18-43 -16
19	4	MT	149	307,35	145-21-66-7-30-9-47-113-142-2-32-63-145
		ST	3	22,56	113- 60 -113
		ST	22	17,11	2- 48 -2
		ST	4	15,86	63-15 -63
		ST	12	21,04	32-23 -32
20	4	MT	129	148,07	145-5-11-26-14-10-112-12-78-145
		ST	59	44,30	26- 1-139-3-17-62 -26
21	4	MT	186	205,79	145-28-35-71-13-27-114-31-20-38-44-42-118-144-145

PT8: Gesamtdistanz 6069,17

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	27	121,49	145-37-19-145
		ST	87	117,18	19- 141-74 -72-50-10- 112-12 -19
		ST	75	168,96	37- 24-101 -34-36- 61-56-8 -37
2	1	MT	98	187,86	145-2-113-20-31-118-144-145
		ST	39	106,50	113- 60 -47- 140-89 -9-113
		ST	53	23,12	2- 48-102-94 -2
3	1	MT	97	213,94	145-7-30-53-29-65-33-145
		ST	93	120,88	145- 63-15-41-99-130-23-32-21-16 -145
4	1	MT	65	69,10	145-28-35-71-11-5-145
		ST	81	58,91	71- 26-3-14-17-62-39 -71
		ST	42	90,35	71- 1-13-27 -71
5	1	MT	14	44,79	145-22-145
		ST	95	85,15	22- 18-25-68-6-4 -51-46-58-22
6	2	MT	114	425,04	145-126-54-76-116-49-55-67-85-57-36-34-79-19-145
		ST	71	90,91	79- 105-115-8-4-6-24-70 -79
7	2	MT	179	240,96	145-33-93-59-29-82-30-134-7-90-66-145
8	2	MT	117	188,61	145-2-124-44-42-38-20-31-28-145
		ST	67	96,39	2- 64-137 -9-131-2
9	2	MT	57	102,89	145-35-13-11-5-145
		ST	90	155,46	13- 27 -119-69-40- 52-1 -13
10	2	MT	0	0,00	145-145
		ST	94	158,51	145- 12 -10- 73-14-3-26-17-45 -145
		ST	83	73,64	145-22- 25-18-16-43 -145
11	2	MT	0	0,00	145-145
		ST	64	102,27	145- 86-21-138-32-23-84-15 -145
12	3	MT	48	118,60	145-108-37-117-51-46-145
		ST	85	142,96	117- 83 -34- 111 -36- 61 -125- 56-8 -117
		ST	17	15,64	37- 24 -37
		ST	30	20,04	51- 6-4 -51
13	3	MT	74	197,78	145-97-2-142-20-31-145
		ST	42	70,05	31-103- 114-27 -31
		ST	47	98,18	142- 136-60 -47-9-142
		ST	22	15,04	97- 48 -97
14	3	MT	40	69,07	145-11-71-35-28-145
		ST	91	77,10	71- 95-1 -13- 132-139-3-14-80 -71
		ST	57	29,64	71- 26-62-17-39 -71
15	3	MT	0	0,00	145-145
		ST	92	111,98	145- 104-16-21-96-32-23-41-15-63 -145
16	3	MT	111	215,35	145-7-30-53-29-65-33-22-145
		ST	55	40,59	22-58- 68-25-18 -22
17	3	MT	50	61,89	145-78-5-145
		ST	82	159,13	78-19-100-72-50-10- 12 -78
18	4	MT	124	391,33	145-33-120-54-98-49-55-67-57-36-34-135-19-145
		ST	65	75,89	135- 8 -75- 4-6-24-70 -135
19	4	MT	165	338,45	145-66-7-30-77-9-2-44-42-38-20-31-145
		ST	22	21,72	2- 64 -2
20	4	MT	108	223,21	145-28-35-13-110-69-40-121-127-10-145
		ST	25	35,56	110- 27 -110
		ST	37	23,80	121- 88-52 -121
		ST	9	35,81	10- 12 -10
21	4	MT	4	30,36	145-92-145
		ST	78	91,56	92- 21 -29-59- 16-43 -92
		ST	75	68,64	92- 143-15-23-122-32-81-106 -92
22	4	MT	30	45,80	145-5-11-145
		ST	76	39,65	11- 91-45-87-109-107 -11
		ST	84	88,50	11- 17-133-129-14-3-1-26 -11
23	4	MT	0	0,00	145-145
		ST	91	72,96	145- 18-123-128-25 -22-145

PT9: Gesamtdistanz 6698,13

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	137	479,71	145-10-50-72-100-34-36-57-67-55-49-116-76-54-120-145
		ST	29	54,78	34- 125-56-8-83 -34
2	1	MT	108	338,17	145-134-30-77-9-47-142-20-31-145
		ST	30	58,78	31- 114-27 -31
		ST	22	23,83	142- 2 -142
		ST	22	24,90	134- 7 -134
3	1	MT	25	56,98	145-78-145
		ST	53	93,89	78- 37-24-19-12 -78
		ST	95	114,43	78- 87-17-26-1-13-132-3-14-73 -78
4	1	MT	0	0,00	145-145
		ST	95	116,09	145- 18-22-25-6-4-51-46 -145
		ST	93	120,86	145- 33-93-59-29-21 -145
5	1	MT	0	0,00	145-145
		ST	94	94,60	145- 15-23-130-32-81-84-143 -145
		ST	62	52,49	145- 63-92-16-43-104 -145
6	1	MT	0	0,00	145-145
		ST	94	81,73	145- 28-35-11-39-91-5 -145
7	2	MT	6	58,98	145-108-145
		ST	83	128,61	108- 24-70-79-19-112 -10- 12 -108
		ST	95	202,23	108- 105-34-111-36-61-8-4-6 -108
8	2	MT	51	146,62	145-31-20-38-145
		ST	87	158,11	38- 60-9-64-2-44-42 -38
9	2	MT	17	77,66	145-66-145
		ST	72	75,84	66- 53-29-33-65 -66
		ST	94	170,63	66- 7-30-48-32-23-122-138 -66
10	2	MT	39	167,94	145-110-119-145
		ST	95	139,96	119- 69-40-52-88-14-3-1-13 -119
		ST	25	35,56	110- 27 -110
11	2	MT	0	0,00	145-145
		ST	95	90,08	145- 11-71-26-62-17-45-109-107 -145
12	2	MT	0	0,00	145-145
		ST	93	112,54	145- 58-68-25-22-18-16-21-15-41 -145
		ST	50	36,76	145- 28-35-5 -145
13	3	MT	86	377,26	145-34-36-57-85-67-55-49-98-54-126-145
		ST	95	109,88	34- 56-8-75-117-37-24-135-115 -34
14	3	MT	57	224,57	145-124-47-20-31-145
		ST	25	56,03	47-9- 89-140 -47
		ST	81	67,74	124- 2-94-102-32-23 -124
		ST	25	54,88	31- 27 -31
15	3	MT	19	119,51	145-10-145
		ST	78	114,30	10- 12-19-141-74 -72-50-10
		ST	91	85,92	10- 129-133-17-139-3-80-14 -10
16	3	MT	0	0,00	145-145
		ST	95	211,42	145- 29-59-82-30-7-106-15 -145
		ST	90	64,94	145- 63-43-16-18-123-22 -145
17	3	MT	0	0,00	145-145
		ST	94	109,94	145- 28-35-95-13-1-26-39-11 -145
		ST	94	148,05	145- 46-51-4-6-25-33-21-86 -145
18	3	MT	0	0,00	145-145
		ST	25	15,66	145- 5 -145
19	4	MT	0	0,00	145-145
		ST	92	88,82	145- 16-18-128-25-68-58-22 -145
		ST	94	258,55	145- 24-70-101-34-36-61-8-4-6 -145
20	4	MT	69	199,71	145-31-103-20-38-113-145
		ST	89	114,86	113- 2-64-137-9 -131-113
		ST	17	25,07	113- 60-136 -113

Fortsetzung PT9

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
21	4	MT	0	0,00	145-145
		ST	90	173,85	145- 45-17-14-127 -10- 12-19 -145
		ST	93	237,97	145- 3-121-52 -40- 69-27-13-1 -145
22	4	MT	17	77,66	145-66-145
		ST	92	156,67	66- 96-32-48-97 -30- 7-90 -66
		ST	80	83,61	66- 53-29-33-65-21 -66
23	4	MT	0	0,00	145-145
		ST	94	121,20	145- 41-144-118-42-44-99-23-15 -145
		ST	95	87,33	145- 28-35-71-26-62-11-5 -145

PT10: Gesamtdistanz 6390,20

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	183	300,38	193-33-51-23-45-158-4-20-40-86-1-31-168-193
2	1	MT	154	241,28	193-115-171-101-151-119-78-146-48-26-54-90-193
		ST	18	12,41	26- 102-43-114 -26
		ST	9	8,75	54- 6-29 -54
		ST	4	6,38	151- 88 -151
3	1	MT	182	251,33	193-13-131-80-95-60-46-30-2-35-21-5-12-193
4	1	MT	152	123,74	193-18-67-56-42-32-104-82-180-154-193
		ST	24	12,53	104- 9 -104
		ST	2	19,13	67- 15 -67
5	1	MT	148	234,49	193-190-38-3-58-11-122-57-108-25-7-14-193
		ST	17	11,02	7- 72-74 -7
		ST	5	21,12	108- 73 -108
6	1	MT	125	133,09	193-77-36-53-162-19-47-39-16-34-193
		ST	11	12,55	53- 64-24 -53
		ST	20	12,32	16- 130-139 -16
		ST	27	18,89	77- 22-10 -77
7	1	MT	24	90,58	193-144-193
		ST	72	32,71	144- 94-41-83-84-28-63-49-124 -144
		ST	89	34,17	144-44- 185-17-37-8 -144
8	1	MT	0	0,00	193-193
		ST	66	36,50	193- 106-66-91-27 -193
9	2	MT	176	299,33	193-44-37-92-87-45-23-4-20-40-1-31-140-33-193
		ST	2	9,57	44- 17 -44
10	2	MT	183	270,57	193-26-48-75-191-61-42-32-65-89-12-193
		ST	2	8,65	26- 43 -26
11	2	MT	184	285,93	193-13-174-5-192-76-181-21-35-2-30-46-142-25-81-7-70-193
12	2	MT	183	193,76	193-14-38-3-137-79-11-107-133-128-145-157-135-193
		ST	2	24,18	145- 59 -145
13	2	MT	164	222,39	193-36-160-52-85-132-55-19-47-39-16-34-193
		ST	9	22,20	160- 24 -160
14	2	MT	51	72,42	193-68-71-50-161-18-193
		ST	43	10,80	71- 177-9 -71
		ST	88	89,61	50- 15-28-41-175-8-96-169-6-29 -50
15	2	MT	0	0,00	193-193
		ST	80	44,34	193- 69-22-98-10 -93-62- 27 -193
16	3	MT	182	298,22	193-31-147-40-20-105-1-86-120-4-170-45-23-51-182-193
17	3	MT	165	230,38	193-99-33-143-112-44-37-100-78-184-103-48-179-26-54-193
		ST	2	8,65	26- 43 -26
		ST	9	8,75	54- 29-6 -54
		ST	5	11,45	143- 164-88 -143
		ST	2	9,57	44- 17 -44
18	3	MT	184	260,15	193-5-35-21-172-30-2-60-95-80-176-155-13-193

Fortsetzung PT10

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
19	3	MT	148	253,13	193-14-38-3-58-178-125-11-57-46-25-7-138-193
		ST	17	11,02	7-74-72-7
		ST	17	27,20	25-149-73-25
20	3	MT	141	129,23	193-77-36-53-47-19-109-39-16-34-193
		ST	11	12,55	53-64-24-53
		ST	27	18,89	77-22-10-77
21	3	MT	150	125,16	193-12-165-32-42-56-67-121-82-148-193
		ST	24	14,67	121-9-121
22	3	MT	51	73,27	193-18-153-90-193
		ST	83	47,00	90-28-84-83-41-94-8-49-63-90
		ST	21	17,47	153-189-15-153
23	3	MT	0	0,00	193-193
		ST	74	37,18	193-66-186-91-27-193
24	4	MT	173	300,21	193-33-31-1-40-20-4-23-45-87-92-37-44-163-193
		ST	2	9,57	44-17-44
25	4	MT	124	318,94	193-42-141-118-126-75-166-48-26-156-61-18-193
		ST	61	64,35	26-43-96-8-41-28-136-29-6-26
26	4	MT	182	269,42	193-13-5-76-21-35-2-30-46-183-116-25-110-150-81-7-70-193
27	4	MT	128	217,91	193-34-16-97-111-11-79-173-3-38-14-193
		ST	12	11,22	97-129-59-97
		ST	39	12,31	173-123-188-173
28	4	MT	152	113,73	193-68-50-71-32-65-117-89-152-12-193
		ST	24	10,66	71-9-71
		ST	2	16,88	50-15-50
29	4	MT	173	223,89	193-36-187-52-85-127-159-55-19-167-39-47-134-93-193
		ST	9	17,60	134-24-134
30	4	MT	0	0,00	193-193
		ST	78	42,41	193-27-113-62-10-22-69-193

PT11: Gesamtdistanz 7008,38

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	166	297,18	193-36-187-40-20-1-86-4-158-45-23-51-193
		ST	17	26,16	1-31-1
2	1	MT	115	321,92	193-32-141-118-126-75-166-48-61-42-50-193
		ST	69	38,09	50-15-67-121-9-50
3	1	MT	34	118,01	193-37-18-193
		ST	46	23,62	37-17-44-8-37
		ST	86	71,13	37-94-41-83-28-29-6-96-26-43-102-100-37
4	1	MT	154	237,33	193-12-117-5-192-76-181-21-35-2-95-13-193
		ST	25	48,14	2-30-46-2
5	1	MT	47	63,36	193-190-38-14-193
		ST	79	160,92	38-173-79-125-11-73-149-25-7-74-72-38
		ST	48	20,20	38-137-3-38
6	1	MT	9	96,90	193-19-193
		ST	82	71,26	19-97-129-59-139-130-16-34-167-19
		ST	71	51,67	19-47-64-24-39-109-19
7	1	MT	0	0,00	193-193
		ST	87	80,28	193-27-77-10-98-22-69-33-115-193
8	2	MT	113	294,38	193-1-40-20-4-23-45-87-92-44-193
		ST	70	24,39	44-8-37-17-185-44

Fortsetzung PT11

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
9	2	MT	78	138,03	193-18-90-156-42-56-193
		ST	61	131,26	156-48- 184-78-43-26-6-29-54 -156
		ST	44	33,49	90- 63-49-41-84-28 -90
10	2	MT	173	284,41	193-32-65-5-35-21-172-30-2-60-116-81-7-70-193
		ST	11	31,13	116- 183-46 -116
11	2	MT	136	234,06	193-14-38-128-133-107-11-57-108-25-193
		ST	49	25,29	128- 145-3-58 -128
12	2	MT	95	214,89	193-19-55-159-127-85-52-160-162-193
		ST	90	61,83	162- 47-39-16-34-24-53 -162
13	2	MT	37	63,99	193-161-12-193
		ST	84	54,82	161- 68-82-104-9-71-189-15 -161
		ST	63	61,19	12- 89-80-176-131 -13-12
14	2	MT	46	72,93	193-36-168-193
		ST	69	82,19	168- 33-101-88-151-182-31 -168
		ST	51	29,54	193- 106-66-138 -193
15	2	MT	0	0,00	193-193
		ST	83	50,65	193- 27-22-10-93-62-91 -193
16	3	MT	115	205,16	193-1-86-120-4-45-23-51-193
		ST	60	117,65	1-105-20-40-147- 31 -1
17	3	MT	136	256,21	193-37-103-179-48-75-191-61-42-193
		ST	46	23,62	37- 17-44-8 -37
18	3	MT	160	229,48	193-13-155-95-2-35-21-76-5-32-12-193
		ST	25	48,14	2-30- 46 -2
19	3	MT	28	62,04	193-14-38-193
		ST	39	14,30	38- 123-188 -38
		ST	85	159,47	38- 3-79-11-73-25-7-74-72 -38
20	3	MT	31	67,88	193-36-134-193
		ST	87	95,91	134- 24-64-47-39-19-59-16-34 -134
21	3	MT	45	81,46	193-18-153-50-154-193
		ST	89	74,29	153- 28-83-41-94-169-96-26-43-114-6-29-136 -153
		ST	47	37,66	50- 15-67-9 -50
22	3	MT	0	0,00	193-193
		ST	72	79,09	193- 99-33-69-22-10-77-27 -193
23	4	MT	161	305,39	193-44-37-92-87-119-23-45-170-4-20-40-1-140-193
		ST	17	8,49	140- 31 -140
24	4	MT	24	90,58	193-144-193
		ST	90	156,58	144- 17-78-146-48-43-26-6-29-54-84-28 -144
		ST	70	25,45	144- 124-41-175-8 -144
25	4	MT	130	219,17	193-81-150-60-2-35-21-5-174-13-193
		ST	25	48,14	2-30- 46 -2
		ST	18	23,39	174- 80 -174
26	4	MT	180	361,88	193-70-7-110-25-142-57-122-11-111-55-19-132-85-52-36-193
27	4	MT	0	0,00	193-193
		ST	80	42,53	193- 27-113-22-10-93-62 -193
		ST	90	97,92	193- 34-16-39-47-53-24 -193
28	4	MT	145	124,06	193-12-152-65-32-42-56-71-148-193
		ST	35	15,72	152- 165-89 -152
29	4	MT	12	42,16	193-18-193
		ST	83	91,34	18- 171-33-88-164-143-112-163-49-63 -90-18
		ST	77	58,99	18- 15-177-9-82-68-180 -18
30	4	MT	11	38,23	193-14-193
		ST	81	26,11	14- 66-91-186-135 -14
		ST	89	65,27	14-38- 3-178-58-157 -14

PT12: Gesamtdistanz 7677,40

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	24	119,58	193-51-193
		ST	89	68,69	51- 44-37-17-185 -23-51
		ST	72	179,00	51- 31-1 -40-20-4- 45 -51
2	1	MT	87	240,79	193-116-30-2-35-21-5-13-193
		ST	90	181,65	116- 110-7-25-149 -11- 122-57-46-183 -116
3	1	MT	0	0,00	193-193
		ST	85	61,88	193- 27-77-10-98 -36- 22-69 -193
		ST	87	35,01	193- 91-186-66-106 -193
4	1	MT	12	42,16	193-18-193
		ST	87	191,99	18- 15-61 -75-48- 43-26-6-29-136-153 -18
		ST	83	91,54	18- 33-144-8-41-83-28 -18
5	1	MT	39	91,96	193-12-32-193
		ST	75	67,00	32- 9-56-42 -141-32
		ST	68	38,54	32- 89-117-65 -32
6	1	MT	0	0,00	193-193
		ST	87	113,40	193- 14-38-3-128-59-145-157 -193
7	1	MT	0	0,00	193-193
		ST	90	115,11	193- 34-16-130-167-19-39-47-24 -193
8	2	MT	97	252,25	193-168-4-20-40-187-36-193
		ST	88	105,89	4-158- 170-45-23-31-1-86 -4
9	2	MT	7	123,94	193-100-193
		ST	86	122,91	100- 103-48-43-114-26-54-29-6-169-96 -100
		ST	89	59,11	100- 37-8-44-17-92-87-78 -100
10	2	MT	150	261,13	193-32-5-35-21-172-30-2-60-95-193
		ST	20	27,70	5- 192-76 -5
		ST	5	36,87	30- 46 -30
11	2	MT	2	47,03	193-70-193
		ST	80	182,51	70- 173-79-58-11-73-108-25-7 -70
		ST	90	57,37	70- 188-123-3-38-14 -70
12	2	MT	54	136,54	193-132-85-52-193
		ST	89	132,34	132- 160-53-64-24-47-39-19 -55-132
13	2	MT	12	42,16	193-18-193
		ST	81	72,03	18- 15-189-42-67-161 -18
		ST	90	58,98	18- 90-28-84-41-94-124-49-63 -18
14	2	MT	0	0,00	193-193
		ST	90	98,34	193- 115-99-33-182-151-88-101-171 -193
		ST	82	69,51	193- 27-62-16-34-93-10-22 -193
15	2	MT	30	55,85	193-12-13-193
		ST	90	56,68	12- 82-104-9-177-71-50-68 -12
		ST	65	64,62	13- 131-176-80-81-72-74 -13
16	3	MT	24	119,58	193-51-193
		ST	83	142,24	51- 1-105-20-40-147-31-140 -51
		ST	67	74,03	51-120-4- 45 -23-51
17	3	MT	104	319,47	193-5-35-21-181-118-126-75-191-18-193
		ST	81	148,56	191-166-48- 43-26-41-83-29-6-156-61 -191
18	3	MT	31	76,82	193-13-155-193
		ST	90	143,45	155- 7-25-142-57-46 -30-2-155
19	3	MT	31	67,88	193-36-134-193
		ST	69	52,61	134- 24-47-109-39 -134
		ST	84	90,31	134- 34-16-139-59-129-97-19 -134
20	3	MT	0	0,00	193-193
		ST	87	139,70	193- 33-112-44-17-37-8-28-15 -193
21	3	MT	20	42,32	193-12-193
		ST	75	58,33	12- 165-32-65-89 -12
		ST	86	78,20	12- 121-56-42-9 -12

Fortsetzung PT12

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
22	3	MT	0	0,00	193-193
		ST	86	188,58	193- 38-125 -11-107- 178-3 -193
		ST	89	49,96	193- 138-66-14-190-91 -193
23	3	MT	0	0,00	193-193
		ST	67	38,87	193- 27-113-77-10-22-69 -193
24	4	MT	35	149,90	193-119-23-193
		ST	57	43,34	119- 87-92-37-44-17 -119
		ST	85	183,84	23- 45 -4-20-40- 31-1-86 -23
25	4	MT	21	178,18	193-179-193
		ST	72	104,73	179-48- 146-184-78-26-43-102 -179
		ST	89	101,91	179- 54-29-6-41-94-175-8-96 -179
26	4	MT	119	222,29	193-32-5-21-35-2-60-95-193
		ST	15	23,66	5- 76 -5
		ST	25	48,14	2-30- 46 -2
27	4	MT	0	0,00	193-193
		ST	87	81,33	193- 14-38-137-3-135 -193
28	4	MT	96	203,96	193-55-159-127-85-52-36-193
		ST	80	83,88	52- 162-19-39-47-24-64-53 -52
29	4	MT	20	42,32	193-12-193
		ST	75	59,08	12- 148-154-180-68-82-152 -12
		ST	89	93,03	12- 9-42-67-15-50-71 -12
30	4	MT	12	42,16	193-18-193
		ST	86	96,36	18- 33-88-164-143-163-63-49-84-28-90 -18
		ST	82	69,51	193- 27-62-16-34-93-10-22 -193
31	4	MT	2	47,03	193-70-193
		ST	88	194,80	70- 7-25-73 -11-111- 133-58-79 -70
		ST	90	75,03	70-13- 174-80-150-81-72-74 -70

PT13: Gesamtdistanz 7240,44

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	180	289,39	241-10-53-31-219-89-38-41-199-45-8-195-6-74-37-241
2	1	MT	179	224,95	241-51-39-19-1-16-117-22-220-86-58-92-65-173-241
3	1	MT	168	201,96	241-218-127-40-52-46-109-176-164-119-67-36-241
		ST	9	12,71	164- 50-71 -164
4	1	MT	148	221,92	241-33-84-60-44-104-48-21-57-194-157-241
		ST	22	9,41	84- 11 -84
5	1	MT	133	212,26	241-113-49-87-25-69-234-169-42-156-3-121-241
		ST	41	7,77	156- 107-13 -156
6	1	MT	135	133,74	241-240-14-7-47-27-229-26-238-141-79-241
		ST	25	13,53	47- 2 -47
		ST	20	8,58	26- 17-23 -26
7	1	MT	105	73,95	241-148-59-61-4-158-102-188-241
		ST	14	6,16	59- 115 -59
		ST	19	4,99	148- 105 -148
		ST	38	13,56	4- 15-211 -4
8	1	MT	73	67,35	241-212-225-170-9-100-241
		ST	15	6,57	225- 30 -225
		ST	14	15,01	170- 5 -170
		ST	78	34,76	9- 32-12 -206- 24-73 -9
9	1	MT	41	45,90	241-143-132-241
		ST	83	31,81	143- 43-34-123-201 -143
		ST	46	22,33	143- 153-56-54-18 -143
10	1	MT	23	27,16	241-29-241
		ST	63	13,09	29- 235-80-20 -29
		ST	86	55,49	29- 35-101-28-197-177-55 -29
11	2	MT	168	338,11	241-83-116-82-8-45-41-38-93-78-44-96-21-160-60-189-241
		ST	12	6,89	83- 28 -83
12	2	MT	154	211,11	241-112-103-53-120-31-6-192-66-190-241
		ST	24	6,30	66- 24 -66
13	2	MT	108	182,01	241-37-9-10-3-111-42-25-97-49-174-241
		ST	19	6,09	111- 13 -111
		ST	34	9,90	9- 12-32 -9
		ST	19	16,93	49- 208-128 -49
14	2	MT	62	66,33	241-85-221-204-72-241
		ST	89	22,46	204- 34-179-99-237-43 -204
		ST	27	25,07	221- 56-54-18 -221
15	2	MT	15	6,81	241-213-241
		ST	82	41,63	213-29- 55-20-187-35 -213
16	2	MT	6	20,23	241-207-241
		ST	59	16,49	207-162- 30-64-106 -207
		ST	83	44,36	207- 202 -77-62- 146-118-108-5 -207
17	2	MT	140	181,89	241-14-7-95-76-98-110-68-47-232-27-122-241
		ST	36	6,30	232- 147-2 -232
18	2	MT	134	123,57	241-217-161-91-75-154-51-39-94-90-4-241
		ST	20	11,64	4- 15 -4
		ST	22	8,12	161- 11 -161
19	2	MT	155	214,86	241-165-36-88-155-58-70-46-52-40-63-26-241
		ST	2	4,37	88- 50 -88
		ST	20	8,58	26- 23-17 -26
20	2	MT	180	199,52	241-81-33-57-48-114-1-16-19-180-223-22-59-241
21	3	MT	180	312,05	241-150-149-226-8-45-41-38-89-31-186-53-42-138-140-241
22	3	MT	142	200,82	241-26-27-233-40-52-46-109-178-119-241
		ST	26	9,62	26- 196-17-23 -26
		ST	9	14,13	119- 50-71 -119
23	3	MT	144	216,44	241-84-60-44-104-168-184-48-21-57-33-241
		ST	33	10,47	84- 124-11 -84

Fortsetzung PT13

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
24	3	MT	178	233,93	241-51-19-200-1-16-117-209-228-86-58-92-67-36-241
25	3	MT	95	87,48	241-145-3-205-10-9-37-100-241
		ST	34	9,90	9- 12-32 -9
		ST	41	6,44	205- 107-13 -205
26	3	MT	158	143,29	241-183-102-61-4-129-39-22-159-65-210-241
		ST	20	11,64	4- 15 -4
27	3	MT	133	176,21	241-182-137-113-49-87-25-69-7-134-14-241
		ST	41	26,86	134- 2 -47-134
28	3	MT	30	48,89	241-29-135-241
		ST	88	85,79	135- 28 -181-6-74- 24-73 -135
		ST	58	21,65	29- 80-20-55 -29
29	3	MT	21	12,53	241-79-241
		ST	77	60,34	79- 54-18-43-34-239-56 -79
30	3	MT	0	0,00	241-241
		ST	74	36,72	241- 227-105 -59- 115-125-214-231 -241
		ST	87	54,61	241- 35-101-166-5-30 -241
31	4	MT	142	324,57	241-60-224-96-44-78-93-38-41-45-8-82-172-116-83-241
		ST	37	8,88	83- 230-28 -83
32	4	MT	119	104,47	241-3-10-112-185-66-9-241
		ST	24	6,30	66- 24 -66
		ST	34	9,90	9- 32-12 -9
33	4	MT	159	257,62	241-37-6-222-103-31-167-191-120-53-111-175-62-241
		ST	19	6,09	111- 13 -111
34	4	MT	63	83,16	241-85-72-26-36-241
		ST	82	33,81	26- 99-34-43-17-23 -26
		ST	27	22,16	36- 18-54-56 -36
35	4	MT	13	21,83	241-151-241
		ST	82	57,25	241- 5-108-118-64-106-30 -241
		ST	84	34,67	151- 35-20-55-203 -29-151
36	4	MT	131	149,03	241-198-77-136-139-171-236-25-97-49-241
		ST	49	55,28	236-42- 126-152 -236
37	4	MT	155	176,15	241-14-7-95-130-76-98-110-68-47-215-27-241
		ST	25	11,13	215- 2 -215
38	4	MT	170	214,41	241-144-163-63-40-216-52-46-70-58-88-241
		ST	2	4,37	88- 50 -88
39	4	MT	136	104,17	241-81-142-193-91-33-131-75-4-133-59-241
		ST	20	11,64	4- 15 -4
		ST	22	12,18	91- 11 -91
40	4	MT	179	217,62	241-57-21-48-114-1-16-19-22-90-94-39-51-241

PT14: Gesamtdistanz 7798,14

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	174	281,76	241-74-6-222-186-31-89-38-41-45-8-226-82-172-241
2	1	MT	132	222,45	241-40-109-46-52-47-68-134-7-14-241
		ST	48	30,77	134- 232-2-27 -134
3	1	MT	95	201,69	241-3-53-120-42-169-25-97-241
		ST	81	33,87	3- 32-12-10-107-13 -3
4	1	MT	154	214,91	241-161-189-60-44-104-184-48-21-57-33-91-241
		ST	22	8,12	161- 11 -161
5	1	MT	26	50,36	241-221-72-241
		ST	77	45,81	72- 63-17-23-196-26-237-43 -72
		ST	74	25,28	72- 201-123-204-34 -72
6	1	MT	74	95,98	241-157-75-154-51-4-241
		ST	78	62,02	51- 200-1-16-19-39 -51
		ST	20	11,64	4- 15 -4
7	1	MT	16	29,91	241-182-241
		ST	90	52,61	182- 106-64-202-118-108-5-207-30 -182
		ST	72	41,81	182- 198-77 -113- 87-49 -182
8	1	MT	17	88,38	241-92-241
		ST	84	116,65	92-159-22-228- 86-220 -58-92
		ST	71	48,79	92- 50-71-176-178-88 -92
9	1	MT	10	33,53	241-37-241
		ST	90	70,59	37- 9-185 -192- 24 -37
		ST	76	54,01	37- 20-55-177-197 -135- 28 -37
10	1	MT	0	0,00	241-241
		ST	86	43,58	241- 100-35-80-29-213 -241
		ST	89	54,05	241- 105-59-115 -36- 18-54-56-79 -241
11	2	MT	141	346,20	241-60-224-96-44-78-93-38-41-45-8-195-6-116-181-241
		ST	31	16,18	181- 28-83 -181
12	2	MT	0	0,00	241-241
		ST	86	73,88	241- 56-143-43-238-18-54-59 -241
		ST	87	54,61	241- 30-5-166-101-35 -241
13	2	MT	114	203,61	241-215-40-52-46-70-164-119-241
		ST	61	28,92	215-47- 2-27 -215
		ST	2	9,87	164- 50 -164
14	2	MT	154	244,32	241-62-175-171-42-191-167-31-103-53-3-241
		ST	26	22,81	3- 111-13-10 -3
15	2	MT	38	64,60	241-158-61-241
		ST	88	112,27	61- 65 -58-22- 90-94-39 -51-4-61
		ST	38	13,94	158- 15-211 -158
16	2	MT	86	82,83	241-165-36-67-144-85-241
		ST	90	48,31	144- 17-23-26-229-218-34-99 -144
17	2	MT	18	38,95	241-81-241
		ST	76	26,75	81- 29-151-217-102 -81
		ST	80	42,95	81- 20-55-11 -142-81
18	2	MT	21	52,94	241-37-170-241
		ST	47	16,86	170- 32-9 -170
		ST	90	54,01	170- 190-66-73-24-112-12 -170
19	2	MT	104	162,06	241-84-160-21-48-114-57-33-241
		ST	68	68,76	114- 19 -117- 16-1 -114
20	2	MT	138	213,15	241-136-25-234-69-98-110-76-7-14-174-137-241
		ST	14	9,37	174- 49 -174
		ST	22	20,29	76- 130-95 -76
21	3	MT	180	299,91	241-53-120-31-219-89-38-41-199-45-8-82-6-74-241
22	3	MT	0	0,00	241-241
		ST	89	41,82	241- 225-162-106-64-77-30 -241
		ST	87	95,87	241-37- 9-24-28-35 -241

Fortsetzung PT14

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
23	3	MT	0	0,00	241-241
		ST	87	51,33	241- 100-80-20-55-29 -241
24	3	MT	13	51,57	241-145-241
		ST	76	39,29	145- 108-146-118-5-32-12 -145
		ST	83	31,06	145-3- 10-205-107-13 -145
25	3	MT	26	58,09	241-72-36-241
		ST	50	20,27	72- 43-34-239 -72
		ST	22	8,93	36- 18-54 -36
		ST	78	64,00	72- 26-23-17-63-71-50-88 -72
26	3	MT	0	0,00	241-241
		ST	89	33,57	241- 105-227-141-153-56-132-79 -241
		ST	77	38,01	241- 188-183-231-214-125-115-59 -241
27	3	MT	147	217,85	241-60-44-104-168-48-21-57-194-131-33-91-241
		ST	22	12,18	91- 11 -91
28	3	MT	91	172,82	241-14-7-97-25-236-138-140-113-241
		ST	49	55,28	236-42- 126-152 -236
		ST	27	16,08	113- 87-49 -113
29	3	MT	78	150,79	241-75-51-223-22-4-241
		ST	60	36,02	223- 16-1-19-180 -223
		ST	19	9,95	51- 39 -51
		ST	20	11,64	4- 15 -4
30	3	MT	94	205,79	241-233-40-52-46-109-58-92-241
		ST	85	47,99	233- 27-2-147 -68-47-233
		ST	1	30,78	58- 86 -58
31	4	MT	177	412,66	241-150-149-116-6-8-45-41-78-93-38-31-103-53-42-241
32	4	MT	107	199,01	241-40-216-52-46-70-119-241
		ST	69	49,05	216-47- 2-27-122-127 -216
		ST	2	13,67	119- 50 -119
33	4	MT	152	269,00	241-44-96-21-57-48-114-117-209-22-210-241
		ST	27	16,73	210- 173-65 -210
34	4	MT	23	62,73	241-3-121-241
		ST	83	57,44	3- 10-112-24-73-66 -3
		ST	38	22,44	3- 111-156-13 -3
		ST	32	17,38	121- 212-30 -121
35	4	MT	18	38,95	241-81-241
		ST	73	24,80	81- 203-55-20-235-187 -81
		ST	89	67,44	81-193-33-84-60- 124-11 -81
36	4	MT	72	119,77	241-36-67-58-155-163-241
		ST	78	26,41	163- 17-23-26-179-99 -163
		ST	22	8,93	36- 54-18 -36
37	4	MT	164	205,61	241-85-240-14-7-76-110-98-69-25-139-62-241
		ST	15	19,20	76- 95 -76
38	4	MT	71	78,17	241-133-4-129-61-241
		ST	87	78,49	129-51- 39-19-1-16-94-90 -129
		ST	20	11,64	4- 15 -4
39	4	MT	0	0,00	241-241
		ST	90	45,22	241- 148-59-102-29-35-101 -241
		ST	84	92,09	241- 56-43-34-128-208-49 -241
40	4	MT	10	33,53	241-37-241
		ST	86	49,22	37- 5-32-12-206-9 -37
		ST	56	30,63	37- 83-230-28 -37

PT15: Gesamtdistanz 8767,83

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	18	99,23	241-192-241
		ST	72	47,18	192-103- 112-24 -192
		ST	89	203,58	192-53-31-38-41- 199-45-8-6 -192
2	1	MT	64	146,89	241-223-22-159-241
		ST	84	65,42	223- 16-1-19-180-51-39 -223
		ST	24	46,74	159- 220-86-58 -159
3	1	MT	103	236,97	241-155-70-46-52-110-98-76-7-241
		ST	76	45,36	76-68-47-2-130-95 -76
4	1	MT	78	213,80	241-224-96-44-104-168-21-57-241
		ST	20	14,40	168- 48 -168
		ST	76	53,59	224- 33-91-11-84-60 -224
5	1	MT	66	186,33	241-25-69-234-169-236-241
		ST	74	85,16	236-42- 13-107-10-3-111 -236
6	1	MT	20	77,88	241-14-241
		ST	86	52,54	14- 179-99-26-23-17-196-229 -14
		ST	74	50,46	14- 123-240-49-208-128 -14
7	1	MT	0	0,00	241-241
		ST	90	130,26	241- 119-50-40-27-122-34 -241
		ST	89	66,16	241- 56-143-43-238-18-54-141 -241
8	1	MT	0	0,00	241-241
		ST	89	82,14	241- 36-67-65-173-210-231-105 -241
		ST	88	73,79	241- 102-133-211-15-4-59 -241
9	1	MT	10	33,53	241-37-241
		ST	72	40,49	37- 9-206-12-32 -37
		ST	86	46,04	37- 20-80-177-197 -135- 28 -37
10	1	MT	0	0,00	241-241
		ST	89	51,51	241- 217-81-55-29-35 -241
		ST	90	64,03	241- 100-5-108-146-77-64-106-30 -241
11	2	MT	178	389,14	241-41-78-93-38-89-219-31-53-120-42-25-97-241
		ST	1	27,94	41- 45 -41
12	2	MT	108	266,81	241-109-58-228-209-117-22-241
		ST	72	93,43	109- 176-40-52-46 -109
13	2	MT	66	186,83	241-44-21-57-114-241
		ST	80	68,76	114- 19-16-1-184-48 -114
14	2	MT	20	77,88	241-14-241
		ST	62	35,25	14- 34-239-43-201 -14
		ST	90	61,60	14-7- 134-232-147-2-47-27 -14
15	2	MT	17	88,38	241-92-241
		ST	89	62,05	92- 88-164-63-17-23-26-71-50 -92
		ST	50	18,78	241- 35-101-213 -241
16	2	MT	25	54,41	241-61-241
		ST	58	50,22	61- 90-94-39-51-4 -61
		ST	89	89,69	61- 15-75-33-60-124-11 -61
17	2	MT	12	78,55	241-116-241
		ST	71	27,95	116- 230-28-83-181 -116
		ST	88	86,23	116- 82-8-195-6-74-24-73 -116
18	2	MT	0	0,00	241-241
		ST	87	71,08	241- 182-137-49-87-113-62 -241
		ST	88	83,97	241- 121-32-12-9-66-190 -241
19	2	MT	0	0,00	241-241
		ST	89	67,20	241- 30-85-221-72-18-54-36 -241
		ST	89	83,85	241- 5-3-10-205-13-118 -241
20	2	MT	0	0,00	241-241
		ST	90	51,07	241- 79-56-165-115-125-214-59-148-227 -241
		ST	75	61,30	241- 29-55-20-187 -37-241
21	3	MT	43	146,74	241-53-103-222-241
		ST	48	32,40	103- 112-185 -103
		ST	89	174,87	222-6- 8-45 -41-38-31-186-222

Fortsetzung PT15

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
22	3	MT	114	266,09	241-70-46-52-110-98-69-25-241
		ST	64	79,83	110-76- 27-127-233-40-216 -110
23	3	MT	10	77,88	241-140-241
		ST	89	53,78	140- 111-156-13-107-10-3-175 -140
		ST	70	95,14	140- 152-126-42-171-138 -140
24	3	MT	51	193,29	241-44-104-96-21-160-241
		ST	74	76,92	21-57- 19-16-1-48 -21
		ST	54	47,38	160- 33-91-84-60 -160
25	3	MT	21	67,47	241-67-241
		ST	81	41,55	67- 119-17-23-26-144 -67
		ST	73	133,73	67- 65-4-51-39-22-86-58-50 -67
26	3	MT	20	77,88	241-14-241
		ST	80	38,27	14- 204-43-237-99-34 -14
		ST	78	61,78	14- 2-47-68-95 -7-14
27	3	MT	10	33,53	241-37-241
		ST	83	67,27	37- 28-24-9-32 -37
		ST	85	55,39	37- 170-12-145-108-5-166 -37
28	3	MT	0	0,00	241-241
		ST	87	80,01	241- 55-203-161-11-157 -241
		ST	86	42,49	241- 35-235-20-80-100 -241
29	3	MT	0	0,00	241-241
		ST	87	90,68	241- 105-59-158-15-36-18-54-56 -241
		ST	89	43,47	241- 29-81-102-183-188 -241
30	3	MT	0	0,00	241-241
		ST	90	70,22	241- 30-198-77-136-49-174 -241
		ST	82	31,28	241- 207-106-64-162-225-212 -241
31	4	MT	22	79,58	241-37-116-241
		ST	54	54,27	116-172- 82-8-226 -116
		ST	89	53,48	37- 28-83-9-12-32 -37
32	4	MT	112	316,02	241-44-78-41-93-38-89-6-74-241
		ST	53	25,16	74- 73-66-24 -74
		ST	1	27,94	41- 45 -41
33	4	MT	110	270,05	241-97-25-42-191-167-31-120-53-241
		ST	64	66,58	97- 49-87-113-62-139 -97
34	4	MT	0	0,00	241-241
		ST	89	77,37	241- 72-43-18-54-36-115-59 -241
		ST	83	35,37	241- 79-132-56-153-85 -241
35	4	MT	0	0,00	241-241
		ST	89	40,05	241- 101-35-20-29-151 -241
		ST	88	85,81	241- 30-202-118-13-10-3-5 -241
36	4	MT	15	79,98	241-189-241
		ST	36	36,85	189- 60-149-150 -189
		ST	82	44,09	189- 55-142-193-11 -189
37	4	MT	25	54,41	241-61-241
		ST	80	50,36	61- 4-129-51-39-94-90 -61
		ST	74	68,82	61-154- 194-131-33-75-15 -61
38	4	MT	17	88,38	241-92-241
		ST	66	44,76	92- 163-63-71-50-88 -92
		ST	89	138,50	92- 178-40-52-46-109-58 -92
39	4	MT	20	77,88	241-14-241
		ST	72	52,31	14- 34-26-23-17-218 -14
		ST	88	60,57	14-7- 2-47-215-27 -14
40	4	MT	73	195,72	241-22-117-114-57-241
		ST	59	36,14	114- 200-19-16-1 -114
		ST	42	32,19	57-21- 48 -57

PT16: Gesamtdistanz 8556,06

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	155	253,25	289-76-122-143-34-42-68-205-103-105-20-28-289
		ST	20	16,56	76- 14 -76
2	1	MT	173	243,41	289-44-224-266-59-136-119-275-110-248-169-8-69-289
3	1	MT	166	318,62	289-250-208-63-134-7-9-37-192-154-164-6-132-201-30-289
		ST	9	13,01	250- 13 -250
4	1	MT	141	236,97	289-281-117-120-186-48-43-70-115-32-4-233-53-284-54-289
		ST	32	8,37	32- 79-31 -32
5	1	MT	174	298,52	289-18-61-51-10-56-24-71-85-27-35-5-15-165-75-148-198-58-289
6	1	MT	155	176,17	289-16-29-36-219-26-46-1-22-45-21-12-33-289
		ST	2	6,33	46- 52 -46
		ST	13	16,90	12- 108-47-163 -12
7	1	MT	65	49,56	289-209-40-23-145-289
		ST	84	47,49	23- 57-62 -50-126- 2-65 -64-23
		ST	19	11,24	145- 181-211 -145
8	1	MT	88	105,37	289-55-279-270-19-78-137-289
		ST	47	13,93	19- 167-81-139-228 -19
		ST	36	8,58	137- 87-74 -137
9	1	MT	59	69,95	289-180-265-220-72-60-289
		ST	20	7,75	180- 39 -180
		ST	81	43,25	220- 194 -256-41-25- 185-251 -220
10	1	MT	93	82,67	289-11-67-49-179-153-289
		ST	81	50,51	179- 114-66-38-17-146-173-3-111-109 -179
11	1	MT	0	0,00	289-289
		ST	79	47,86	289- 99-127-133-188-83 -289
12	2	MT	134	288,12	289-84-278-230-124-42-68-80-34-287-91-216-289
		ST	41	11,21	91- 14-116 -91
13	2	MT	155	260,51	289-77-25-104-59-142-158-70-43-48-263-44-86-289
		ST	20	10,46	77- 39 -77
14	2	MT	150	260,21	289-100-54-53-260-32-4-92-222-89-71-27-35-5-15-204-289
		ST	23	4,80	32- 31 -32
15	2	MT	165	285,51	289-129-246-1-21-45-22-161-6-93-141-37-9-207-97-234-289
		ST	10	15,75	246- 102-98 -246
16	2	MT	141	218,02	289-58-18-82-203-61-56-24-10-51-144-280-288-135-101-289
		ST	30	26,52	135- 272-17-38-66 -135
17	2	MT	160	148,96	289-55-175-106-33-12-30-121-128-182-215-19-289
		ST	3	14,78	12- 47 -12
18	2	MT	100	101,29	289-277-60-72-69-90-8-20-28-289
		ST	67	35,47	90-112-41- 140 -147-131-90
19	2	MT	127	107,82	289-95-130-88-46-26-123-36-29-16-236-223-289
		ST	34	20,18	46- 196-162-241-52 -46
		ST	13	4,19	130- 138 -130
20	2	MT	78	55,99	289-40-64-237-191-107-232-289
		ST	79	37,04	237- 96-2 -73- 113-13-65 -237
21	2	MT	128	194,48	289-50-63-206-7-94-239-227-155-23-289
		ST	27	8,77	155- 170-183 -155
		ST	20	12,47	23- 57-62 -23
22	2	MT	72	79,01	289-11-67-49-184-289
		ST	83	26,88	184- 254-269-231-3-242 -184
		ST	20	5,47	184- 255 -184
23	2	MT	0	0,00	289-289
		ST	59	24,89	289-125- 176-118 -289
24	3	MT	154	156,89	289-20-286-34-197-143-122-76-78-289
		ST	20	16,56	76- 14 -76
25	3	MT	173	397,56	289-117-120-48-70-43-258-59-136-119-110-42-68-103-105-60-289

Fortsetzung PT16

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
26	3	MT	151	233,87	289-46-259-37-1-21-45-22-6-214-132-30-33-19-289
		ST	21	31,20	33-12- 108-47-81-139 -33
		ST	2	6,33	46- 52 -46
27	3	MT	175	362,09	289-75-202-15-171-5-35-27-85-71-24-226-56-10-51-61-18-58-289
28	3	MT	174	222,44	289-16-238-29-36-26-225-199-9-244-7-134-63-174-50-126-289
29	3	MT	139	172,74	289-11-67-49-262-283-115-32-4-53-54-156-289
		ST	32	8,37	32- 79-31 -32
30	3	MT	25	38,86	289-40-289
		ST	81	62,84	40-64- 65-274-13-2-62-57 -23-40
31	3	MT	148	120,87	289-160-218-44-25-276-41-69-8-72-172-253-289
		ST	20	4,78	172- 39 -172
32	3	MT	69	78,28	289-55-137-261-273-28-289
		ST	36	8,58	137- 87-74 -137
		ST	60	33,57	55- 99-127-249-133 -55
33	3	MT	22	30,32	289-268-289
		ST	85	75,87	268- 114-66-38-245-17-217-3-111-109 -268
34	3	MT	0	0,00	289-289
		ST	26	11,25	289- 168-83 -289
35	4	MT	172	311,69	289-58-18-82-61-10-51-144-187-35-193-257-24-56-94-7-63-50-289
36	4	MT	130	247,53	289-91-34-149-212-42-68-80-159-243-20-150-28-289
		ST	41	11,21	91- 116-14 -91
37	4	MT	152	254,11	289-54-53-4-32-157-240-89-71-92-235-27-5-15-289
		ST	23	4,80	32- 31 -32
38	4	MT	169	298,08	289-97-178-9-189-37-141-93-6-271-124-121-128-30-84-19-289
39	4	MT	167	258,96	289-86-285-44-25-104-59-142-70-43-48-152-49-67-190-289
40	4	MT	170	173,67	289-16-29-36-123-26-46-1-22-45-21-12-33-106-289
		ST	2	6,33	46- 52 -46
		ST	3	14,78	12- 47 -12
41	4	MT	67	83,46	289-77-72-69-90-8-200-60-289
		ST	27	10,51	77- 264-39 -77
		ST	71	32,90	90-112-41- 140-213 -131-90
42	4	MT	72	87,83	289-55-166-88-130-210-95-289
		ST	24	6,69	130- 229-138 -130
		ST	79	20,62	166-129- 195-98-252-102-267 -166
43	4	MT	81	78,83	289-107-151-73-64-23-40-289
		ST	27	13,03	73- 13-113 -73
		ST	59	24,14	64- 57-62-96-2-65 -64
44	4	MT	0	0,00	289-289
		ST	34	23,87	289-125- 118 -289
45	4	MT	71	95,80	289-11-247-100-135-101-289
		ST	72	26,24	135- 282-17-221-38-66-177 -135
		ST	17	12,58	100- 3 -100

PT17: Gesamtdistanz 9248,18

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	154	412,03	289-50-206-7-94-56-226-24-71-85-27-35-51-10-61-289
		ST	11	31,26	71- 89 -71
2	1	MT	136	288,44	289-30-278-230-124-212-42-68-103-105-20-150-289
		ST	37	10,34	30- 121-128 -30
3	1	MT	131	287,22	289-44-224-266-59-142-158-70-43-48-115-283-260-53-289
		ST	39	36,24	283- 32-31 -4-283
4	1	MT	41	95,19	289-88-129-166-55-289
		ST	85	147,39	129- 162-1-22-6 -93-141-37- 52-46 -129
		ST	48	37,23	129- 106-228-19 -129
5	1	MT	85	177,08	289-29-36-97-178-9-134-63-73-151-289
		ST	27	13,03	73- 13-113 -73
		ST	31	14,90	36- 26-123 -36
		ST	27	15,24	29- 16-238 -29
6	1	MT	49	76,65	289-60-69-220-72-253-289
		ST	52	17,63	69- 8-131-90 -69
		ST	69	42,75	220- 194-41-276 -25- 185-251 -220
7	1	MT	50	150,14	289-84-34-91-28-289
		ST	41	11,21	91- 116-14 -91
		ST	84	55,68	84- 215-33 -12- 45-21-47-167-81-139 -84
8	1	MT	7	79,08	289-100-289
		ST	83	63,60	100- 3-54-204 -15- 5-17-245 -100
		ST	82	33,45	100- 156-179-66-114 -135- 38 -100
9	1	MT	55	66,87	289-58-18-82-23-289
		ST	72	29,22	23- 57-62-126-96-2-65-64 -23
		ST	46	15,63	18- 209-40 -18
10	1	MT	44	60,16	289-86-11-289
		ST	52	33,21	86- 39-180-118-281 -86
		ST	76	36,08	11-117- 184-255-49-67 -11
11	1	MT	0	0,00	289-289
		ST	84	91,88	289- 273-261-130-95-107-83 -289
		ST	12	6,92	289- 125 -289
12	2	MT	127	240,86	289-34-286-159-80-42-68-205-243-20-28-289
		ST	45	13,69	34- 197-287 -34
13	2	MT	56	158,88	289-182-30-201-12-289
		ST	84	79,24	201- 21-45-22-6-214 -271-132-201
		ST	23	8,06	12- 33 -12
14	2	MT	132	278,17	289-262-53-4-92-222-71-157-70-43-48-186-120-289
		ST	42	24,35	4- 79-32-31 -4
15	2	MT	164	257,26	289-101-75-15-235-27-35-193-257-24-56-10-51-61-18-58-289
		ST	6	15,98	15- 5 -15
		ST	3	18,80	75- 144 -75
16	2	MT	91	212,89	289-29-36-225-199-9-7-63-174-50-289
		ST	84	82,17	225-37- 1-108-47-163-196-241-52-46-26 -225
17	2	MT	8	67,59	289-137-289
		ST	83	54,46	137- 19-98-252-102-175-270-87-74 -137
		ST	83	65,53	137-76-122-143- 14 -78-137
18	2	MT	162	244,82	289-44-25-104-59-136-119-275-110-248-169-200-60-289
19	2	MT	18	50,46	289-153-289
		ST	73	59,29	153- 66-38-17-54-217-173-3 -153
		ST	81	37,31	153- 109-111-49-67 -11-153
20	2	MT	17	47,11	289-23-289
		ST	85	31,76	23- 40-274-65-2-237-64 -23
		ST	69	35,24	23- 155-183-170-62-57 -23
21	2	MT	16	50,39	289-72-77-289
		ST	74	34,33	77- 265-160-218-39-264 -77
		ST	80	60,96	72- 8-112-140-41-256 -69-72
22	2	MT	12	33,50	289-223-289
		ST	53	16,67	223- 249-188-133 -223
		ST	81	74,64	223- 13-16-138-55-99-127 -223

Fortsetzung PT17

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
23	3	MT	137	293,94	289-84-30-124-149-34-42-68-103-105-28-289
		ST	37	10,34	30- 121-128 -30
24	3	MT	100	263,12	289-44-48-70-43-258-142-59-25-69-72-60-289
		ST	70	32,91	69- 41-131-90-8 -69
25	3	MT	91	195,65	289-15-35-27-85-4-233-53-284-289
		ST	29	53,29	85- 89-240 -71-85
		ST	15	17,03	15- 171-5 -15
		ST	34	44,80	4- 31-32 -115-4
26	3	MT	81	235,88	289-97-207-9-189-141-93-164-192-37-289
		ST	74	46,13	164- 154-1-21-45-22 -164
		ST	19	40,17	93- 6 -93
27	3	MT	175	293,80	289-50-63-134-7-94-56-24-10-51-61-239-227-82-18-58-289
28	3	MT	14	94,59	289-129-88-289
		ST	85	56,17	129-246- 47-12-33-81-139-106-19 -129
		ST	74	55,51	88- 16 -29-36- 123-26-52-46 -88
29	3	MT	45	98,35	289-55-216-20-289
		ST	53	34,99	216-91- 116-14 -216
		ST	68	28,53	55- 279-130-210-95 -55
30	3	MT	47	74,70	289-268-135-289
		ST	83	46,51	135- 272-221-17-54-3 -100- 38 -135
		ST	43	19,13	135- 282-177-66-114 -135
31	3	MT	69	67,57	289-86-285-117-11-190-289
		ST	84	39,42	117- 67-49-269-254 -152-117
		ST	20	13,29	86- 39 -86
32	3	MT	33	70,15	289-250-23-289
		ST	72	29,22	23- 64-65-2-96-126-62-57 -23
		ST	40	21,54	250- 13-113 -73-250
		ST	25	9,98	23- 40 -23
33	3	MT	0	0,00	289-289
		ST	71	36,10	289- 168-83-232-107-191-181-211-145 -289
		ST	59	24,89	289- 118-176-125 -289
34	4	MT	164	344,01	289-44-25-104-59-136-119-110-42-68-80-34-20-289
35	4	MT	65	149,11	289-12-30-122-143-76-289
		ST	83	105,26	12- 21-45-22 -132- 6 -161- 1-47-108 -12
		ST	23	8,06	12- 33 -12
36	4	MT	130	283,44	289-53-27-71-92-4-70-43-48-263-120-289
		ST	42	24,35	4- 79-32-31 -4
37	4	MT	89	234,32	289-18-203-61-51-10-56-24-35-187-75-288-101-289
		ST	50	34,27	187- 5-15-202-165 -187
		ST	36	33,01	288- 148-198-280-144 -288
38	4	MT	99	231,73	289-234-208-63-7-244-9-37-219-36-29-236-289
		ST	35	26,01	219- 26-259-52-46 -219
		ST	20	13,83	29- 16 -29
		ST	9	11,84	234- 13 -234
39	4	MT	35	73,77	289-77-72-69-60-277-289
		ST	77	39,61	69- 147-213-140-41-112 -69
		ST	19	8,96	69- 8 -69
		ST	43	11,45	77- 39-172 -77
40	4	MT	45	82,81	289-28-78-137-289
		ST	36	8,58	137- 74-87 -137
		ST	77	66,39	78- 14-19-98-195-102-267 -78
41	4	MT	34	64,52	289-11-247-289
		ST	80	60,56	247- 109-66-38-17-146-54-3-231-242 -247
		ST	56	22,53	247- 111-49-67 -247
42	4	MT	33	52,88	289-58-23-289
		ST	75	47,29	23- 64-65-2-50-62-57 -23
		ST	25	9,98	23- 40 -23
43	4	MT	0	0,00	289-289
		ST	85	61,80	289- 127-99-55-138-229-133 -289

PT18: Gesamtdistanz 10509,01

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	94	263,42	289-18-82-61-51-10-24-56-94-7-206-289
		ST	79	108,79	51- 54-53-260-233-171-5-35-193 -51
2	1	MT	5	112,84	289-76-289
		ST	83	149,20	76- 197 -42-68- 80-34-287 -76
		ST	85	58,44	76- 84-33-30-143-14 -76
3	1	MT	153	279,30	289-48-43-70-158-142-59-248-169-105-20-28-289
4	1	MT	36	221,48	289-9-189-141-93-289
		ST	84	86,84	93- 1-21-45-22-214-6 -93
		ST	54	82,78	141- 199-123-26-46-52-37-192 -141
5	1	MT	42	159,11	289-15-92-4-289
		ST	42	24,35	4- 31-32-79 -4
		ST	82	93,38	92-157- 240-89 -71-85- 27-235 -92
6	1	MT	1	70,84	289-88-289
		ST	84	73,61	88- 102-98-19-106-81-12-47-246-129 -88
		ST	84	40,67	88- 166-195-252-267-138 -88
7	1	MT	24	81,97	289-50-289
		ST	63	43,93	50- 96-2-65-64-57-62 -50
		ST	83	104,60	50- 73-13-16-29-36 -207-134- 63 -50
8	1	MT	33	98,41	289-44-25-289
		ST	78	63,78	25- 41-140-131-90-8-69-251-185 -25
		ST	62	57,91	44- 117-11-67-120 -44
9	1	MT	5	46,63	289-101-289
		ST	84	50,94	101- 109-111-156-245-17-38-66-114 -101
		ST	83	66,08	101- 100-3-231-255-184-49 -101
10	1	MT	0	0,00	289-289
		ST	84	81,87	289- 137-74-87-175-279-55 -289
11	1	MT	0	0,00	289-289
		ST	83	40,15	289- 188-133-223-107-232-83 -289
		ST	76	53,16	289- 277-60-72-77-172-39 -289
12	1	MT	0	0,00	289-289
		ST	77	53,28	289- 211-181-23-40-58 -289
13	2	MT	64	130,65	289-103-205-243-20-289
		ST	81	129,15	205- 286-34 -149-212-42-68-205
14	2	MT	80	204,03	289-115-70-43-48-263-44-289
		ST	83	144,21	115- 53-5-35-27 -71-4- 31-32 -115
15	2	MT	86	227,94	289-110-119-136-59-104-25-289
		ST	79	45,62	25- 256-69-8-112-41 -25
16	2	MT	2	166,04	289-161-289
		ST	85	108,00	161- 132-121-128 -124- 6 -161
		ST	83	54,04	161- 22-45-21-108-47-1-154 -161
17	2	MT	106	239,87	289-75-15-187-257-24-56-10-51-61-203-289
		ST	66	44,97	75- 144-288-135-38-282 -75
18	2	MT	9	77,32	289-97-289
		ST	78	176,37	97- 36-26-46-52-241-196-37 -9-7- 63 -208-97
		ST	75	50,27	97- 13-113-250-16-29 -97
19	2	MT	3	46,99	289-18-289
		ST	84	62,83	18- 57-62 -50- 126-2-65-64 -18
		ST	79	29,47	18- 23-40-209-58 -18
20	2	MT	10	79,44	289-216-289
		ST	84	85,65	216- 78-139-33-12-30-122 -216
		ST	80	66,71	216- 19-228-14-116-91 -216
21	2	MT	0	0,00	289-289
		ST	84	109,24	289- 67-49-3-217-54-146-17-66 -289
22	2	MT	15	30,91	289-28-289
		ST	75	65,66	28- 55-270-261-273-150 -28
		ST	82	60,04	28- 99-229-130-210-95-127 -28
23	2	MT	0	0,00	289-289
		ST	84	61,62	289- 180-281-11-118-125-168 -289
24	2	MT	0	0,00	289-289
		ST	82	63,42	289- 60-72-265-160-86-39 -289

Fortsetzung PT18

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
25	3	MT	5	112,84	289-76-289
		ST	80	38,79	76- 182-30-33-215-84 -76
		ST	81	154,64	76- 143-34 -42-68- 80-159-14 -76
26	3	MT	85	253,85	289-44-48-70-43-258-142-59-25-289
		ST	81	56,11	25- 41-147-213-140-266-224 -25
27	3	MT	42	159,11	289-15-92-4-289
		ST	54	79,47	92- 27 -85-71- 89 -222-92
		ST	42	24,35	4- 79-32-31 -4
		ST	35	41,07	15- 5-35-165-202 -15
28	3	MT	12	186,92	289-178-9-141-289
		ST	84	109,28	141-93- 6-22-45-21-1 -141
		ST	78	112,49	141- 37-162-129-102-98-19-106-81-167-12-47 -141
29	3	MT	124	331,05	289-18-82-61-51-10-24-226-56-94-7-50-289
		ST	49	29,78	50- 155-183-170 -50
30	3	MT	1	70,84	289-88-289
		ST	75	54,23	88- 46-52-259-225-26-123-36 -88
		ST	83	104,47	88- 29 -134- 63-174-73-13-234 -88
31	3	MT	14	100,41	289-262-289
		ST	84	52,59	262- 152-186-120-254-269-242 -262
		ST	71	35,82	262- 3-173-54-53-284 -262
32	3	MT	49	90,70	289-200-105-20-28-289
		ST	82	44,30	200- 72-220-69-90-131 -8-200
		ST	44	47,05	20- 137-87-74 -20
33	3	MT	5	46,63	289-101-289
		ST	68	54,56	101- 109-111-179-100-17-38-66-114 -101
		ST	82	60,58	101- 11-117-49-67-153 -101
34	3	MT	0	0,00	289-289
		ST	82	66,08	289- 58-40-23-57-62-64 -289
		ST	80	61,27	289- 83-191-274-65-96-2-151-107 -289
35	3	MT	0	0,00	289-289
		ST	82	75,13	289- 55-138-16-236-133-249 -289
		ST	58	44,14	289- 253-39-264-77-60 -289
36	4	MT	115	378,32	289-124-42-68-110-275-119-136-59-104-289
		ST	56	50,99	124- 121-30-128 -124
37	4	MT	15	167,27	289-164-289
		ST	70	119,07	164- 1-163-47-108-12-33-139-19-46-52-37 -164
		ST	81	88,65	164- 6-271-132-201-21-45-22 -164
38	4	MT	70	208,81	289-44-48-43-70-115-283-289
		ST	83	133,90	283- 32-31 -4-71- 27-35-5-53 -283
39	4	MT	9	93,76	289-75-289
		ST	83	47,25	75-15- 204-54-17-221-38-272 -75
		ST	82	160,63	75- 144 -51-10-24-56- 239-227 -61- 280 -75
40	4	MT	9	77,32	289-97-289
		ST	85	150,94	97- 13-113 -50- 63 -7-244-9-97
		ST	81	50,01	97- 36-26-219-29-238-16 -97
41	4	MT	16	89,06	289-25-289
		ST	85	45,52	25- 194-69-8-112-41-276 -25
42	4	MT	23	72,39	289-20-289
		ST	76	112,08	20- 122-278-230-34 -103-20
		ST	75	62,64	20- 91-116-14-78 -20
43	4	MT	0	0,00	289-289
		ST	83	95,69	289- 247-3-49-67-11 -289
		ST	68	25,51	289- 190-118-176-125 -289
44	4	MT	3	46,99	289-18-289
		ST	74	51,95	18- 198-148-135-177-66 -18
		ST	85	44,69	18- 57-62-126-2-65-237-64 -18
45	4	MT	15	30,91	289-28-289
		ST	79	60,33	28- 60-72-218-285-86-39 -28
		ST	77	60,94	28- 55-130-95-99-127 -28
46	4	MT	0	0,00	289-289
		ST	82	56,60	289- 268-58-40-23-145 -289

PT19: Gesamtdistanz 5294,05

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	86	110,29	73-21-37-49-58-48-73
		ST	100	174,15	49- 12 -17-47-1-23-26- 7 -49
2	1	MT	110	268,43	73-4-52-13-24-5-15-8-40-73
		ST	87	61,35	8- 3 - 16 - 54 - 22 - 34 -8
3	1	MT	84	223,64	73-67-36-10-65-33-6-11-70-14-73
		ST	68	104,13	36-35- 39 - 38 -2- 18 -36
		ST	40	19,17	11- 42 - 19 - 9 -11
4	2	MT	116	438,90	73-14-30-11-27-31-10-6-1-50-41-17-13-73
		ST	54	52,82	17- 12 - 68 - 7 - 43 -17
		ST	11	23,85	31- 20 - 18 -31
		ST	13	12,63	11- 9 -11
5	2	MT	160	283,85	73-4-29-46-28-5-15-45-8-32-2-25-73
		ST	29	47,74	45- 16 - 3 -45
6	3	MT	114	260,84	73-21-13-51-24-63-5-72-53-4-73
		ST	78	174,54	51- 7 -26-1-23- 12 -17-51
7	3	MT	43	81,44	73-69-8-73
		ST	99	90,02	8-15- 16 - 3 - 22 - 44 - 34 -8
8	3	MT	0	0,00	73-73
		ST	99	267,05	73- 19 - 9 -11-6-33-10- 18 -2-35-36-14-73
9	4	MT	78	118,42	73-48-37-49-61-13-55-73
		ST	84	172,02	49- 12 -17-47-1- 7 -49
10	4	MT	125	196,63	73-4-29-52-28-5-15-8-40-73
		ST	69	56,72	8- 3 - 16 - 56 - 54 -8
11	4	MT	111	273,92	73-14-30-11-6-10-27-31-71-2-32-25-73
		ST	11	23,85	31- 18 - 20 -31
		ST	34	26,98	2- 39 - 38 -2
		ST	29	19,17	11- 42 - 9 -11
12	5	MT	97	305,77	73-21-13-59-17-41-50-57-24-5-46-4-73
		ST	99	161,93	17-64-1-23-26- 7 - 43 - 12 -17
13	5	MT	23	81,44	73-8-73
		ST	99	88,87	8- 34 - 22 - 3 - 16 -15-45-8
14	5	MT	0	0,00	73-73
		ST	99	267,05	73- 19 - 9 -11-6-33-10- 18 -2-35-36-14-73
15	6	MT	144	395,16	73-66-30-11-6-1-17-51-13-28-5-53-29-4-73
		ST	40	52,81	17- 7 - 12 -17
		ST	13	12,63	11- 9 -11
16	6	MT	82	182,40	73-25-62-32-2-31-27-60-14-73
		ST	23	58,24	31- 20 - 18 -10-31
		ST	89	105,17	62-8-15- 16 - 3 - 44 -62

PT20: Gesamtdistanz 5696,58

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	56	112,43	73-4-37-58-73
		ST	93	203,39	37- 61-49-12 -17-1-26- 7 -37
		ST	21	16,88	73- 48 -73
2	1	ST	20	22,93	4- 52 -4
		MT	88	257,44	73-45-15-72-5-24-13-73
		ST	13	39,40	72- 46-53 -72
3	1	ST	92	77,95	45- 16-3-54-22-8 -45
		MT	0	0,00	73-73
		ST	99	267,05	73-14-36- 35-2-18-10 -33-6- 11-9-19 -73
4	2	MT	79	278,70	73-4-28-5-50-41-17-13-73
		ST	90	160,30	17-64-1-23- 7-43-12 -17
		ST	22	21,22	4- 29 -4
5	2	ST	6	18,47	73- 21 -73
		MT	18	43,68	73-30-14-73
		ST	98	170,00	30-60-27- 31-20-18-10 -6- 11-9-42 -30
6	2	MT	37	89,12	73-62-32-25-73
		ST	95	105,89	62- 3-16 -15- 8-34 -62
		ST	40	87,39	32- 2-38-39 -32
7	3	MT	81	312,25	73-15-5-24-17-51-13-4-73
		ST	91	159,62	17- 12-7 -26-1-47-17
8	3	MT	0	0,00	73-73
		ST	95	134,31	73- 40-8-3-16-56-22-44 -73
		ST	99	267,05	73- 19-9-11-6-33-10-18-2-35 -36-14-73
9	4	MT	38	114,00	73-37-13-4-73
		ST	79	110,81	4- 29-53 -5-28- 46-52 -4
		ST	82	194,71	37- 7-23 -1-17- 12-49 -37
10	4	MT	72	163,54	73-45-15-32-25-73
		ST	95	77,57	45- 16-3-54-34-8 -45
11	4	MT	0	0,00	73-73
		ST	100	258,09	73-14-30- 9-11-6-10-27-31-20-18 -71- 2 -73
		ST	27	25,88	73- 21-48 -73
12	5	MT	112	304,82	73-4-5-63-24-57-50-41-17-59-13-73
		ST	79	159,75	17- 12-43-7 -26-1-17
13	5	MT	20	48,62	73-69-73
		ST	92	114,41	69- 22-3-16 -15- 8 -69
14	5	MT	26	81,14	73-14-36-67-73
		ST	61	87,17	36- 2-38-39-35 -36
		ST	97	193,80	36- 18-10-65 -33-6- 11-42-19-9 -36
15	6	MT	28	134,32	73-4-13-51-73
		ST	95	174,61	51- 7-68-12 -23-1-47-17-51
		ST	22	21,22	4- 29 -4
16	6	MT	0	0,00	73-73
		ST	94	169,90	73-25- 2-32-44-34-8 -73
		ST	96	202,60	73-14-70-27- 31-20-18-10 -6- 11-9-30-66 -73
17	6	MT	0	0,00	73-73
		ST	92	214,12	73- 40-3-16 -15-5-28- 55-21 -73

PT21: Gesamtdistanz 5899,64

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	66	215,57	73-13-50-41-37-73
		ST	76	152,47	41- 17-12 -26- 23 -1- 64 -41
		ST	38	46,23	37- 7-43-49 -37
2	1	MT	10	51,75	73-25-73
		ST	92	112,43	25- 8-3-16-22-32 -25
		ST	93	259,34	25- 2-18-10-65 -33-6- 11-9-42-14 -25
3	1	MT	0	0,00	73-73
		ST	100	197,38	73- 40-34-15 -5- 28-29 -4-73
		ST	21	16,88	73- 48 -73
4	2	MT	75	219,91	73-72-5-63-24-13-73
		ST	98	216,36	13- 61-7-12 -1- 47-17-59 -13
5	2	MT	0	0,00	73-73
		ST	47	67,16	73- 66-30-19-21 -73
		ST	95	265,53	73- 14-36-35-2-18-20-31-27 -10-6- 11-9 -73
6	2	MT	0	0,00	73-73
		ST	99	167,34	73- 8-3-16-15-45 -4-73
7	3	MT	0	0,00	73-73
		ST	97	284,63	73- 14-7-26 -1- 23-12-17-51 -13-73
		ST	89	154,95	73- 4-29-53 -5- 28-46-52 -73
8	3	MT	20	48,62	73-69-73
		ST	80	72,75	69- 8-34-44-32-62 -69
		ST	94	112,89	69- 15-16-3-54-22 -69
9	3	MT	0	0,00	73-73
		ST	100	279,66	73- 9-11-6-33-10-18-2-38-39 -25-73
10	4	MT	114	415,95	73-37-1-41-50-57-24-5-13-73
		ST	69	85,51	37- 49-17-12-68-43 -7-37
11	4	MT	0	0,00	73-73
		ST	94	172,75	73- 40-8-3-16-15-4-21 -73
		ST	78	61,78	73- 30-9-19-42-48 -73
12	4	MT	0	0,00	73-73
		ST	97	267,30	73- 14-11-6-10-27-31-20-18-2-35 -36- 67 -73
13	5	MT	23	75,66	73-58-73
		ST	100	204,63	58- 7-12-17-47 -1- 23 -26-58
14	5	MT	0	0,00	73-73
		ST	100	135,31	73- 8-3-16-56-22-34 -73
		ST	98	216,35	73- 4-29-45-15 -5- 28 -13-73
15	5	MT	0	0,00	73-73
		ST	92	272,85	73- 14-9-11-6-33-10-18-2-32 -25-73
16	6	MT	0	0,00	73-73
		ST	99	184,70	73- 30-19-9-11-6-10-27-60-70-14 -73
		ST	93	272,46	73- 55-13-51-17-12 -1- 7-21 -73
17	6	MT	10	78,89	73-36-73
		ST	100	117,60	36- 31-20-18 -71- 38-39-2-35 -36
		ST	89	133,85	73- 8-3-16-54-44 -73
18	6	MT	0	0,00	73-73
		ST	94	262,20	73- 4-52-53-46 -24-5- 15 -73

PT22: Gesamtdistanz 7740,43

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	148	322,62	145-23-22-61-4-18-26-12-9-143-49-69-19-145
		ST	39	12,52	22- 16-8-38 -22
2	1	MT	172	278,78	145-13-11-39-7-29-80-27-82-116-78-20-130-17-145
		ST	13	13,46	11- 47-66 -11
		ST	2	6,95	130- 111 -130
3	1	MT	187	311,16	145-37-88-87-6-70-67-86-95-89-94-31-30-2-145
4	1	MT	40	77,53	145-140-54-145
		ST	93	77,84	140- 104-10 -35-25- 28-34-109 -140
		ST	43	14,52	140- 74-97-106 -140
		ST	14	18,10	54- 44 -54
5	1	MT	76	120,43	145-33-32-107-92-145
		ST	95	48,49	107-21-36- 14-1-83 -107
6	1	MT	0	0,00	145-145
		ST	58	69,34	145- 59 -24- 15-5-3 -65-145
7	2	MT	146	285,03	145-139-134-12-9-26-4-18-51-103-113-22-90-19-145
		ST	9	12,25	139- 5-3 -139
		ST	34	12,50	22- 16-8 -22
8	2	MT	118	169,54	145-56-91-32-62-6-76-41-72-145
		ST	72	34,99	76- 1-85-64-14 -76
9	2	MT	79	124,86	145-23-50-42-35-63-133-145
		ST	95	76,50	63- 10-34 -129- 53-40-28-102 -25-63
10	2	MT	25	33,29	145-24-145
		ST	89	60,57	24- 46-135 -33-45- 68-125-15 -24
11	2	MT	189	232,66	145-75-71-17-98-20-93-27-57-29-7-73-11-13-145
12	2	MT	181	192,78	145-21-36-58-60-31-30-2-48-55-81-43-145
		ST	3	8,91	36- 52 -36
13	3	MT	147	344,41	145-23-22-61-4-18-26-12-9-69-49-119-37-145
		ST	39	12,52	22- 16-8-38 -22
14	3	MT	149	211,72	145-138-105-67-70-79-117-6-32-33-145
		ST	41	27,12	138- 1-14 -138
15	3	MT	115	192,05	145-13-11-39-84-27-29-7-96-101-127-145
		ST	13	13,46	11- 47-66 -11
		ST	62	68,85	101-25-35- 10-34-28 -101
16	3	MT	181	220,57	145-99-17-20-137-31-2-30-100-36-21-24-145
17	3	MT	0	0,00	145-145
		ST	95	80,91	145-65-19- 3-5 -77- 108-15 -145
		ST	67	34,25	145- 44-123 -54- 59 -145
18	4	MT	150	272,20	145-19-12-9-26-110-4-18-118-51-22-132-145
		ST	34	12,50	22- 16-8 -22
19	4	MT	160	264,23	145-71-17-20-78-82-27-80-57-29-7-122-11-13-145
		ST	29	39,68	122- 53-40-28 -122
20	4	MT	186	228,07	145-55-48-2-31-30-58-60-94-89-86-95-36-21-145
		ST	3	8,91	36- 52 -36
21	4	MT	147	205,16	145-45-88-126-87-6-62-32-33-56-145
		ST	33	52,19	45- 15-5-3-68 -45
		ST	5	7,81	56- 46 -56
22	4	MT	91	81,32	145-24-41-92-43-72-145
		ST	94	66,98	41-107- 83-64-14-1 -41
23	4	MT	65	124,50	145-23-50-42-35-63-145
		ST	87	69,99	63- 10-104-106-97-74-34 -25-63
24	5	MT	77	211,70	145-90-22-61-4-18-103-35-23-145
		ST	39	12,52	22- 16-8-38 -22
		ST	73	61,08	35-25- 102-28-34-10 -35
25	5	MT	179	288,96	145-24-91-32-37-121-49-69-9-120-26-12-142-19-65-145
		ST	11	43,58	65- 3-5-15 -65
26	5	MT	128	217,43	145-76-21-36-67-70-6-33-145
		ST	56	28,79	76- 14-85-1 -76
27	5	MT	159	180,36	145-115-13-114-39-73-7-29-27-141-93-11-145
		ST	13	13,04	114- 66-47 -114
		ST	14	11,01	115- 44 -115

Fortsetzung PT22

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
28	5	MT	187	177,50	145-144-81-2-30-31-131-98-20-17-75-54-145
29	5	MT	0	0,00	145-145
		ST	8	4,99	145- 59 -145
30	6	MT	121	217,05	145-13-11-84-27-57-29-7-96-101-25-63-145
		ST	66	67,75	63-28-40-53-34-10 -63
31	6	MT	155	299,33	145-23-50-35-42-128-51-18-4-26-9-12-22-19-145
		ST	34	12,50	22-8-16 -22
32	6	MT	163	224,47	145-33-32-62-6-79-105-36-58-60-100-145
		ST	23	11,34	36-52-124 -36
33	6	MT	94	82,50	145-24-56-136-41-145
		ST	83	57,79	136-1-14-112 -21- 64 -136
		ST	5	7,81	56- 46 -56
34	6	MT	182	174,73	145-99-71-17-20-31-30-2-48-55-43-72-145
35	6	MT	0	0,00	145-145
		ST	85	79,19	145- 3-5-77-108-68 -45- 15 -145

PT23: Gesamtdistanz 8668,57

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	123	266,98	145-23-51-18-4-26-120-9-12-142-19-145
		ST	66	52,47	23-8-16-22-61 -23
2	1	MT	95	227,21	145-6-70-67-60-92-145
		ST	95	75,13	60-58-124-36-21-14-52 -60
3	1	MT	25	87,72	145-45-32-145
		ST	85	53,45	32-107-83-85-1-76 -32
		ST	43	14,35	45- 108-68 -45
		ST	28	18,12	32-91-33 -32
4	1	MT	101	192,24	145-63-25-101-96-7-29-84-39-13-145
		ST	12	11,79	84- 27 -84
		ST	70	62,58	63-28-34-104-10-42-35 -63
5	1	MT	0	0,00	145-145
		ST	86	79,17	145-65- 3-5-15-135-56-46-24 -145
		ST	45	32,19	145-54- 123 -145
6	1	MT	96	135,21	145-75-78-20-98-55-72-145
		ST	39	58,71	55- 2-30 -31-55
		ST	49	51,56	75- 71-17-11 -75
7	2	MT	131	328,15	145-90-23-50-103-18-4-26-12-9-49-69-19-145
		ST	53	31,68	90-8-38-22-16 -90
8	2	MT	112	200,68	145-32-62-6-87-126-88-37-145
		ST	24	14,84	32-33 -32
9	2	MT	69	161,21	145-122-7-29-73-93-13-145
		ST	94	97,21	122-25- 35-10-109-34-28-40-53 -122
		ST	27	44,31	29-57- 27 -29
10	2	MT	21	70,45	145-41-145
		ST	90	76,21	41- 64-1-14-36-21 -41
		ST	62	82,99	41- 48-2 -31- 30 -41
11	2	MT	0	0,00	145-145
		ST	94	129,51	145- 44-115-47-66-11 -20- 111-17 -145
		ST	85	89,62	145- 3-5-77-15-24-43-59 -145
12	3	MT	154	279,67	145-65-19-12-9-26-4-18-118-51-63-145
		ST	36	39,53	63-28-102 -25-63
13	3	MT	120	266,03	145-13-39-7-29-82-116-20-54-145
		ST	23	29,77	29- 80-27 -29
		ST	10	24,15	13- 11 -13
14	3	MT	160	258,29	145-81-55-31-60-94-89-67-70-79-6-32-145
		ST	28	33,65	60-86-95-58 -60

Fortsetzung PT23

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
15	3	MT	23	79,14	145-136-145
		ST	92	93,60	136- 21-36-52-100-30-2 -136
		ST	74	66,55	136- 138-14 -105- 1 -136
16	3	MT	17	76,77	145-23-145
		ST	85	72,65	23- 106-97-74-34-10-35-42 -23
		ST	66	52,47	23- 61-22-16-8 -23
17	3	MT	0	0,00	145-145
		ST	93	102,12	145- 3-5-68-45-33-56-46-15 -145
		ST	88	74,92	145- 71-17-99 -72- 24 -145
18	4	MT	17	76,77	145-23-145
		ST	71	46,65	23- 8-38-16-22 -50-23
		ST	88	92,75	23- 133-53-40-28-34-104-10-35 -23
19	4	MT	38	78,44	145-92-41-145
		ST	88	46,64	41- 1-85-64-83-107 -41
		ST	62	74,81	92-31- 30-2-48 -92
20	4	MT	187	392,96	145-32-62-6-37-121-119-49-69-9-12-26-110-18-4-19-145
21	4	MT	146	247,81	145-75-98-20-78-141-84-57-29-7-96-101-25-145
		ST	12	11,79	84- 27 -84
		ST	20	21,84	75- 17 -75
22	4	MT	0	0,00	145-145
		ST	94	94,07	145- 59-24-33-108-139-3-5 -145
		ST	86	93,83	145- 127-114-47-66-11 -13- 44 -145
23	4	MT	0	0,00	145-145
		ST	89	150,86	145- 15-91-76-14-36-21-43 -145
24	5	MT	116	271,28	145-90-113-103-51-18-4-26-9-12-19-145
		ST	66	33,31	113- 8-16-22-61 -113
25	5	MT	159	283,70	145-72-55-31-60-67-70-6-87-88-145
		ST	31	31,08	31- 2-30 -31
26	5	MT	12	49,71	145-13-145
		ST	70	84,47	13- 71-17-130 -20-13
		ST	90	123,70	13- 11 -93- 27 -29-7-73-39-13
27	5	MT	25	87,72	145-45-32-145
		ST	22	11,13	45- 68 -45
		ST	95	103,93	32- 14-36-52-58-21-1 -32
		ST	24	14,84	32- 33 -32
28	5	MT	67	94,90	145-65-132-23-54-145
		ST	90	87,82	23- 42-35-10 -63-25- 28-34 -23
29	5	MT	0	0,00	145-145
		ST	91	77,18	145- 3-5-77-15-46-56-24 -145
30	6	MT	98	304,42	145-7-29-57-82-20-137-131-81-145
		ST	23	29,77	29- 80-27 -29
		ST	62	47,91	131- 2-48-30 -31-131
31	6	MT	129	321,61	145-23-50-128-18-4-26-12-9-143-49-69-134-145
		ST	53	37,56	50- 8-38-16-22 -50
32	6	MT	89	203,43	145-32-62-105-79-117-6-37-145
		ST	24	14,84	32- 33 -32
		ST	70	48,27	105- 14-112-64-1 -105
33	6	MT	21	70,45	145-41-145
		ST	89	120,60	41- 100 -94-89- 86-95-36-21 -41
34	6	MT	27	83,33	145-13-129-145
		ST	82	84,75	129- 34-10-35 -25- 102-28-40-53 -129
		ST	23	32,38	13- 47-66-11 -13
		ST	58	31,28	129- 97-74-106-140 -129
35	6	MT	0	0,00	145-145
		ST	91	78,08	145- 44-99-17-144-43-59 -145
		ST	84	80,86	145-19- 3-5-125-15-24 -145

PT24: Gesamtdistanz 9758,97

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	91	325,42	145-37-119-49-9-12-18-4-90-145
		ST	89	76,37	90- 23-104-10-35-42-22-16-8 -90
		ST	9	24,78	12- 26 -12
2	1	MT	66	254,71	145-73-141-82-131-145
		ST	38	49,54	73-7-29-80-27 -73
		ST	84	63,65	131- 55-48-2-30 -31-131
3	1	MT	11	139,77	145-105-145
		ST	93	69,02	105- 52-36-21-107-83-1 -105
		ST	79	98,50	105- 14-67-70-6 -105
4	1	MT	0	0,00	145-145
		ST	77	81,51	145- 15-108-139-5-3-19-65 -145
		ST	94	98,02	145- 46-33-32-41-24 -145
5	1	MT	0	0,00	145-145
		ST	93	150,87	145- 34-25-28-40-53-39-11-13 -145
6	1	MT	0	0,00	145-145
		ST	95	104,26	145- 54-71-17-20-75 -145
7	2	MT	64	279,01	145-69-9-12-4-18-51-145
		ST	90	86,47	12- 26-110-61-22-38-8-16 -12
8	2	MT	8	131,34	145-31-145
		ST	84	65,81	31- 30-100-58-60 -31
		ST	94	122,79	31- 94-89-86-95-124-36-21-2 -31
9	2	MT	6	114,10	145-122-145
		ST	92	118,26	122- 7-29-57-27-84-93-66-47 -122
		ST	85	67,78	122- 28-34-63-25-102 -122
10	2	MT	5	103,75	145-62-145
		ST	58	90,88	62- 88-87-6 -62
		ST	89	72,95	62- 14-64-1-76-32 -62
11	2	MT	0	0,00	145-145
		ST	87	123,70	145- 44-13-11 -78- 20-17 -145
		ST	86	64,48	145- 59-72-43-56-24 -145
12	2	MT	0	0,00	145-145
		ST	93	114,23	145- 97-74-106-10-35-50-23 -145
		ST	87	101,12	145- 15-33-45-68-5-3-19 -145
13	3	MT	66	378,12	145-96-101-103-18-4-12-9-49-145
		ST	27	61,99	96- 7-27-29 -96
		ST	9	24,78	12- 26 -12
		ST	83	99,40	103- 22-16-8-23-10-35-42 -103
14	3	MT	61	220,69	145-67-70-79-37-145
		ST	32	36,83	79- 117-6 -79
		ST	92	88,13	67- 14-85-1-21-36-52 -67
15	3	MT	17	67,56	145-92-145
		ST	70	88,77	92- 55-98-20-81 -92
		ST	83	88,15	92- 48-2-31-30-41 -92
16	3	MT	0	0,00	145-145
		ST	93	150,87	145- 13-11-39-53-40-28-25-34 -145
17	3	MT	0	0,00	145-145
		ST	85	84,82	145- 15-33-32-91-135-46-24 -145
		ST	72	59,39	145- 65-19-3-5-77 -145
18	3	MT	0	0,00	145-145
		ST	76	56,42	145- 54-71-17-99 -145
19	4	MT	64	279,01	145-69-9-12-4-18-51-145
		ST	80	83,54	12- 26-61-22-38-8-16 -12
20	4	MT	61	291,46	145-73-82-116-137-31-145
		ST	53	64,08	73-7-29-57-80-27 -73
		ST	69	70,47	31- 60-58-30-2 -31

Fortsetzung PT24

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
21	4	MT	5	103,75	145-62-145
		ST	84	88,61	62- 6 -105- 14 - 112 -1-62
		ST	86	77,68	62- 64 - 83 - 107 - 21 - 36 -62
22	4	MT	8	75,06	145-90-145
		ST	92	101,70	90- 50 - 35 - 63 - 25 - 28 - 34 -90
		ST	90	73,42	90- 23 - 10 - 104 - 109 - 140 - 133 -90
23	4	MT	0	0,00	145-145
		ST	93	83,07	145- 33 - 32 - 56 - 24 -145
		ST	84	88,33	145- 19 - 3 - 5 - 108 - 68 - 45 - 15 -145
24	4	MT	0	0,00	145-145
		ST	91	117,27	145- 75 - 17 - 20 - 130 - 43 - 72 -145
		ST	92	84,07	145- 59 - 44 - 11 - 66 - 47 - 114 - 13 - 115 -145
25	5	MT	0	0,00	145-145
		ST	93	153,34	145- 55 - 48 - 21 - 1 - 76 - 15 -145
		ST	88	175,11	145- 39 - 93 - 84 - 27 - 29 - 7 - 40 - 53 -145
26	5	MT	0	0,00	145-145
		ST	64	101,73	145- 65 - 5 - 3 - 19 - 23 -145
		ST	91	211,82	145- 8 - 16 - 22 -4-18-128- 42 - 35 - 10 -145
27	5	MT	64	240,85	145-70-67-89-31-145
		ST	31	31,08	31- 30 - 2 -31
		ST	83	100,02	89- 86 - 95 - 52 - 14 - 36 - 100 - 94 -89
28	5	MT	93	258,17	145-37-121-49-143-9-12-142-134-145
		ST	68	88,20	37- 88 - 126 - 6 - 87 -37
		ST	17	29,87	12- 120 - 26 -12
29	5	MT	0	0,00	145-145
		ST	93	123,57	145- 129 - 28 - 102 - 25 - 34 - 127 -145
		ST	94	122,97	145- 71 - 17 - 111 - 20 -78- 11 - 13 -145
30	5	MT	0	0,00	145-145
		ST	94	98,02	145- 46 - 33 - 32 - 41 - 24 -145
		ST	88	77,97	145- 106 - 74 - 97 - 123 - 54 -145
31	6	MT	91	283,52	145-69-9-12-4-18-118-51-103-145
		ST	9	24,78	12- 26 -12
		ST	85	59,32	103- 61 - 22 - 16 - 8 - 38 - 113 -103
32	6	MT	17	149,24	145-101-96-145
		ST	42	73,43	96-57- 27 - 29 - 7 -96
		ST	87	69,01	101- 28 - 34 - 10 - 35 - 63 - 25 -101
33	6	MT	5	103,75	145-62-145
		ST	90	68,38	62- 32 - 33 - 91 - 136 -1-62
		ST	95	102,15	62- 6 -79- 14 - 138 - 64 - 85 -62
34	6	MT	17	67,56	145-92-145
		ST	87	125,23	92- 81 - 98 - 20 -31- 30 - 2 -92
		ST	71	96,32	92- 21 - 36 - 58 - 60 -92
35	6	MT	0	0,00	145-145
		ST	70	100,39	145- 23 - 50 - 19 - 132 -145
		ST	88	76,74	145- 3 - 5 - 77 - 68 - 45 - 125 - 15 -145
36	6	MT	0	0,00	145-145
		ST	93	99,25	145- 72 - 99 - 17 - 11 - 66 - 47 - 13 - 44 -145
		ST	95	66,66	145- 24 - 56 - 43 - 144 - 59 -145

PT25: Gesamtdistanz 11126,72

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	164	290,01	217-94-80-52-45-106-55-91-10-72-27-217
2	1	MT	160	220,70	217-5-109-102-31-84-107-93-49-50-165-217
		ST	20	9,58	109- 122-131 -109
3	1	MT	164	304,37	217-79-3-2-56-117-15-147-14-20-130-32-77-43-217
		ST	11	20,63	77- 1-18 -77
4	1	MT	165	225,68	217-53-87-121-156-21-76-35-85-7-25-33-211-46-54-203-217
		ST	13	6,00	121- 16 -121
5	1	MT	73	145,83	217-30-4-11-152-104-140-217
		ST	31	17,81	140- 119-68 -140
		ST	69	59,29	11-26- 12-137 -6- 41-162 -124-209-11
6	1	MT	142	221,60	217-89-145-71-96-8-17-44-34-61-22-24-42-217
		ST	32	21,31	145- 51-48-134 -145
7	1	MT	51	88,96	217-98-37-144-178-217
		ST	8	22,25	178- 13 -178
		ST	51	20,00	37- 184-83-157 -37
		ST	65	85,40	98-100-40-70- 213-112 -28-38-98
8	1	MT	143	108,34	217-29-59-105-120-214-23-47-36-153-217
		ST	33	20,48	59- 39-110 -59
9	1	MT	0	0,00	217-217
		ST	41	43,61	217- 125-19-9 -217
10	2	MT	180	288,33	217-53-111-127-118-189-21-31-69-182-35-128-7-25-33-92-46-54-217
11	2	MT	167	248,34	217-29-67-23-20-14-141-32-95-88-82-26-11-30-217
		ST	11	11,12	26- 12 -26
12	2	MT	131	225,75	217-36-47-78-15-60-103-2-3-58-81-217
		ST	41	15,43	47- 39-64 -47
13	2	MT	137	214,82	217-97-74-50-8-17-44-34-22-24-42-217
		ST	41	28,64	50-49- 57 -50
14	2	MT	146	256,24	217-90-27-62-159-10-129-28-99-40-192-191-217
		ST	22	24,30	191- 161-13 -191
		ST	7	14,08	99- 66 -99
15	2	MT	0	0,00	217-217
		ST	69	56,52	217- 9-164-113-65-19 -217
16	2	MT	74	112,45	217-207-5-170-114-138-217
		ST	53	19,94	114- 75-51-48 -114
		ST	52	25,88	5- 16-108-73 -5
17	2	MT	85	177,16	217-37-38-63-45-52-115-4-150-86-101-217
		ST	48	17,95	4- 135-177-149 -4
		ST	46	74,01	4- 41-6-1-18 -143-43-4
18	3	MT	169	339,83	217-104-94-80-11-26-52-45-106-28-55-91-10-70-40-100-142-217
		ST	11	11,12	26- 12 -26
19	3	MT	178	229,46	217-200-50-93-195-107-160-49-8-17-96-155-217
20	3	MT	159	288,29	217-79-3-2-56-15-20-14-32-77-6-43-4-30-217
		ST	11	20,63	77- 18-1 -77
		ST	2	13,97	6- 41 -6
21	3	MT	67	76,71	217-29-123-59-47-36-217
		ST	70	32,05	59-105-23- 39 -59
22	3	MT	179	261,09	217-187-5-148-102-84-31-21-76-35-85-7-25-72-33-46-54-217
23	3	MT	121	202,59	217-89-71-116-44-185-34-61-22-132-24-42-217
		ST	28	9,84	89- 175-136 -89
		ST	30	13,31	71- 51-48 -71
24	3	MT	88	124,55	217-27-98-38-37-158-151-174-217
		ST	79	34,20	158- 68-126-83-146-139-133 -158
		ST	8	11,74	174- 13 -174
25	3	MT	34	54,37	217-166-53-217
		ST	88	74,62	53-176-87- 16-154-206-19 -53
26	3	MT	0	0,00	217-217
		ST	14	21,19	217- 9 -217

Fortsetzung PT25

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
27	4	MT	130	263,96	217-30-4-124-6-88-82-186-168-194-95-43-167-217
		ST	27	40,44	95- 1-18 -32-95
		ST	23	10,99	124- 162-41-205 -124
28	4	MT	116	176,86	217-5-109-74-50-8-17-97-217
		ST	41	28,64	50-49- 57 -50
		ST	20	9,58	109- 122-131 -109
29	4	MT	174	235,75	217-36-47-78-117-60-15-147-14-20-130-120-23-153-217
30	4	MT	144	215,81	217-90-27-210-40-62-10-99-28-38-37-144-216-217
		ST	17	19,14	99- 112-66 -99
		ST	19	15,46	37- 157 -37
31	4	MT	128	282,66	217-53-121-156-21-31-69-35-7-25-33-92-46-54-217
		ST	52	18,47	121- 108-73-16 -121
32	4	MT	119	240,26	217-145-44-34-22-103-2-3-58-24-42-81-217
		ST	59	37,39	145- 183-134-75-181-51-48 -145
33	4	MT	36	56,00	217-29-172-86-101-217
		ST	44	47,30	217- 125-65-19-9 -217
		ST	82	32,01	172-67- 39-64-110-180 -172
34	4	MT	116	168,75	217-198-63-45-52-171-11-202-152-140-190-217
		ST	8	13,94	190- 13 -190
		ST	11	13,16	140- 119 -140
		ST	40	23,42	171- 137-12 -26-171
35	5	MT	179	270,95	217-27-193-100-40-70-159-10-91-129-55-28-38-98-37-217
36	5	MT	179	241,31	217-5-102-31-84-107-93-49-50-8-17-96-71-217
37	5	MT	169	274,53	217-36-79-3-2-56-15-20-14-141-32-77-143-43-217
		ST	11	19,24	143- 1-18 -143
38	5	MT	42	81,41	217-30-150-59-29-217
		ST	53	63,02	30- 161-13-83-68 -30
		ST	80	41,82	59-105-23- 39 -47-59
39	5	MT	167	240,91	217-54-46-33-72-25-7-85-128-35-21-76-118-127-217
		ST	13	14,94	127- 16 -127
40	5	MT	87	167,47	217-104-115-80-52-106-45-94-217
		ST	88	90,70	115- 135-149-4-41-6-12 -26-11-115
41	5	MT	136	202,55	217-42-24-22-61-196-44-34-114-89-138-217
		ST	30	9,40	114- 51-48 -114
		ST	14	12,31	138- 9 -138
42	5	MT	10	41,42	217-179-217
		ST	89	51,53	179- 19 -53-111-87-204- 188-113 -179
43	6	MT	112	130,83	217-173-212-116-155-97-201-215-217
		ST	7	6,66	173- 136 -173
		ST	23	7,32	116- 75 -116
		ST	30	14,07	215- 48-51 -215
44	6	MT	162	287,30	217-101-29-123-86-67-4-11-26-52-45-63-28-99-10-62-40-217
		ST	11	11,12	26- 12 -26
		ST	7	14,08	99- 66 -99
45	6	MT	167	294,94	217-30-43-6-82-88-95-32-14-20-15-60-78-23-217
		ST	2	13,97	6- 41 -6
		ST	11	28,13	95- 18-1 -95
46	6	MT	122	284,87	217-54-46-92-33-25-7-35-69-31-21-148-5-197-217
		ST	52	25,88	5- 16-108-73 -5
47	6	MT	99	202,00	217-74-50-8-17-44-34-22-132-81-217
		ST	75	37,22	50- 57-208 -160-49-50
48	6	MT	107	179,49	217-36-47-58-3-2-103-24-42-217
		ST	41	15,43	47- 39-64 -47
49	6	MT	94	124,54	217-90-27-142-38-37-158-151-169-217
		ST	8	6,60	169- 13 -169
		ST	75	37,64	158- 133-139-146-126-199-163 -158
50	6	MT	0	0,00	217-217
		ST	58	68,75	217-53- 154-65-19-9 -217

PT26: Gesamtdistanz 11914,08

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	149	325,07	217-111-87-21-31-84-93-107-69-35-128-7-25-46-217
		ST	24	12,17	93- 49 -93
		ST	3	25,42	25- 92-33 -25
2	1	MT	32	132,39	217-4-152-217
		ST	74	86,05	152- 11-26-12 -82-88-6- 41-124 -152
		ST	64	64,47	152- 115 -52-45-63- 94-199-104 -152
3	1	MT	165	316,16	217-43-77-32-130-20-14-147-15-78-56-2-3-79-217
		ST	11	20,63	77- 1-18 -77
4	1	MT	137	230,11	217-155-96-50-8-17-44-34-61-22-24-42-81-217
		ST	43	24,19	155- 116-97 -155
5	1	MT	11	52,18	217-36-101-217
		ST	82	51,87	36- 110-64-39-23 -47-36
		ST	25	13,64	101- 153-29 -101
6	1	MT	49	64,07	217-54-27-90-217
		ST	89	209,07	27-100-40-99-28- 66-112 -129-10-62-27
7	1	MT	32	62,04	217-53-204-217
		ST	76	78,62	204- 16-5-170-51-48 -204
		ST	69	63,54	204- 19-9-89-113-188 -204
8	1	MT	1	61,19	217-174-217
		ST	88	56,72	174- 151-139-146-157-37-38-98 -174
		ST	85	56,64	174- 126-158-119 -140-30- 169-13 -174
9	2	MT	130	302,41	217-52-45-106-28-55-91-10-159-70-40-27-217
		ST	22	15,81	52- 80 -52
10	2	MT	138	211,86	217-42-24-22-34-44-17-8-50-74-138-217
		ST	41	28,64	50- 57-49 -50
11	2	MT	169	299,48	217-58-3-2-103-60-15-20-14-141-32-95-6-43-217
		ST	11	28,13	95- 18-1 -95
12	2	MT	4	65,91	217-30-217
		ST	78	86,23	30- 68-83-37-38-13-161 -30
		ST	90	110,20	30-4- 41-12-26-11-149-177-135 -30
13	2	MT	80	197,52	217-54-46-25-7-85-35-118-217
		ST	67	57,07	118- 76 -21-31-102- 156 -118
		ST	26	42,69	25-72- 33 -25
14	2	MT	9	49,46	217-86-217
		ST	81	38,94	86- 29-123-180-59-150-67 -86
		ST	80	70,69	217- 125 -53- 154-206-65-19-9 -217
15	2	MT	3	63,03	217-187-217
		ST	76	48,41	187- 108-121-16-73-5 -187
		ST	86	81,49	187- 136-134-145-48-71-75-201-51 -187
16	2	MT	43	90,93	217-36-47-105-217
		ST	85	30,47	105- 120-214-23-39 -105
17	3	MT	139	308,21	217-50-93-195-107-69-35-7-25-46-54-217
		ST	33	14,70	93- 160-49 -93
		ST	3	25,42	25- 92-33 -25
18	3	MT	117	278,98	217-30-4-209-6-88-194-168-186-82-52-45-217
		ST	57	35,12	209- 137-12-26-171-11 -209
		ST	6	15,35	6- 162-41 -6
19	3	MT	156	252,15	217-43-143-77-32-14-20-15-117-56-78-217
		ST	11	19,24	143- 18-1 -143
20	3	MT	76	193,64	217-100-40-99-10-62-27-90-217
		ST	76	49,19	100- 193-142-144-37-98-38 -100
		ST	18	29,18	99-28- 66 -99
21	3	MT	91	213,90	217-96-8-17-44-34-61-22-132-217
		ST	87	61,31	96- 97-200-215-51-48-114 -96

Fortsetzung PT26

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
22	3	MT	2	28,11	217-101-217
		ST	84	124,41	101- 216-191-184 -63- 94-104-133-13 -101
		ST	23	9,37	101- 29 -101
23	3	MT	111	163,65	217-53-87-127-21-31-84-148-217
		ST	48	23,95	148- 5-131-122-109 -148
		ST	13	14,94	127- 16 -127
24	3	MT	84	146,92	217-36-47-79-3-2-24-42-81-217
		ST	63	32,75	47- 64-39-23 -47
25	3	MT	0	0,00	217-217
		ST	78	77,38	217- 19-89-173-9 -217
26	4	MT	129	257,05	217-27-210-40-70-10-91-129-55-28-217
		ST	35	30,39	28- 112-213 -28
27	4	MT	122	215,61	217-155-17-8-50-74-102-31-21-111-53-217
		ST	41	28,64	50- 49-57 -50
		ST	10	16,69	21- 76 -21
28	4	MT	32	132,39	217-152-4-217
		ST	58	96,36	4- 124-41 -6-95-32- 18-1 -43-4
		ST	88	85,69	152- 115-80 -45-106-52- 26-12-11 -152
29	4	MT	126	241,18	217-58-3-60-15-147-14-20-130-105-47-217
		ST	46	20,81	105- 39-23 -105
30	4	MT	114	232,31	217-207-35-128-85-7-25-72-211-46-54-217
		ST	64	32,05	207- 108-16-73-5 -207
		ST	2	18,45	211- 33 -211
31	4	MT	101	218,85	217-212-44-34-22-103-2-24-42-217
		ST	79	37,41	212- 71-48-51-75-116 -212
32	4	MT	36	75,41	217-86-30-140-217
		ST	70	43,27	86- 67-59-110 -36- 153-29 -86
		ST	69	34,49	140- 119-68-126-158 -140
33	4	MT	4	50,64	217-178-217
		ST	89	70,58	178- 38-37-157-83-146-139-151-13 -178
34	4	MT	0	0,00	217-217
		ST	79	56,65	217- 9-164-113-179-65-19 -217
35	5	MT	168	272,35	217-78-56-15-20-14-141-32-77-88-6-43-217
		ST	11	20,63	77- 18-1 -77
36	5	MT	151	322,48	217-21-31-84-93-107-69-182-35-7-25-46-54-217
		ST	24	12,17	93- 49 -93
		ST	3	25,42	25- 92-33 -25
37	5	MT	84	146,92	217-36-47-79-3-2-24-42-81-217
		ST	77	39,78	47- 23-120-39-64 -47
		ST	14	11,59	81- 9 -81
38	5	MT	97	176,01	217-90-27-62-10-159-40-100-192-217
		ST	69	78,74	100- 98-37-38 -28- 66 -99-100
39	5	MT	48	69,93	217-53-87-176-217
		ST	27	22,33	53- 125-19 -53
		ST	84	92,89	87- 121-16 -118- 156-5-154 -87
40	5	MT	154	233,03	217-165-96-50-8-17-44-34-185-196-61-22-217
		ST	20	11,88	165- 97 -165
41	5	MT	21	33,15	217-138-217
		ST	90	65,55	138- 89-183-145-51-48-134-175-136 -138
		ST	61	80,71	217-101- 29-123-172-150-13-161 -217
42	5	MT	50	164,62	217-198-63-45-52-4-30-217
		ST	86	87,62	4- 149-135-202-11-26-12 -82- 41 -4
		ST	44	28,50	198- 104-163-94 -198
43	6	MT	101	298,32	217-40-70-10-91-55-28-106-45-52-217
		ST	70	58,19	52- 80-11-137-12-26 -52

Fortsetzung PT26

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
44	6	MT	96	201,80	217-74-50-8-17-44-34-22-132-217
		ST	75	37,22	50- 57-208-160-49 -50
45	6	MT	114	236,51	217-4-43-143-14-20-15-60-117-217
		ST	65	68,75	143- 1-18 -32-95-6- 162-41-205 -143
46	6	MT	148	249,22	217-148-102-31-21-35-85-7-25-72-27-217
		ST	12	18,30	21- 189-76 -21
		ST	16	10,31	148- 109 -148
		ST	2	21,80	25- 33 -25
47	6	MT	107	179,49	217-42-24-103-2-3-58-47-36-217
		ST	70	34,96	47- 23 -105- 39 -47
48	6	MT	6	71,51	217-197-217
		ST	88	60,72	197- 131-122-181-75-114-71-48-51 -197
		ST	85	47,86	197- 5-73-108-16 -127-197
49	6	MT	37	69,37	217-86-167-30-190-217
		ST	89	98,53	30- 13-142-38-37-144-83-133-68 -30
		ST	50	32,68	86- 67-59-29 -86
50	6	MT	0	0,00	217-217
		ST	86	83,82	217- 9-19-65 -53-46-54- 203-166 -217

PT27: Gesamtdistanz 13317,92

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	15	127,44	217-102-217
		ST	79	67,85	102- 5-48-51-215-170 -102
		ST	86	132,78	102- 84-31 -69- 35-76-156-21 -102
2	1	MT	48	178,35	217-52-45-106-28-217
		ST	40	23,47	52- 80-94 -52
		ST	86	120,02	28- 66-112-213 -10-159-70- 40-99 -28
3	1	MT	33	182,01	217-20-143-43-217
		ST	60	84,71	20- 15 -147- 14-141 -20
		ST	65	70,68	143-88-194- 32-18-1 -143
4	1	MT	2	63,72	217-46-217
		ST	79	63,83	46- 176-111-53-203-90-27-54 -46
		ST	90	160,96	46- 33 -25-7- 128-85-121-16-108 -46
5	1	MT	51	196,50	217-50-8-17-22-217
		ST	62	64,48	50- 93 -107- 49 -50
		ST	52	67,48	22-61- 196-44-34 -22
6	1	MT	15	109,72	217-4-217
		ST	89	88,02	4- 205-41-6-82-12-26-11-152-149 -4
		ST	67	53,09	4- 126-133-158-68 -4
7	1	MT	83	165,68	217-79-3-2-103-24-42-217
		ST	80	55,55	79- 47-39-105-23 -79
8	1	MT	9	48,19	217-36-217
		ST	76	37,82	36- 180-110-59-123-29 -36
		ST	84	117,94	36- 86-30-140-37-38-144-13-101-153 -36
9	1	MT	0	0,00	217-217
		ST	82	77,37	217- 9-136-175-89-19 -217
10	2	MT	128	287,02	217-211-72-62-10-91-129-55-28-63-217
		ST	51	53,80	63- 199-163-104 -52-45-63
11	2	MT	67	157,21	217-74-50-96-217
		ST	41	28,64	50- 57-49 -50
		ST	70	116,18	96-8-17- 44-34-22-116-155 -96
12	2	MT	15	109,72	217-4-217
		ST	64	72,13	4- 11-26-12-137-209-124-162-41 -4
		ST	90	173,88	4-43- 18-1 -95- 77-32 -168- 186-6 -4

Fortsetzung PT27

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
13	2	MT	130	232,41	217-58-78-20-117-56-3-2-24-42-217
		ST	17	17,66	20- 14 -20
		ST	26	46,61	117- 15-60 -117
14	2	MT	2	63,72	217-46-217
		ST	88	64,22	46- 87-154-206-19-53-54 -46
		ST	90	189,00	46- 16-118-21-31-35 -7-25- 33-92 -46
15	2	MT	9	48,19	217-36-217
		ST	73	50,24	36- 64-39-23-47 -36
		ST	79	68,48	36- 67-150-167-30-13-161-29 -36
16	2	MT	0	0,00	217-217
		ST	90	121,09	217- 51-201-97-75-114-71-134 -217
17	2	MT	19	52,14	217-192-217
		ST	78	64,59	192- 178-151-139-146-83-157-37 -192
		ST	57	77,89	192- 27-40-100-38-98-142 -192
18	2	MT	0	0,00	217-217
		ST	90	123,15	217- 65-73-5-109-122-48-145-81 -217
		ST	82	60,47	217- 9-164-138-113-179-125 -217
19	3	MT	106	293,49	217-46-25-7-182-69-107-195-217
		ST	48	26,96	195- 93-49-160 -195
		ST	2	21,80	25- 33 -25
20	3	MT	20	126,63	217-4-43-217
		ST	84	150,64	43- 1-18-32-14-15 -20-130-43
		ST	74	90,78	4- 11-171-26-12-82-88-6-41 -4
21	3	MT	48	178,35	217-28-106-45-52-217
		ST	87	151,94	28- 99-66-10-70-40-38-37-184 -28
		ST	44	28,05	52- 94-80-115 -52
22	3	MT	74	213,78	217-132-22-17-8-50-102-217
		ST	70	90,21	102- 84-31-21-35-85-76-189 -102
		ST	35	65,46	22-61- 185-44-34 -22
23	3	MT	83	165,68	217-42-24-103-2-3-79-217
		ST	85	62,88	79- 105-120-214-23 -79
24	3	MT	9	48,19	217-36-217
		ST	80	52,65	36- 47-39-59-86-29 -36
		ST	86	107,68	36- 172-30-119-177-135-68-13-101 -36
25	3	MT	0	0,00	217-217
		ST	90	108,52	217- 204-131-51-48-183-89-9 -217
26	3	MT	0	0,00	217-217
		ST	85	79,12	217- 19-53-54-27-90 -217
		ST	89	119,31	217- 127-108-16-148-5-187-188 -217
27	4	MT	15	109,72	217-4-217
		ST	79	64,38	4- 149-152-104-126-133-158 -4
		ST	85	92,48	4- 41-6-95-77-32-18-1 -143-43-4
28	4	MT	94	273,27	217-28-55-91-10-159-62-72-217
		ST	72	94,44	28- 112-40-100-98-144-37-38 -28
29	4	MT	93	174,19	217-74-50-8-17-96-217
		ST	66	31,29	50- 57-208-49 -50
		ST	20	21,73	74- 97 -74
30	4	MT	74	165,41	217-58-3-2-56-78-36-217
		ST	80	120,64	78- 60-15-147-14-141 -20-78
31	4	MT	2	63,72	217-46-217
		ST	90	88,94	46- 111-207-5-73-16-121-87 -46
		ST	88	179,86	46- 92-33-25-7-128-35-31-21-156 -46
32	4	MT	33	132,16	217-22-24-42-217
		ST	16	49,07	22- 34-44 -22
		ST	88	103,51	24- 173-136-48-51-181-75-71 -24

Fortsetzung PT27

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
33	4	MT	0	0,00	217-217
		ST	88	180,05	217- 202-11-12-26 -52-45-63- 198-83-216 -217
		ST	86	97,03	217- 153-123-64-39-23-47 -217
34	4	MT	0	0,00	217-217
		ST	86	90,70	217- 81-9-19-65-53-54-27 -217
		ST	90	94,88	217- 29-110-67-30-140-13-191 -217
35	5	MT	15	127,44	217-102-217
		ST	75	83,04	102- 21-35-85-118-76 -102
		ST	90	151,68	102- 84-31 -69-107- 93-49 -102
36	5	MT	15	109,72	217-4-217
		ST	86	90,30	4- 6-88-82-137-12-26-11 -4
		ST	77	133,64	4-43-20- 14-32-18-1-41-162-124 -4
37	5	MT	122	242,94	217-42-24-22-61-103-2-3-117-79-217
		ST	19	38,28	117- 15 -117
38	5	MT	109	347,56	217-52-45-106-28-129-10-7-25-46-217
		ST	2	21,80	25- 33 -25
		ST	24	65,26	28- 66-70-40-99 -28
		ST	40	23,47	52- 94-80 -52
39	5	MT	15	100,48	217-212-217
		ST	74	42,85	212- 116-114-51-48-145-134 -212
		ST	83	99,33	212- 34-44 -17-8-50- 165-155 -212
40	5	MT	0	0,00	217-217
		ST	87	117,94	217- 197-5-122-109-16-108-154-125 -217
41	5	MT	0	0,00	217-217
		ST	88	108,05	217- 161-169-68-30-150-59-86-29-101 -217
		ST	84	111,46	217- 142-38-37-157-146-139-151-174-13 -217
42	5	MT	0	0,00	217-217
		ST	83	77,87	217- 166-90-27-54-53 -217
		ST	89	97,76	217- 105-23-39-47 -36-217
43	5	MT	0	0,00	217-217
		ST	89	72,27	217- 9-138-89-113-19 -217
44	6	MT	107	273,41	217-210-62-72-10-91-55-28-217
		ST	68	62,71	210- 193-98-37-38-100-40 -210
45	6	MT	93	174,19	217-74-50-8-17-96-217
		ST	50	35,14	50- 49-160-57 -50
		ST	30	22,78	74- 200-97 -74
46	6	MT	15	109,72	217-4-217
		ST	88	109,70	4- 11-12-26 -52-45-63- 115-104-135 -4
		ST	70	92,47	4- 41-6-95-77-32-18-1 -43-4
47	6	MT	70	162,55	217-42-24-2-56-3-58-217
		ST	88	119,93	56- 60-15-14 -20-130-78-56
48	6	MT	2	63,72	217-46-217
		ST	85	195,37	46- 131-148-31-21-35 -7-25- 33-92 -46
		ST	89	86,89	46- 87-127-16-73-5 -46
49	6	MT	8	90,99	217-132-217
		ST	76	110,41	132-22- 34-44-75-51-48-71 -132
50	6	MT	9	48,19	217-36-217
		ST	87	57,26	36- 64-39-120-23-47 -36
		ST	78	102,96	36- 67-30-119-83-13-190-29 -36
51	6	MT	0	0,00	217-217
		ST	86	90,70	217- 27-54-53-65-19-9-81 -217

PT28: Gesamtdistanz 13937,62

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	119	283,60	289-235-229-135-113-33-107-53-67-187-104-55-26-289
		ST	7	35,31	107- 58 -107
		ST	7	18,20	187- 30-24 -187
		ST	36	22,38	235- 64-50 -235
2	1	MT	165	220,16	289-72-169-121-111-63-41-78-230-243-110-79-46-289
3	1	MT	169	273,61	289-10-173-188-4-60-182-19-70-138-62-289
4	1	MT	149	210,97	289-156-200-174-89-105-38-27-128-115-131-289
		ST	21	12,19	38- 44 -38
5	1	MT	138	245,30	289-8-216-31-270-3-125-252-120-198-5-45-137-61-289
		ST	27	20,55	137- 12-73 -137
6	1	MT	106	123,03	289-40-65-48-9-84-260-207-157-17-289
		ST	25	8,90	207- 193-177 -207
		ST	15	8,47	65- 77 -65
		ST	22	1,24	289- 35 -289
7	1	MT	122	164,57	289-199-241-15-39-254-57-96-236-23-13-289
		ST	14	12,56	236- 36 -236
		ST	9	11,67	199- 106-139 -199
		ST	24	13,44	39- 11 -39
8	1	MT	109	166,53	289-32-92-201-18-117-37-176-287-140-124-289
		ST	61	30,18	18- 166-22-192-143-190 -18
9	1	MT	60	113,03	289-1-6-16-222-286-208-21-289
		ST	84	42,66	222-7-59- 56-68-71 -222
		ST	21	10,86	1- 2 -1
10	1	MT	37	69,86	289-66-181-232-289
		ST	18	10,56	232- 49 -232
		ST	82	57,40	66- 119-226-213-114-25 -66
11	1	MT	126	101,18	289-100-112-265-54-14-80-47-51-289
		ST	27	15,88	47- 164-52 -47
		ST	12	12,24	265- 118 -265
12	1	MT	77	62,40	289-69-29-87-94-289
		ST	84	31,05	29- 43-20-28-134-34-151-42 -29
13	2	MT	170	355,34	289-27-90-41-63-99-132-102-74-81-250-150-59-215-289
14	2	MT	122	181,57	289-61-283-172-45-5-3-136-31-8-180-289
		ST	30	12,69	136- 273-227 -136
		ST	15	12,30	172- 133-12 -172
15	2	MT	141	291,79	289-40-62-14-175-280-70-33-82-53-67-57-55-26-289
		ST	28	23,98	82- 58-210 -82
16	2	MT	76	140,24	289-21-16-7-88-38-72-6-289
		ST	21	4,84	88- 44 -88
		ST	72	27,16	7- 101-56-68-71 -7
17	2	MT	170	184,57	289-98-54-123-103-238-19-116-209-60-144-93-10-179-289
18	2	MT	136	189,01	289-108-17-4-85-149-37-18-32-289
		ST	21	12,44	17- 129 -17
		ST	11	10,62	18- 22 -18
19	2	MT	104	146,13	289-91-191-196-15-39-130-154-23-13-289
		ST	36	23,82	154- 36-240-142 -154
		ST	30	16,24	39- 204-11 -39
20	2	MT	70	96,41	289-46-185-109-76-66-289
		ST	57	43,28	66-127- 163-25-97 -66
		ST	38	8,82	185- 158-152 -185
21	2	MT	52	77,63	289-1-145-29-69-289
		ST	21	10,86	1- 2 -1
		ST	85	29,19	29- 43-141-20-28-34-42 -29
22	2	MT	84	52,47	289-86-244-263-122-126-289
		ST	85	57,25	263- 160 -75-9-48-266- 184 -65-263
23	2	MT	87	54,85	289-51-83-146-288-268-289
		ST	72	62,55	83- 52-24-30-95-64-50 -47-83

Fortsetzung PT28

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
24	2	MT	0	0,00	289-289
		ST	62	36,02	289- 205-49-35 -289
25	3	MT	153	309,22	289-26-55-104-197-67-53-107-33-195-113-135-70-138-289
		ST	7	35,31	107- 58 -107
		ST	7	9,98	197- 24-30 -197
26	3	MT	170	227,24	289-115-128-203-110-78-41-111-63-45-186-159-61-202-289
27	3	MT	143	302,87	289-66-218-214-137-5-194-120-183-167-125-3-31-8-289
		ST	27	20,55	137- 12-73 -137
28	3	MT	35	38,12	289-69-87-289
		ST	38	34,00	69- 49-28-20 -69
		ST	69	37,35	87-29- 42-34-134-43 -87
		ST	22	1,24	289- 35 -289
29	3	MT	44	41,38	289-161-94-289
		ST	84	66,33	94-13-23- 36-147 -170- 106-139 -262-94
30	3	MT	103	78,69	289-40-62-14-206-80-47-51-289
		ST	17	12,37	47- 52 -47
		ST	36	26,01	206- 64-50 -206
31	3	MT	53	107,12	289-1-155-72-6-289
		ST	69	41,01	155- 71-56-68-44 -155
		ST	40	11,83	1- 258-2 -1
32	3	MT	118	202,15	289-211-39-15-220-162-239-57-96-289
		ST	22	8,42	211- 212-178 -211
		ST	24	13,40	220- 11 -220
33	3	MT	96	125,04	289-153-124-269-168-225-140-92-32-289
		ST	69	43,44	153- 264-114-25-119-259 -153
34	3	MT	170	221,11	289-21-16-7-59-89-105-148-121-38-27-79-46-131-289
35	3	MT	137	126,41	289-54-65-189-281-279-48-9-112-10-100-289
		ST	12	13,34	112- 118 -112
		ST	15	8,47	65- 77 -65
36	3	MT	136	246,48	289-18-37-117-165-4-60-19-278-171-84-17-289
		ST	32	25,84	18- 143-22 -18
37	4	MT	170	353,60	289-169-237-81-255-74-102-132-99-63-41-90-253-109-76-289
38	4	MT	169	250,06	289-51-40-62-14-70-19-116-182-60-48-75-122-289
39	4	MT	97	294,18	289-130-39-57-67-53-256-82-33-187-289
		ST	7	22,63	82- 58 -82
		ST	29	18,98	39-15- 11 -39
		ST	29	8,21	67- 272-217 -67
40	4	MT	153	195,00	289-8-228-216-31-136-3-198-5-45-271-61-221-289
		ST	15	18,75	271- 133-12 -271
41	4	MT	138	166,19	289-199-91-156-285-174-200-59-7-16-208-21-1-289
		ST	21	10,86	1- 2 -1
42	4	MT	166	224,02	289-157-144-173-188-4-223-85-37-176-32-126-289
43	4	MT	75	129,79	289-6-72-88-38-27-46-289
		ST	72	33,52	88- 71-101-56-68 -88
		ST	21	4,84	88- 44 -88
44	4	MT	134	116,18	289-98-54-123-103-65-9-207-93-10-276-289
		ST	25	8,90	207- 193-177 -207
45	4	MT	48	75,61	289-13-23-26-55-83-289
		ST	82	63,21	83- 52-164-24-30-95-64-50 -47-83
		ST	32	33,27	23- 36-142 -23
46	4	MT	58	87,17	289-219-127-66-181-289
		ST	22	1,24	289- 35 -289
		ST	49	19,62	219- 25-284-213 -219
		ST	40	14,40	66- 267-97 -66
47	4	MT	64	60,89	289-86-108-274-17-289
		ST	79	52,29	17- 129-201-18-166-22-192-190 -17

Fortsetzung PT28

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
48	4	MT	38	41,26	289-69-275-289
		ST	58	25,86	275- 49-28-20-141 -275
		ST	74	31,32	275-29- 42-151-34-43 -275
49	5	MT	169	270,00	289-110-78-41-63-111-121-150-105-89-282-289
50	5	MT	142	316,38	289-96-57-67-53-107-33-113-135-70-138-175-62-289
		ST	28	37,72	107- 210-58 -107
51	5	MT	143	239,18	289-66-61-172-137-45-5-120-125-3-231-31-8-289
		ST	27	12,18	172- 73-12 -172
52	5	MT	137	210,97	289-17-4-60-209-19-48-9-84-112-10-233-289
		ST	30	13,69	112- 160-118 -112
53	5	MT	113	171,99	289-21-16-7-59-215-196-15-39-191-289
		ST	25	19,48	7- 68-56 -7
		ST	30	16,24	39- 11-204 -39
54	5	MT	102	145,98	289-124-140-37-149-117-18-92-32-289
		ST	42	25,96	18- 22 -261- 143 -18
		ST	22	1,24	289- 35 -289
55	5	MT	76	121,16	289-79-27-38-72-6-248-1-289
		ST	21	7,70	248- 2 -248
		ST	69	33,55	38- 242-71-44 -38
56	5	MT	71	89,33	289-115-185-46-131-289
		ST	59	18,23	185-128- 152-158 -185
57	5	MT	65	81,70	289-13-23-154-26-55-146-289
		ST	14	6,61	154- 36 -154
		ST	83	69,36	55-104- 24-30-64-50 -80-47- 52 -55
58	5	MT	134	97,61	289-100-179-65-54-14-246-40-51-289
		ST	26	8,50	65- 184-77 -65
59	5	MT	45	27,77	289-249-180-289
		ST	85	66,51	180- 119-163-247-25-114 -180
		ST	40	21,52	249- 205-49 -249
60	5	MT	77	62,40	289-69-29-87-94-289
		ST	83	43,45	29- 43-20-28-134-34-42 -145- 106-139 -29
61	6	MT	170	360,54	289-21-16-7-59-148-81-74-102-132-99-63-41-90-203-289
62	6	MT	149	316,98	289-66-214-186-45-5-194-183-167-3-136-31-8-168-153-289
		ST	15	23,08	45- 133-12 -45
63	6	MT	148	314,50	289-65-103-189-70-195-33-82-53-57-67-234-197-289
		ST	7	22,63	82- 58 -82
		ST	13	14,00	197- 30-95-24 -197
64	6	MT	56	133,07	289-170-211-91-39-130-289
		ST	22	8,42	211- 178-212 -211
		ST	80	60,31	39-15-245-224-162- 11 -39
65	6	MT	164	188,87	289-108-10-93-144-171-60-116-19-48-9-75-122-289
66	6	MT	112	190,49	289-17-251-165-4-85-37-18-32-289
		ST	53	21,62	251- 22-129-277 -251
67	6	MT	77	130,82	289-6-72-155-88-38-27-289
		ST	72	33,52	88- 68-56-101-71 -88
		ST	21	4,84	88- 44 -88
68	6	MT	103	126,24	289-1-46-109-76-202-61-159-127-257-126-289
		ST	34	18,42	257- 97-25 -257
		ST	21	10,86	1- 2 -1
69	6	MT	40	57,07	289-69-29-289
		ST	85	29,19	29- 43-141-20-28-34-42 -29
		ST	18	26,13	69- 49 -69
70	6	MT	128	86,32	289-86-98-54-123-14-206-62-289
		ST	36	26,01	206- 64-50 -206
71	6	MT	106	87,92	289-161-13-23-26-55-83-47-40-51-289
		ST	17	5,69	83- 52 -83
		ST	42	33,83	23- 142-147-36 -23
72	6	MT	0	0,00	289-289
		ST	22	1,24	289- 35 -289

PT29: Gesamtdistanz 15287,31

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	169	363,85	289-89-105-81-74-102-132-99-63-41-78-6-289
2	1	MT	130	310,72	289-40-175-70-135-113-33-82-256-53-57-234-187-197-80-47-289
		ST	7	22,63	82- 58 -82
		ST	23	24,11	234- 67 -234
		ST	7	9,98	197- 30-24 -197
3	1	MT	108	194,79	289-128-90-45-5-198-3-136-186-127-289
		ST	23	14,60	90- 110 -90
		ST	37	26,05	45-137- 73-12 -45
4	1	MT	97	177,99	289-279-19-116-209-60-171-289
		ST	70	37,50	171- 207-260-9-48 -171
5	1	MT	91	144,84	289-130-39-96-23-13-51-289
		ST	35	21,78	39- 204-11 -15-39
		ST	32	33,27	23- 142-36 -23
6	1	MT	81	171,16	289-144-173-165-4-117-289
		ST	19	26,95	117- 149-37 -117
		ST	64	47,03	173- 192-22-166-18-261-190 -173
7	1	MT	47	126,66	289-72-7-16-289
		ST	53	33,85	72-27-38- 44 -72
		ST	63	31,25	7-59- 56-68-71 -7
8	1	MT	3	62,75	289-66-289
		ST	75	44,94	66- 131-46-115-109-76 -66
		ST	77	74,83	66-61- 159-218-214-31 -8- 25-97 -66
9	1	MT	20	65,43	289-54-289
		ST	60	55,23	54- 62-98-122-118-265-65 -54
		ST	79	41,72	54- 50-64-206-14 -54
10	1	MT	24	15,13	289-249-289
		ST	83	74,02	249- 20-151-1-21-2-258-28 -249
		ST	22	1,24	289- 35 -289
11	1	MT	54	46,25	289-69-87-161-289
		ST	47	45,62	161- 26-55-164-52 -161
		ST	69	37,35	87- 29-42-34-134-43 -87
12	1	MT	25	30,52	289-108-289
		ST	80	68,25	108- 32-17-157-10-179-100 -108
		ST	57	46,97	289- 49-205-119 -289
13	2	MT	34	118,80	289-16-7-289
		ST	71	34,44	7- 242-44-88-71 -7
		ST	64	27,15	7- 68-56-101 -59-7
14	2	MT	27	92,38	289-47-104-268-289
		ST	49	43,58	104- 64-50-95-30-24 -104
		ST	84	208,98	104- 67-33-210-58 -107-53-57-104
15	2	MT	162	270,38	289-72-38-27-41-63-111-121-169-237-148-150-200-215-289
16	2	MT	160	299,99	289-8-3-125-167-183-120-194-5-45-61-66-181-289
		ST	1	18,88	8- 31 -8
17	2	MT	12	67,55	289-251-289
		ST	67	41,46	251- 129-22-18-143 -251
		ST	84	55,90	251- 17-10-112-9-84-93-177-193 -251
18	2	MT	23	29,13	289-69-289
		ST	82	41,90	69- 141-43-34-42-29 -69
		ST	38	34,00	69- 20-28-49 -69
19	2	MT	53	67,66	289-54-40-51-289
		ST	71	51,57	54-123- 65-77-266-48-75 -54
		ST	32	18,49	54- 62-14 -54
20	2	MT	3	58,30	289-124-289
		ST	81	50,18	124- 114-25-163-247-284 -124
		ST	80	117,21	124- 213 -140-176- 37-92-32 -124
21	2	MT	1	86,42	289-79-289
		ST	84	66,54	79- 158-152 -253- 133-12-243 -203-79
		ST	82	54,71	79- 185-46-1-21-2-6 -79

Fortsetzung PT29

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
22	2	MT	164	302,08	289-85-223-4-188-60-182-19-70-138-103-289
23	2	MT	4	45,08	289-13-289
		ST	61	40,66	13-23- 26-55-52-83 -13
		ST	79	75,89	13- 36-147-211-178-212-170-199-106-139 -13
		ST	22	1,24	289- 35 -289
24	2	MT	62	117,56	289-94-191-241-91-289
		ST	63	31,22	289- 86 -126- 180 -289
		ST	45	29,32	241-15- 11 -39-241
25	3	MT	170	359,19	289-90-78-41-63-99-132-102-74-81-250-105-89-174-289
26	3	MT	137	192,90	289-153-8-228-136-3-5-45-137-172-127-66-289
		ST	27	12,18	172- 12-73 -172
		ST	6	20,81	8- 216-31 -8
27	3	MT	122	285,27	289-13-96-57-53-82-33-195-113-135-70-280-289
		ST	7	22,63	82- 58 -82
		ST	38	45,08	57- 67-217 -57
28	3	MT	74	141,69	289-130-39-15-196-156-69-289
		ST	79	58,75	39-220-162-239- 11 -39
29	3	MT	96	208,34	289-189-19-116-60-4-144-289
		ST	68	56,17	189- 238-281-48-9-184-65 -189
30	3	MT	25	30,52	289-108-289
		ST	22	1,24	289- 35 -289
		ST	31	56,74	108- 17-32 -108
		ST	82	139,97	108- 22-201-18 -117- 37-225-168 -108
31	3	MT	82	127,51	289-6-155-7-16-208-289
		ST	84	47,51	7-59- 56-68-44-71 -7
32	3	MT	70	133,55	289-61-128-27-38-72-289
		ST	23	14,54	27- 110 -27
		ST	76	41,41	61- 76-109-131-46-115-202 -61
33	3	MT	18	50,80	289-146-289
		ST	82	71,43	146- 55-24-30-64-50 -80-47- 52 -146
		ST	70	51,34	146- 26-154-36-240-142 -23-146
34	3	MT	12	38,08	289-87-289
		ST	75	57,84	87- 29-145-21-2-1-42-43 -87
		ST	66	43,56	87- 34-134-20-28-49 -87
35	3	MT	33	42,45	289-51-40-289
		ST	81	60,71	40- 98-122-118-160-10-100-244 -40
		ST	52	31,30	40- 14-54-62 -40
36	3	MT	0	0,00	289-289
		ST	85	72,61	289- 259-226-219-25-97-119 -289
37	4	MT	124	217,22	289-79-27-230-41-63-111-121-38-72-289
		ST	46	30,93	38- 44-88-71 -38
38	4	MT	115	303,20	289-91-15-39-254-57-53-107-33-187-197-289
		ST	7	35,31	107- 58 -107
		ST	13	14,00	197- 30-95-24 -197
		ST	30	16,24	39- 204-11 -39
39	4	MT	133	242,52	289-186-45-5-198-120-252-125-3-231-8-289
		ST	35	43,60	186- 214-31-273-227 -186
40	4	MT	53	67,66	289-54-40-51-289
		ST	83	65,67	54- 75-9-84 -171- 48-77-65 -54
		ST	27	16,81	40- 246-62 -40
41	4	MT	164	266,05	289-103-138-70-19-209-60-4-85-165-173-289
42	4	MT	22	98,74	289-6-16-289
		ST	85	50,83	16- 68-56-101 -59-7-16
		ST	62	47,05	6- 248-21-1-46-2 -6
43	4	MT	3	62,75	289-66-289
		ST	66	29,26	66- 25-114-267 -66
		ST	80	52,03	66- 159-283-12-133 -271-61-221-66

Fortsetzung PT29

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
44	4	MT	54	95,26	289-123-175-47-288-289
		ST	79	39,15	175- 50-64-206-14 -175
		ST	35	18,30	47- 164-52-83 -47
45	4	MT	19	10,40	289-126-289
		ST	81	85,72	126- 17-157-93-207-112-10-179 -126
		ST	45	7,28	289- 86-35 -289
46	4	MT	64	58,32	289-161-13-23-94-289
		ST	67	101,74	23- 36-67 -104- 55-26 -23
		ST	39	33,82	94- 262-139-106-29 -94
47	4	MT	3	58,30	289-124-289
		ST	84	93,14	124- 32-92-18-149-37 -140-124
		ST	82	77,30	124- 166-22-192-143-190-129 -124
48	4	MT	23	29,13	289-69-289
		ST	80	38,73	69- 20-34-151-42-43-141 -69
		ST	57	35,69	69- 49-205-28 -69
49	5	MT	169	353,59	289-203-90-78-41-63-99-132-102-74-255-81-148-169-38-6-289
50	5	MT	137	291,88	289-181-137-45-5-194-183-167-3-136-127-289
		ST	27	20,55	137- 12-73 -137
51	5	MT	169	274,74	289-144-188-4-60-182-116-19-70-40-51-289
52	5	MT	102	256,84	289-235-229-135-113-33-82-53-57-96-236-289
		ST	28	23,98	82- 58-210 -82
		ST	37	43,10	57- 272-67 -57
53	5	MT	135	218,54	289-215-200-150-105-89-282-15-39-130-191-289
		ST	24	13,44	39- 11 -39
54	5	MT	5	73,93	289-269-289
		ST	83	78,80	269-8- 31-163 -257- 97-25-213 -269
		ST	80	118,35	269- 32-22-18 -117- 37 -176-287-269
55	5	MT	26	105,15	289-72-16-289
		ST	84	49,65	16- 71-68-56 -59-7-16
		ST	59	45,40	72-27- 110-44 -72
56	5	MT	7	81,70	289-61-66-289
		ST	81	44,46	61- 185-158-152 -128-61
		ST	75	41,21	61- 76-109-131-46-115 -61
57	5	MT	43	60,25	289-13-23-69-289
		ST	51	48,16	23- 36-26-55-52 -23
		ST	74	59,52	23- 199-170-212-178-211-147-142 -23
58	5	MT	33	79,17	289-47-80-54-289
		ST	71	71,71	54- 62-98-122-118-9-48-65 -54
		ST	43	46,76	80- 24-30-64-50 -80
		ST	18	8,49	54- 14 -54
59	5	MT	11	43,21	289-232-289
		ST	83	50,09	232- 134-34-42-21-1-2 -232
		ST	68	50,75	232- 49-87-29-43-20-28 -232
60	5	MT	25	30,52	289-108-289
		ST	85	62,40	108- 277-17-193-177-10-100 -108
		ST	60	31,74	289- 35-180-119 -289
61	6	MT	116	160,40	289-94-156-285-174-59-7-155-289
		ST	49	21,73	7- 68-56-101 -7
62	6	MT	119	291,87	289-57-53-107-33-195-70-138-54-40-289
		ST	7	35,31	107- 58 -107
		ST	23	42,66	57- 67 -57
		ST	14	12,96	40- 62 -40
63	6	MT	144	265,24	289-66-61-172-45-5-120-125-3-270-8-140-289
		ST	15	12,30	172- 12-133 -172
		ST	4	33,29	140- 37 -140
		ST	6	20,14	270- 31-216 -270
		ST	1	9,64	61- 202 -61

Fortsetzung PT29

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
64	6	MT	126	217,19	289-79-27-41-63-111-121-38-72-6-289
		ST	19	19,27	79- 46 -79
		ST	21	11,38	6- 2 -6
65	6	MT	95	142,10	289-91-196-15-39-23-13-51-289
		ST	75	57,68	15-245-224-162- 11 -15
66	6	MT	133	230,57	289-123-103-189-19-278-60-4-85-289
		ST	35	14,60	103- 65 - 184 - 77 -103
67	6	MT	3	50,69	289-274-289
		ST	80	84,96	274- 17 - 143 - 84 - 9 - 48 - 75 -274
		ST	84	49,49	274- 129 - 32 - 92 - 201 - 18 - 22 -274
68	6	MT	18	87,54	289-208-289
		ST	68	51,37	208-16- 44 - 88 - 71 - 222 - 286 -208
		ST	84	59,73	208- 21 - 1 - 42 - 34 - 43 - 29 - 139 - 106 - 145 -208
69	6	MT	26	64,07	289-69-153-289
		ST	73	36,01	69- 275 - 141 - 20 - 28 - 49 -69
		ST	66	64,75	153- 264 - 114 - 25 - 168 -124-153
70	6	MT	18	50,80	289-146-289
		ST	66	48,19	146- 26 - 154 - 36 - 55 - 52 - 83 -146
		ST	83	81,99	146-47- 14 - 50 - 64 - 95 - 30 - 24 -104-146
71	6	MT	34	32,35	289-126-276-289
		ST	79	55,51	276- 233 - 10 - 93 - 112 - 160 - 263 -276
72	6	MT	0	0,00	289-289
		ST	45	7,28	289- 35 - 86 -289

PT30: Gesamtdistanz 17136,75

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	MT	151	358,19	289-63-99-132-102-74-81-105-89-282-289
		ST	14	24,93	63- 41 -63
2	1	MT	38	148,88	289-254-57-289
		ST	62	65,31	254- 11 -162- 39 -254
		ST	67	194,98	57- 67 - 197 - 135 - 113 -33- 58 -53-57
3	1	MT	62	285,64	289-8-167-183-252-3-5-289
		ST	60	45,44	5- 45 - 12 - 133 - 73 - 137 -5
		ST	1	18,88	8- 31 -8
4	1	ST	42	26,50	5- 194 - 198 -5
		MT	121	230,79	289-144-165-4-60-19-70-280-138-289
		ST	20	13,96	19- 116 -19
5	1	ST	26	37,77	144- 48 - 9 - 84 -144
		MT	3	58,30	289-124-289
		ST	83	107,92	124- 32 - 18 - 22 - 143 - 149 - 37 -124
6	1	ST	72	35,47	124- 114 - 25 - 219 - 226 - 264 -124
		MT	4	109,99	289-215-289
		ST	84	45,92	215- 7 - 71 - 68 - 56 - 59 -215
7	1	ST	81	93,87	215- 196 - 15 - 204 -130- 191 - 211 - 178 - 212 -215
		MT	1	86,42	289-79-289
		ST	82	53,96	79- 152 - 27 - 38 - 44 - 88 - 72 -79
8	1	ST	81	44,25	79- 6 - 16 - 208 - 21 - 2 - 25 - 8 -79
		MT	0	0,00	289-289
		ST	84	120,67	289- 52 - 95 - 30 - 24 - 55 - 26 - 36 - 23 - 13 -289
9	1	ST	85	71,83	289- 139 - 106 - 29 - 43 - 141 - 20 - 28 - 49 -289
		MT	0	0,00	289-289
		ST	85	95,97	289- 51 - 118 - 10 - 93 - 207 - 17 - 274 -289
		ST	85	97,78	289- 122 - 65 - 77 - 103 - 123 - 54 - 98 -289

Fortsetzung PT30

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
10	1	MT	23	55,69	289-181-289
		ST	80	56,62	181- 46-1-42-34-134 -181
		ST	67	51,75	181- 115-271-61-221-66 -181
11	1	MT	8	41,74	289-40-289
		ST	81	58,85	40- 62-14-50-64-80-47 -40
12	1	MT	0	0,00	289-289
		ST	83	58,02	289- 69-205-119-180 -289
		ST	64	13,51	289- 126-86-35 -289
13	2	MT	47	202,70	289-63-111-289
		ST	82	91,61	111- 44-38-110-90-78-41 -111
		ST	22	1,24	289- 35 -289
14	2	MT	41	117,38	289-228-8-289
		ST	70	72,31	8- 163-25-97-66-127-218-214-31 -8
		ST	25	30,52	289- 108 -289
15	2	MT	56	224,62	289-3-125-120-5-289
		ST	85	93,98	5- 273-227-159-61-76-109-12-45 -5
		ST	18	14,19	3- 136 -3
16	2	MT	24	15,13	289-249-289
		ST	76	48,34	249- 28-34-151-42-20 -249
		ST	63	65,35	249- 49-43-29-145-262-87 -249
17	2	MT	144	310,76	289-82-33-195-70-19-60-4-188-173-289
		ST	12	56,61	82-107- 58 -82
		ST	14	20,35	19- 209 -19
18	2	MT	5	102,67	289-253-289
		ST	82	78,65	253- 202-131-46-1-21-2-185 -253
		ST	80	66,63	253- 128-203-27-155-72-6 -253
19	2	MT	19	31,93	289-161-289
		ST	71	48,46	161- 146-52-55-26-23 -161
		ST	75	86,33	161- 199-170-91-142-36-154-13 -161
20	2	MT	0	0,00	289-289
		ST	84	48,12	289- 51-268-94-69 -289
		ST	84	110,45	289- 10-112-9-48-65-75-265 -289
21	2	MT	0	0,00	289-289
		ST	83	69,20	289- 129-277-17-157-100 -289
		ST	74	83,35	289- 83-47-14-54-62 -40-289
22	2	MT	12	123,56	289-200-289
		ST	80	54,75	200- 222-16-71-7-59 -200
		ST	78	95,35	200-174-150- 121-68-56-101 -200
23	2	MT	15	116,97	289-117-289
		ST	73	80,03	117- 37-140-32-92-201-18 -117
		ST	78	100,51	117- 85-190-177-193-22-166 -117
24	2	MT	48	141,21	289-104-57-96-289
		ST	43	43,10	104- 64-50-30-24 -104
		ST	79	140,42	57- 39-15-11-53-67 -57
25	3	MT	147	354,28	289-89-105-250-81-74-102-132-99-63-289
		ST	14	24,93	63- 41 -63
26	3	MT	4	96,03	289-235-289
		ST	83	105,60	235-70- 135-187-30-24-95-64-50 -235
		ST	81	212,56	235- 67-57-53-58-210-33-113 -235
27	3	MT	98	250,36	289-144-4-182-19-60-171-289
		ST	20	13,96	19- 116 -19
		ST	47	39,75	171- 279-48-260-84 -171
28	3	MT	26	131,88	289-8-186-289
		ST	64	25,20	186- 73-12-133-172 -186
		ST	77	86,62	186- 137-45-5-3-231-270-216-31 -186

Fortsetzung PT30

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
29	3	MT	13	126,20	289-156-130-289
		ST	70	51,87	130- 15-245-11-39 -130
		ST	84	63,81	156- 59-56-68-71-7 -156
30	3	MT	1	86,42	289-79-289
		ST	68	90,79	79- 38-44-88-148-237-169-27 -79
		ST	80	51,54	79- 158-72-16-6-2 -79
31	3	MT	3	58,30	289-124-289
		ST	82	129,34	124- 32-18-143-37 -176- 168 -124
		ST	60	29,34	124- 213-25-114 -124
32	3	MT	2	80,86	289-175-289
		ST	76	52,94	175- 103-65-184-77-189 -138-175
		ST	84	27,93	175- 206-14-54-123 -175
33	3	MT	0	0,00	289-289
		ST	77	100,32	289- 26-55-236-36-147-23-13 -289
		ST	84	87,37	289- 43-42-1-21-29-106-139-69 -289
34	3	MT	8	41,74	289-40-289
		ST	78	49,30	40- 246-80-47-52-164-288 -40
		ST	83	77,75	40- 62-9-93-10-160-118-98 -40
35	3	MT	0	0,00	289-289
		ST	83	98,64	289- 119-66-61-115-46-49 -289
		ST	68	55,79	289- 28-20-134-34-141 -289
36	3	MT	0	0,00	289-289
		ST	85	107,50	289- 153-22-192-17-179-122-51 -289
		ST	64	13,51	289- 35-86-126 -289
37	4	MT	47	202,70	289-111-63-289
		ST	84	96,14	111- 121-44-38-27-90-78-41 -111
38	4	MT	88	280,21	289-5-120-183-125-167-8-289
		ST	80	82,17	5- 194-198-3-136-12-45 -5
		ST	1	18,88	8- 31 -8
39	4	MT	72	274,76	289-104-33-82-107-53-57-96-289
		ST	7	22,63	82- 58 -82
		ST	76	90,05	104- 67-197-30-24-50-64 -104
40	4	MT	63	194,10	289-239-162-224-285-289
		ST	30	21,13	239- 204-11 -239
		ST	75	64,20	285- 91-191-241-39-15-196 -285
41	4	MT	84	226,65	289-165-4-60-278-19-70-289
		ST	85	95,10	278- 238-281-48-9-112-10-207 -278
42	4	MT	32	136,28	289-140-117-289
		ST	24	35,75	117- 85 -117
		ST	78	78,22	117- 18-22-92-32-37-149 -117
		ST	22	1,24	289- 35 -289
43	4	MT	4	109,99	289-215-289
		ST	85	41,83	215- 59-101-56-68-7 -215
		ST	80	48,10	215- 71-242-16-208-286 -215
44	4	MT	0	0,00	289-289
		ST	82	134,96	289- 152-128-110-72-6-21-43 -289
		ST	78	54,05	289- 180-205-49-28 -289
45	4	MT	0	0,00	289-289
		ST	79	111,43	289- 29-212-178-211-142-240-36 -289
		ST	78	80,17	289- 42-1-2-34-20 -289
46	4	MT	8	41,74	289-40-289
		ST	81	62,06	40- 75-65-54-14-62 -40
		ST	71	64,96	40- 13-23-26-55-52-83-47 -40
47	4	MT	23	55,69	289-181-289
		ST	76	53,93	181- 66-267-97-25-257-127-61 -181
		ST	53	32,53	181- 131-46-109-76 -181

Fortsetzung PT30

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
48	4	MT	0	0,00	289-289
		ST	82	67,72	289- 108-100-17-129 -289
		ST	85	51,25	289- 69-87-94-51 -289
49	5	MT	156	354,87	289-63-99-132-102-74-255-81-150-105-174-289
		ST	14	24,93	63- 41 -63
50	5	MT	24	121,32	289-234-289
		ST	52	29,69	234- 67-217-272 -234
		ST	77	182,44	234-57-53-256- 58 -33-195- 113-135 -234
51	5	MT	16	103,07	289-8-289
		ST	68	40,20	8- 247-163-25-114 -8
		ST	83	109,78	8- 31 -3-5- 45-137-73-12-133-214 -8
52	5	MT	136	226,23	289-173-188-4-60-19-70-138-289
		ST	34	22,90	19- 116-209 -19
53	5	MT	40	188,78	289-200-89-130-289
		ST	45	39,16	130- 39-11-15 -130
		ST	84	48,84	200- 56-68-71-7-59 -200
54	5	MT	1	86,42	289-79-289
		ST	79	54,69	79- 72-44-88-155-16-6 -79
		ST	80	54,41	79- 38-27-243-203-185 -79
55	5	MT	14	96,02	289-144-289
		ST	69	69,64	144- 48-266-77-103-65-9-84-93 -144
		ST	80	60,82	144- 177-193-10-157-17-251-143-190 -144
56	5	MT	0	0,00	289-289
		ST	79	109,36	289- 47-80-50-64-95-30-24-52 -289
		ST	64	13,51	289- 126-86-35 -289
57	5	MT	0	0,00	289-289
		ST	79	105,77	289- 46-115-202-61-159-66-119 -289
		ST	85	85,97	289- 28-151-1-2-21-42-43 -289
58	5	MT	19	31,93	289-161-289
		ST	79	57,91	161- 146-55-26-154-36-23-13 -161
		ST	71	65,35	161- 69-29-145-106-139-170-199 -161
59	5	MT	8	41,74	289-40-289
		ST	71	141,25	289- 22-166-201-18-37-32 -124-289
		ST	80	46,88	40- 62-14-123-54-98 -40
60	5	MT	0	0,00	289-289
		ST	84	58,02	289- 49-20-134-34-141-275 -289
		ST	80	62,97	289- 276-118-263-122-51 -289
61	6	MT	7	148,04	289-230-289
		ST	65	61,29	230- 78-41 -63-111-230
		ST	75	90,22	230- 121-148-169-38-27-110-90 -230
62	6	MT	86	252,00	289-171-60-182-19-70-229-175-289
		ST	72	60,56	171- 48-189-184-65-75-9 -171
63	6	MT	62	269,32	289-96-57-53-107-82-33-289
		ST	28	23,98	82- 58-210 -82
		ST	75	98,27	96- 67-187-30-24 -104- 55-26 -96
64	6	MT	10	114,97	289-186-289
		ST	72	83,76	186- 31-216 -8- 127-61-283-12-172 -186
		ST	84	117,76	186- 136 -3-125-120-5- 45 -186
65	6	MT	7	103,58	289-156-289
		ST	78	72,81	156- 91-39-11-220-15 -156
		ST	85	59,72	156- 7-68-56-101-59 -156
66	6	MT	15	116,97	289-117-289
		ST	51	72,25	117-4- 223-85 -117
		ST	84	81,21	117- 37-32-92-18-22-192-261 -117
67	6	MT	8	41,74	289-40-289
		ST	77	35,97	40- 206-14-54-62 -40
		ST	77	66,95	40- 83-52-164-64-50-47 -40

Fortsetzung PT30

ID	T	TT	L	Distanz	Kundenreihenfolge
68	6	MT	0	0,00	289-289
		ST	80	130,26	289- 6-72-44-71-16-21 -289
		ST	80	60,55	289- 49-28-34-42-43 -289
69	6	MT	0	0,00	289-289
		ST	85	51,25	289- 69-87-94-51 -289
		ST	79	96,98	289- 29-142-147-36-23-13 -289
70	6	MT	5	73,93	289-269-289
		ST	69	68,87	269-140-287-176- 225-168 -269
		ST	65	42,65	269- 284-213-97-25 -269
		ST	22	1,24	289- 35 -289
71	6	MT	0	0,00	289-289
		ST	83	91,75	289- 232-131-46-2-248-1-20 -289
		ST	84	122,86	289- 153-259-66-76-109-128-158 -289
72	6	MT	0	0,00	289-289
		ST	80	52,47	289- 108-100-179-244 -289
		ST	81	88,09	289- 160-112-10-233-17-129 -289

Anhang D

Lösungen für das MDVRP

Nachfolgende Tabellen zeigen die Tourenpläne neu ermittelter bester Lösungen zu 6 der 23 klassischen MDVRP-Probleme¹. Die Spalten enthalten die folgenden Informationen: die Nummer der Tour (ID), das zugehörige Depot (Dp), die Ladung (L), die Distanz und die Kundenreihenfolge der zugehörigen Tour.

MD4: Gesamtdistanz 1001,47

ID	Dp	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	101	93	59,50	101-58-53-28-27-89-6-96-101
2	101	96	28,69	101-87-95-94-13-101
3	101	100	41,56	101-85-93-99-59-101
4	101	100	60,80	101-97-37-100-91-16-44-14-42-101
5	101	98	88,18	101-57-15-43-38-86-61-98-92-101
6	101	87	40,57	101-21-72-74-75-22-2-101
7	101	96	76,51	101-41-23-67-39-56-101
8	101	99	73,41	101-40-26-12-54-55-25-4-73-101
9	102	100	64,10	102-33-81-34-78-79-50-1-102
10	102	98	107,18	102-63-64-49-36-47-46-82-102
11	102	99	53,10	102-31-10-90-32-20-30-102
12	102	98	59,81	102-88-7-48-19-11-62-102
13	102	95	84,30	102-8-45-17-84-5-60-83-18-52-102
14	102	100	74,12	102-3-29-24-80-68-77-76-69-102
15	102	99	89,62	102-70-66-65-71-35-9-51-102

¹ Vgl. Kapitel 2.3.2.2.

MD7: Gesamtdistanz 884,66

ID	Dp	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	101	95	99,18	101-45-46-36-49-64-19-7-18-101
2	101	95	45,73	101-17-86-16-61-5-101
3	101	100	38,61	101-60-99-93-37-98-85-84-101
4	101	99	46,39	101-82-48-47-8-83-101
5	102	42	8,36	102-80-68-102
6	102	93	51,76	102-12-26-40-21-4-54-102
7	102	92	60,54	102-76-77-3-79-78-34-29-24-102
8	102	99	79,73	102-56-23-67-39-25-55-102
9	103	99	87,38	103-42-100-91-44-38-14-43-15-57-103
10	103	100	42,69	103-58-53-89-6-94-13-103
11	103	90	42,99	103-2-41-22-75-74-72-73-103
12	103	99	35,10	103-95-96-59-92-97-87-103
13	104	96	50,80	104-1-50-33-81-51-30-70-104
14	104	92	62,09	104-10-32-90-63-11-62-88-104
15	104	93	89,37	104-20-66-65-71-35-9-104
16	104	74	43,95	104-69-28-27-52-31-104

MD8: Gesamtdistanz 4433,28

ID	Dp	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	250	499	183,58	250-122-38-56-113-80-194-197-42-10-238-131-235-250
2	250	498	115,73	250-43-225-241-11-214-57-203-193-125-64-250
3	250	496	193,72	250-58-150-189-106-121-248-89-167-13-101-250
4	250	464	111,31	250-114-148-26-9-153-230-170-2-195-250
5	250	499	143,78	250-183-36-220-65-206-83-217-250
6	250	499	179,98	250-204-30-191-5-133-211-90-61-12-49-124-137-54-250
7	250	493	281,75	250-96-72-33-234-31-205-221-129-130-53-228-173-27-250
8	250	484	151,95	250-18-79-19-185-166-207-198-73-250
9	250	494	136,39	250-190-112-213-8-123-118-3-135-146-177-69-250
10	250	499	167,84	250-84-52-169-181-171-59-162-75-219-15-250
11	250	500	279,51	250-223-55-17-24-40-127-147-201-78-32-233-39-250
12	250	489	59,29	250-163-224-82-157-249-62-237-250
13	250	500	216,88	250-242-66-103-168-47-175-226-136-176-102-250
14	251	470	158,50	251-25-141-104-74-215-126-116-16-243-6-251
15	251	483	162,06	251-246-140-172-21-138-100-186-160-251
16	251	494	308,58	251-4-115-99-70-232-231-202-139-1-229-71-68-142-209-164-7-251
17	251	495	213,45	251-188-87-154-76-155-108-244-145-81-208-251
18	251	417	153,51	251-28-95-34-182-35-239-156-251
19	251	463	180,94	251-152-144-192-184-218-119-50-77-212-45-200-251
20	251	500	185,75	251-91-88-247-149-86-151-94-245-251
21	251	456	83,18	251-179-161-187-93-46-216-63-180-251
22	251	500	156,15	251-128-143-14-107-240-117-98-174-48-251
23	251	421	130,84	251-37-222-85-111-236-196-23-120-22-251
24	251	495	191,32	251-92-178-210-41-109-20-227-29-105-44-199-251
25	251	498	287,28	251-165-132-97-67-51-134-159-158-60-110-251

MD9: Gesamtdistanz 3877,35

ID	Dp	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	250	494	215,26	250-60-158-134-159-147-201-78-32-67-105-250
2	250	482	281,80	250-75-233-176-136-226-175-47-55-17-24-40-127-51-29-250
3	250	495	122,43	250-132-97-59-162-181-171-85-250
4	250	495	153,00	250-169-52-219-15-102-16-243-6-165-222-250
5	250	474	190,11	250-37-116-126-215-74-104-141-25-246-208-199-44-250
6	250	500	215,13	250-152-156-35-239-119-218-184-192-144-23-250
7	250	470	153,47	250-14-107-212-91-187-45-128-48-250
8	250	414	82,40	250-117-240-98-143-174-196-250
9	250	471	219,07	250-93-50-245-94-151-86-149-247-88-77-250
10	250	497	118,45	250-111-120-22-200-63-180-216-46-161-179-236-250
11	250	497	93,59	250-92-178-210-41-110-109-20-227-250
12	251	463	141,43	251-13-167-89-248-121-106-189-150-58-251
13	251	445	58,64	251-114-148-26-9-153-230-170-2-251
14	251	499	114,91	251-217-83-206-65-220-36-183-251
15	251	497	195,06	251-195-27-173-137-18-54-204-198-73-96-213-112-251
16	251	498	164,62	251-190-8-123-118-3-135-84-146-62-249-157-251
17	251	445	93,20	251-125-64-163-69-177-237-224-251
18	251	487	142,78	251-82-43-223-122-39-38-242-225-241-235-193-251
19	251	496	174,49	251-11-56-66-168-103-113-80-194-197-42-10-238-251
20	251	287	68,69	251-101-214-131-57-203-251
21	252	464	138,39	252-72-185-19-166-207-30-191-79-252
22	252	376	74,29	252-138-21-186-81-4-100-252
23	252	499	199,74	252-211-90-61-221-129-130-53-228-124-49-12-133-5-33-252
24	252	457	161,31	252-68-142-232-231-202-139-1-229-71-31-205-234-252
25	252	426	90,72	252-99-70-155-108-244-115-145-209-252
26	252	478	214,37	252-76-154-87-188-34-95-182-28-160-7-164-140-172-252

MD10: Gesamtdistanz 3655,18

ID	Dp	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	250	497	88,55	250-92-178-210-41-110-109-20-227-250
2	250	478	203,95	250-105-132-97-67-51-134-159-158-60-29-250
3	250	498	160,52	250-85-169-171-181-52-243-16-6-165-37-250
4	250	490	175,88	250-111-236-23-120-22-200-63-216-180-152-208-199-44-222-250
5	250	492	163,16	250-107-212-45-91-93-187-161-179-128-250
6	250	500	225,70	250-46-50-245-94-151-86-149-247-88-77-14-250
7	250	493	83,41	250-196-48-174-143-98-240-117-250
8	251	479	208,42	251-203-148-26-9-153-189-106-121-248-89-167-13-238-251
9	251	316	63,81	251-10-131-57-214-251
10	251	496	125,17	251-225-224-163-64-125-101-193-11-251
11	251	476	155,24	251-122-146-84-135-3-118-123-8-190-69-177-237-62-251
12	251	474	86,36	251-242-38-223-43-249-157-82-235-241-251
13	251	500	117,33	251-39-102-15-219-75-162-59-136-251
14	251	491	202,52	251-47-55-17-24-40-127-147-201-78-32-226-176-233-251
15	251	472	107,25	251-56-66-175-168-103-113-80-194-197-42-251
16	252	498	157,62	252-83-36-58-230-114-170-2-195-27-173-252
17	252	500	143,06	252-228-53-65-206-220-150-183-217-252
18	252	416	98,25	252-124-49-130-129-221-61-90-211-12-252
19	252	453	101,36	252-133-5-79-72-185-19-191-30-18-252
20	252	478	124,54	252-137-54-204-198-73-96-112-213-166-207-252
21	253	498	189,96	253-164-140-172-74-104-215-116-126-141-25-246-7-160-253
22	253	476	138,57	253-115-244-108-70-232-155-76-154-87-188-253
23	253	494	260,78	253-209-234-33-205-31-71-229-1-139-202-231-68-142-99-253
24	253	458	93,75	253-4-81-186-21-138-100-145-253
25	253	468	130,21	253-156-144-192-184-218-119-239-35-253
26	253	215	49,81	253-28-182-34-95-253

MD18: Gesamtdistanz 3702,83

ID	Dp	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	241	55	188,93	241-4-12-20-28-36-33-238-25-17-9-1-241
2	241	60	221,42	241-6-14-22-30-38-73-65-57-49-66-74-39-31-23-15-241
3	241	60	60,00	241-2-3-5-8-7-241
4	242	60	233,14	242-51-59-67-75-113-105-97-89-92-100-108-116-77-69-61-53-242
5	242	54	170,71	242-46-54-62-70-78-76-68-60-52-44-242
6	242	53	147,80	242-47-55-63-71-79-72-64-56-48-242
7	242	60	86,50	242-45-43-42-50-58-41-242
8	243	55	188,93	243-87-95-103-111-119-118-80-110-102-94-86-243
9	243	54	170,71	243-85-93-101-109-117-120-112-104-96-88-243
10	243	60	86,50	243-82-83-98-90-81-84-243
11	244	53	147,80	244-125-133-141-149-157-147-139-131-123-244
12	244	60	233,14	244-129-137-145-153-198-190-182-174-175-183-191-199-154-146-138-130-244
13	244	60	233,14	244-134-142-150-158-40-32-24-16-13-21-29-37-156-148-140-132-244
14	244	60	221,42	244-128-136-144-152-160-115-107-99-91-106-114-159-151-143-135-244
15	244	60	60,00	244-127-126-124-121-122-244
16	245	54	170,71	245-163-171-179-187-195-194-186-178-170-162-245
17	245	48	54,14	245-161-164-166-167-245
18	245	55	188,93	245-168-176-184-192-155-200-197-189-181-173-165-245
19	246	60	233,14	246-211-219-227-235-193-185-177-169-172-180-188-196-237-229-221-213-246
20	246	54	170,71	246-202-210-218-226-234-233-225-217-209-201-246
21	246	53	147,80	246-204-212-220-228-236-230-222-214-206-246
22	246	60	233,14	246-215-223-231-239-34-26-18-10-11-19-27-35-240-232-224-216-246
23	246	48	54,14	246-203-205-208-207-246

Anhang E

Lösungen für das PVRP

Nachfolgende Tabellen zeigen die Tourenpläne neu ermittelter bester Lösungen zu 4 der 32 klassischen PVRP-Probleme¹. Die Spalten enthalten die folgenden Informationen: die Nummer der Tour (ID), den zugehörigen Tag (T), die Ladung (L), die Distanz und die Kundenreihenfolge der zugehörigen Tour.

P21: Gesamtdistanz 2177,35

ID	T	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	20	107,00	61-2-15-41-27-8-26-39-14-61
2	1	20	155,64	61-17-45-9-29-10-30-47-18-61
3	1	20	157,76	61-20-51-32-11-34-12-58-23-61
4	1	20	107,00	61-1-24-59-36-7-25-38-13-61
5	1	20	50,00	61-3-4-5-6-61
6	2	20	152,29	61-16-44-9-28-8-2-61
7	2	20	155,64	61-19-49-10-31-11-33-53-21-61
8	2	20	154,41	61-22-55-12-35-7-1-61
9	2	20	50,00	61-3-4-5-6-61
10	3	20	107,00	61-2-14-40-26-8-27-42-15-61
11	3	20	155,64	61-17-46-29-9-30-10-48-18-61
12	3	20	155,64	61-20-52-32-11-34-12-57-23-61
13	3	20	107,00	61-1-13-37-25-7-36-60-24-61
14	3	20	50,00	61-6-5-4-3-61
15	4	20	153,35	61-16-43-28-9-8-2-61
16	4	20	156,70	61-21-54-33-11-10-31-50-19-61
17	4	20	152,29	61-22-56-12-35-7-1-61
18	4	20	50,00	61-6-5-4-3-61

¹ Vgl. Kapitel 2.3.1.2.

P26: Gesamtdistanz 3795,29

ID	T	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	19	235,92	52-3-23-8-21-2-41-52
2	1	19	235,92	52-46-5-31-10-28-4-52
3	1	19	235,92	52-50-1-38-12-36-6-52
4	2	19	240,80	52-2-18-7-17-1-51-52
5	2	19	235,92	52-4-26-9-25-3-43-52
6	2	20	246,04	52-5-33-11-35-6-15-52
7	3	20	234,91	52-3-13-40-2-1-52
8	3	20	234,91	52-6-5-47-14-4-52
9	4	17	233,23	52-2-20-8-22-3-52
10	4	19	235,92	52-5-30-10-29-4-44-52
11	4	19	240,80	52-49-6-37-12-39-1-52
12	5	17	233,23	52-4-27-9-24-3-52
13	5	19	235,92	52-48-6-34-11-32-5-52
14	5	20	246,04	52-2-19-7-16-1-15-52
15	6	20	234,91	52-6-5-14-45-4-52
16	6	20	234,91	52-3-42-13-2-1-52

P28: Gesamtdistanz 22441,31

ID	T	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	19	885,88	103-11-97-29-10-4-103
2	1	20	910,56	103-8-91-28-93-9-15-40-103
3	1	20	910,56	103-7-102-30-100-12-17-47-103
4	1	14	177,17	103-3-19-56-2-103
5	1	17	231,13	103-1-66-6-5-103
6	2	20	1174,65	103-35-8-69-22-67-7-53-103
7	2	20	1185,62	103-9-75-24-77-10-16-20-103
8	2	20	1190,18	103-11-83-26-86-12-99-18-103
9	2	19	258,42	103-2-3-41-42-4-103
10	2	19	234,91	103-5-6-63-21-1-103
11	3	20	1189,88	103-14-8-71-23-73-9-39-103
12	3	20	1180,32	103-11-81-25-80-10-95-43-103
13	3	20	1170,45	103-7-89-27-87-12-52-64-103
14	3	20	288,67	103-6-5-4-3-103
15	3	18	235,92	103-65-1-32-13-34-2-103
16	4	18	244,77	103-6-49-50-17-48-5-103
17	4	20	897,16	103-10-96-29-98-11-46-45-103
18	4	19	885,88	103-12-30-101-7-1-103
19	4	20	912,65	103-15-9-94-28-92-8-33-103
20	4	19	234,91	103-4-3-58-19-2-103
21	5	20	1185,63	103-21-18-7-68-22-70-8-103
22	5	20	1174,39	103-10-78-24-76-9-37-38-103
23	5	20	1187,79	103-12-85-26-84-11-16-44-103
24	5	20	288,67	103-6-1-2-3-103
25	5	18	180,47	103-59-4-60-20-62-5-103
26	6	20	1187,79	103-36-14-9-74-23-72-8-103
27	6	18	1166,92	103-10-79-25-82-11-61-103
28	6	20	1187,79	103-12-88-27-90-7-13-31-103
29	6	19	250,95	103-5-6-51-54-1-103
30	6	19	231,22	103-4-3-57-55-2-103

P29: Gesamtdistanz 22662,67

ID	T	L	Distanz	Kundenreihenfolge
1	1	20	1185,62	103-8-72-23-73-9-15-103
2	1	18	216,31	103-5-48-47-49-50-6-103
3	1	20	885,88	103-11-98-29-10-4-103
4	1	20	885,88	103-12-100-30-7-1-103
5	1	19	206,63	103-19-55-2-36-38-3-103
6	2	20	246,04	103-20-4-43-16-46-5-103
7	2	17	233,23	103-2-35-14-37-3-103
8	2	20	1185,62	103-10-80-25-81-11-17-103
9	2	18	216,31	103-1-53-54-51-52-6-103
10	2	19	1179,61	103-99-12-87-27-89-7-103
11	2	20	908,39	103-9-93-28-91-8-13-103
12	3	19	1179,61	103-8-69-22-68-7-101-103
13	3	19	1170,39	103-9-76-24-78-10-42-103
14	3	20	234,91	103-6-21-66-1-2-103
15	3	20	1185,62	103-11-84-26-85-12-18-103
16	3	19	250,95	103-5-45-44-4-3-103
17	4	19	1170,39	103-9-74-23-71-8-33-103
18	4	19	180,47	103-2-56-19-57-3-58-103
19	4	20	908,39	103-11-97-29-96-10-15-103
20	4	19	235,22	103-6-5-61-59-4-103
21	4	20	885,88	103-12-30-102-7-1-103
22	5	16	204,76	103-4-41-40-39-3-103
23	5	19	235,92	103-2-34-13-31-1-65-103
24	5	20	1185,62	103-11-82-25-79-10-16-103
25	5	20	908,39	103-14-8-92-28-94-9-103
26	5	20	1185,62	103-7-90-27-88-12-17-103
27	5	17	189,32	103-63-6-5-62-20-103
28	6	20	234,91	103-6-64-21-1-2-103
29	6	19	1179,61	103-9-75-24-77-10-95-103
30	6	20	1185,62	103-11-83-26-86-12-18-103
31	6	19	1170,39	103-8-70-22-67-7-32-103
32	6	17	231,13	103-5-60-4-3-103

Literaturverzeichnis

- [Aar97a] Aarts E.H.L., Lenstra J.K. (Hrsg.): Local Search in Combinatorial Optimization. Wiley, Chichester 1997.
- [Aar97b] Aarts E.H.L., Korst J.H.M., van Laarhoven P.J.M.: Simulated Annealing. In: [Aar97a, S. 91-120].
- [Alt91] Altinkemer K., Gavish B.: Parallel Savings Based Heuristic for the Delivery Problem. Operations Research, Vol. 39 (1991), S. 731-749.
- [Amb00] Amberg A., Domschke W., Voß S.: Multiple Center Capacitated Arc Routing Problems: A Tabu Search Algorithm Using Capacitated Trees. European Journal of Operational Research, Vol. 124 (2000), S. 360-376.
- [Ang02] Angelelli E., Speranza M.G.: The Periodic Vehicle Routing Problem with Intermediate Facilities. European Journal of Operational Research, Vol. 137 (2002), S. 233-247.
- [Arc03] Archetti C., Bertazzi L., Speranza M.G.: Reoptimizing the Traveling Salesman Problem. Networks, Vol. 42 (2003), S. 154-159.
- [Ash75] Ashour S., Bhatt P.: A Graph-Theoretical Approach for Delivery Problems. Unveröffentlichtes Arbeitspapier, 1975.
- [Ass88] Assad A.A.: Modeling and Implementation Issues in Vehicle Routing. In: [Gol88, S. 7-45].
- [Ass95] Assad A.A., Golden B.L.: Arc Routing Methods and Applications. In: [Bal95, S. 375-483].
- [Bac00] De Backer B., Furnon V., Shaw P., Kilby P., Prosser P.: Solving Vehicle Routing Problems Using Constraint Programming and Metaheuristics. Journal of Heuristics, Vol. 6 (2000), S. 501-523.
- [Bak99] Baker B.M., Sheasby J.: Extensions to the Generalised Assignment Heuristic for Vehicle Routing. European Journal of Operational Research, Vol. 119 (1999), S. 147-157.

- [Bak02] Baker E.K.: Evolution of Microcomputer-Based Vehicle Routing Software: Case Studies in the United States. In: [Tot02a, S. 353-361].
- [Bal83] Ball M.O., Golden B.L., Assad A., Bodin L.D.: Planning for Truck Fleet Size in the Presence of a Common Carrier Option. *Descision Science*, Vol. 14 (1983), S. 103-120.
- [Bal88] Ball M.O.: Allocation/Routing: Models and Algorithms. In: [Gol88, S. 199-221].
- [Bal95] Ball M.O., Magnanti T.L., Monma C.L., Nemhauser G.L. (Hrsg.): *Network Routing. Handbooks in Operations Research and Management Science*, Vol. 8, North-Holland, Amsterdam 1995.
- [Ban98] Banerjea-Brodeur M., Cordeau J.-F., Laporte G., Lasry A.: Scheduling Linen Deliveries in a Large Hospital. *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 49 (1998), S. 777-780.
- [Bap02] Baptista S., Oliveira R.C., Zúquete E.: A Period Vehicle Routing Case Study. *European Journal of Operational Research*, Vol. 139 (2002), S. 220-229.
- [Bar95] Barr R.S., Golden B.L., Kelly J.P., Resende M.G.C., Stewart Jr. W.R.: Designing and Reporting Computational Experiments with Heuristic Methods. *Journal of Heuristics*, Vol. 1 (1995), S. 9-32.
- [Bar99] Barbarosoğlu G., Özgür D.: A Tabu Search Algorithm for the Vehicle Routing Problem. *Computers & Operations Research*, Vol. 26 (1999), S. 255-270.
- [Bat94] Battiti R., Tecchiolli G.: The Reactive Tabu Search. *ORSA Journal on Computing*, Vol. 6 (1994), S. 126-140.
- [Bat96] Battiti R.: Reactive Search: Toward Self-Tuning Heuristics. In: [Ray96, S. 61-83].
- [Bea90] Beasley J.E.: OR-Library: Distributing Test Problems by Electronic Mail. *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 41 (1990), S. 1069-1072. (Internet: <http://mscmga.ms.ic.ac.uk/info.html>, Abruf am 7.10.2003.)
- [Bea93] Beasley J.E.: Lagrangean Relaxation. In: [Ree93a, S. 243-303].
- [Bel74] Beltrami E.J., Bodin L.D.: Networks and Vehicle Routing for Municipal Waste Collection. *Networks*, Vol. 4 (1974), S. 65-94.

- [Ber98] Bergmann M.: Tourenplanung mit Zeitfenstern - ein Überblick. Shaker, Aachen 1998, zgl. Dissertation, Universität Hagen 1997.
- [Ber04] Bertazzi L., Paletta G., Speranza M.G.: An Improved Heuristic for the Period Traveling Salesman Problem. Erscheint in Computers & Operations Research, voraussichtlich 2004.
- [Blu01] Blum C., Roli A.: Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison. Report TR/IRIDIA/2001-13, Insitutut de Recherches Interdisciplinaires et de Développements en Intelligence Artificielle, Université Libre de Bruxelles 2001.
- [Bod81] Bodin L., Golden B.L.: Classification in Vehicle Routing and Scheduling. Networks, Vol. 11 (1981), S. 97-108.
- [Bod83] Bodin L., Golden B.L., Assad A.A., Ball M.: Routing and Scheduling of Vehicles and Crews - the State of the Art. Computers & Operations Research. Vol. 10 (1983), S. 63-211.
- [Bod99] Bodin L., Maniezzo V., Mingozzi A.: Street Routing and Scheduling Problems. In: [Hal99, S. 395-432]
- [Boz03] Bozkaya B., Erkut E., Laporte G.: A Tabu Search Heuristic and Adaptive Memory Procedure for Political Districting. European Journal of Operational Research, Vol. 144 (2003), S. 12-26.
- [Bra89] Brandeau M.L., Chiu S.S.: An Overview of Representative Problems in Location Research. Management Science, Vol. 35 (1989), S. 645-674.
- [Bra95] Bramel J.B., Simchi-Levi D.: A Location Based Heuristic for General Routing Problems. Operations Research, Vol. 43 (1995), S. 649-660.
- [Bra97] Brandão J., Mercer A.: A Tabu Search Algorithm for the Multi-Trip Vehicle Routing and Scheduling Problem. European Journal of Operational Research, Vol. 100 (1997), S. 180-191.
- [Bra98] Brandão J., Mercer A.: The Multi-Trip Vehicle Routing Problem. Journal of the Operational Research Society, Vol. 49 (1998), S. 799-805.
- [Bra02] Bramel J., Simchi-Levi D.: Set-Covering-Based Algorithms for the Capacitated VRP. In: [Tot02a, S. 85-108].
- [Brä01a] Bräysy O., Gendreau M.: Tabu Search Heuristics for the Vehicle Routing Problem with Time Windows. Internal Report STF42 A01022, Department of Optimisation, SINTEF Applied Mathematics, Oslo 2001.

- [Brä01b] Bräysy O., Gendreau M.: Route Construction and Local Search Algorithms for the Vehicle Routing Problem with Time Windows. Internal Report STF42 A01024, Department of Optimisation, SINTEF Applied Mathematics, Oslo 2001.
- [Brä04a] Bräysy O., Gendreau M.: Vehicle Routing Problem with Time Windows, Part I: Route Construction and Local Search Algorithms. Erscheint in *Transportation Science*, voraussichtlich 2004.
- [Brä04b] Bräysy O., Gendreau M.: Vehicle Routing Problem with Time Windows, Part II: Metaheuristics. Erscheint in *Transportation Science*, voraussichtlich 2004.
- [Bre95] Van Breedam A.: Vehicle Routing: Bridging the Gap between Theory and Practice. *Belgian Journal of Operations Research, Statistics and Computer Science*, Vol. 35 (1995), S. 63-80.
- [Bre02] Van Breedam A.: A Parametric Analysis of Heuristics for the Vehicle Routing Problem with Side-Constraints. *European Journal of Operational Research*, Vol. 137 (2002), S. 348-370.
- [Bru98] Bruns A.D.: Zweistufige Standortplanung unter Berücksichtigung von Tourenplanungsaspekten - Primale Heuristiken und lokale Suchverfahren. Dissertation Nr. 2152, Universität St. Gallen 1998.
- [Cam98] Campbell A., Clarke L., Kleywegt A., Savelsbergh M.: The Inventory Routing Problem. In: [Cra98, S. 95-113].
- [Cam02] Campbell A.M., Clarke L.W., Savelsbergh M.W.P.: Inventory Routing in Practice. In: [Tot02a, S. 309-330].
- [Car96] Carter M.W., Farvolden J.M., Laporte G., Xu J.: Solving an Integrated Logistics Problem arising in Grocery Distribution. *INFOR*, Vol. 34 (1996), S. 290-307.
- [Cat92] Cattrysse D.G., Van Wassenhove L.N.: A Survey of Algorithms for the Generalized Assignment Problem. *European Journal of Operational Research*, Vol. 60 (1992), S. 260-272.
- [Cas72] Cassidy P.J., Bennett H.S.: TRAMP - A Multi-Depot Vehicle Scheduling System. *Operational Research Quaterly*, Vol. 23 (1972), S. 151-162.
- [Cas88] Casco D.O., Golden B.L., Wasil E.A.: Vehicle Routing with Backhauls: Models, Algorithms, and Case Studies. In: [Gol88, S. 127-147].

- [Cha93a] Chao I-M.: Algorithms and Solutions to Multi-Level Vehicle Routing Problems. Dissertation, Applied Mathematics Program, University of Maryland, College Park, MD 1993.
- [Cha93b] Chao I-M., Golden B.L., Wasil E.A.: A New Heuristic for the Multi-Depot Vehicle Routing Problem that improves upon best-known Solutions. *American Journal of Mathematical and Management Science*, Vol. 13 (1993), S. 371-406.
- [Cha95a] Chao I-M., Golden B.L., Wasil E.A.: A New Heuristic for the Period Traveling Salesman Problem. *Computers & Operations Research*, Vol. 22 (1995), S. 553-565.
- [Cha95b] Chao I-M., Golden B.L.: An Improved Heuristic for the Period Vehicle Routing Problem. *Networks*, Vol. 26 (1995), S. 25-44.
- [Cha98] Chao I-M., Golden B.L., Wasil E.A.: A New Algorithm for the Site-Dependent Vehicle Routing Problem. In: Woodruff D.L. (Hrsg.): *Advances in Computational and Stochastic Optimization, Logic and Heuristic Search. Interfaces in Computer Science and Operations Research*, Kluwer, Boston 1998, S. 301-312.
- [Cha99] Chao I-M., Golden B.L., Wasil E.A.: A Computational Study of a New Heuristic for the Site-Dependent Vehicle Routing Problem. *INFOR*, Vol. 37 (1999), S. 319-336.
- [Cha02] Chao I-M.: A Tabu Search Method for the Truck and Trailer Routing Problem. *Computers & Operations Research*, Vol. 29 (2002), S. 33-51.
- [Chi96] Chiang W.-C., Russell R.A.: Simulated Annealing Metaheuristics for the Vehicle Routing Problem with Time Windows. *Annals of Operations Research*, Vol. 63 (1996), S. 3-27.
- [Chr69] Christofides N., Eilon S.: An Algorithm for the Vehicle-Dispatching Problem. *Operational Research Quaterly*, Vol. 20 (1969), S. 309-318.
- [Chr79a] Christofides N., Mingozzi A., Toth P., Sandi C. (Hrsg.): *Combinatorial Optimization*. Wiley, Chichester 1979.
- [Chr79b] Christofides N., Mingozzi A., Toth P.: The Vehicle Routing Problem. In: [Chr79a, S. 315-338].
- [Chr84] Christofides N., Beasley J.E.: The Period Vehicle Routing Problem. *Networks*, Vol. 14 (1984), S. 237-256.
- [Chr85] Christofides N.: Vehicle Routing. In: [Law85, S. 431-448].

- [Cla64] Clarke G., Wright J.W.: Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points. *Operations Research*, Vol. 12 (1964), S. 568-581.
- [Cor95] Cordeau J.-F., Gendreau M., Laporte G.: A Tabu Search Heuristic for Periodic and Multi-Depot Vehicle Routing Problems. Publikation CRT-95-75, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal 1995.
- [Cor97] Cordeau J.-F., Gendreau M., Laporte G.: A Tabu Search Heuristic for Periodic and Multi-Depot Vehicle Routing Problems. *Networks*, Vol. 30 (1997), S. 105-119.
- [Cor01a] Cordeau J.-F., Laporte G., Mercier A.: A Unified Tabu Search Heuristic for Vehicle Routing Problems with Time Windows. *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 52 (2001), S. 928-936.
- [Cor01b] Cordeau J.-F., Laporte G.: A Tabu Search Algorithm for the Site Dependent Vehicle Routing Problem with Time Windows. *INFOR*, Vol. 39 (2001), S. 292-298.
- [Cor02a] Cordeau J.-F., Gendreau M., Laporte G., Potvin J.-Y., Semet F.: A Guide to Vehicle Routing Heuristics. *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 53 (2002), S. 512-522.
- [Cor02b] Cordeau J.-F., Laporte G.: Tabu Search Heuristics for the Vehicle Routing Problem. *Les Cahiers du GERAD G-2002-15*, Groupe d'études et de recherche en analyse des décisions, École des Hautes Études Commerciales de Montréal 2002.
- [Cor02c] Cordeau J.-F., Desaulniers G., Desrosiers J., Solomon M.M., Soumis F.: VRP with Time Windows. In: [Tot02a, S. 157-193].
- [Cor02d] Cordeau J.-F., Laporte G.: The Dial-a-Ride Problem: Variants, Modeling Issues and Algorithms. *Les Cahiers du GERAD G-2002-25*, Groupe d'études et de recherche en analyse des décisions, École des Hautes Études Commerciales de Montréal 2002.
- [Cor03a] Cordeau J.-F., Laporte G., Mercier A.: An Improved Tabu Search Algorithm for the Handling of Route Duration Constraints in Vehicle Routing Problems with Time Windows. Internet: <http://www.crt.umontreal.ca/~cordeau/publications.html>, Abruf am 1.10.2003.
- [Cor03b] Cordeau J.-F.: A Branch-and-Cut Algorithm for the Dial-a-Ride Problem. Internet: <http://www.crt.umontreal.ca/~cordeau/publications.html>, Abruf am 1.10.2003.

- [Coy00] Coy S.P., Golden B.L., Runger G.C., Wasil E.A.: Using Experimental Design to Find Effective Parameter Settings for Heuristics. *Journal of Heuristics*, Vol. 7 (2000), S. 77-97.
- [Cra98] Crainic T.G., Laporte G. (Hrsg.): *Fleet Management and Logistics*. Kluwer, Boston 1998.
- [Cra02] Crama Y., van de Klundert J., Spieksma F.C.R.: Production Planning Problems in Printed Circuit Board Assembly. *Discrete Applied Mathematics*, Vol. 123 (2002), S. 339-361.
- [Cur02] Current J., Daskin M., Schilling D.: Discrete Network Location Models. In: [Dre02, S. 81-118].
- [Dan59] Dantzig G.B., Ramser J.H.: The Truck Dispatching Problem. *Management Science*, Vol. 6 (1954), S. 80-91.
- [Das99] Daskin M.S., Owen S.H.: Location Models in Transportation. In: [Hal99, S. 311-360].
- [Des89] Desrochers M., Verhoog T.W.: A Matching Based Savings Algorithm for the Vehicle Routing Problem. *Les Cahiers du GERAD G-89-04*, Groupe d'études et de recherche en analyse des décisions, École des Hautes Études Commerciales de Montréal 1989.
- [Des90] Desrochers M., Lenstra J.K., Savelsbergh M.W.P.: A Classification Scheme for Vehicle Routing and Scheduling Problems. *European Journal of Operational Research*, Vol. 46 (1990), S. 322-332.
- [Des95] Desrosiers J., Dumas Y., Solomon M.M., Soumis F.: Time Constrained Routing and Scheduling. In: [Bal95, S. 35-139].
- [Des99] Desrochers M., Jones C.V., Lenstra J.K., Savelsbergh M.W.P., Stougie L.: Towards a Model and Algorithm Management System for Vehicle Routing and Scheduling Problems. *Decision Support Systems*, Vol. 25 (1999), S. 109-133.
- [Des02] Desaulniers G., Desrosiers J., Erdmann A., Solomon M.M., Soumis F.: VRP with Pickup and Delivery. In: [Tot02a, S. 225-242].
- [Dom89] Domschke W.: *Logistik: Transport*. 3. Aufl., Oldenbourg, München 1989.
- [Dom97] Domschke W.: *Logistik: Rundreisen und Touren*. 4. Aufl., Oldenbourg, München 1997.
- [Don03] Dongarra J.J.: Performance of Various Computers Using Standard Linear Equations Software. Technical Report CS-89-85, Department of Computer Science, University of Tennessee, Tennessee 2003.

- [Dre02] Drezner Z., Hamacher H.W.: Facility Location: Applications and Theory. Springer, Berlin 2002.
- [Dro87] Dror M., Ball M.O.: Inventory/Routing: Reduction from an Annual to a Short-Period Problem. Naval Research Logistics, Vol. 34 (1987), S. 891-905.
- [Dro00] Dror M.: Arc Routing - Theory, Solutions and Applications. Kluwer, Boston 2000.
- [Dru01] Drummond L.M.A., Ochi L.S., Vianna D.S.: An Asynchronous Parallel Metaheuristic for the Period Vehicle Routing Problem. Future Generation Computer Systems, Vol. 17 (2001), S. 379-386.
- [Due93] Dueck G.: New Optimization Heuristics - the Great Deluge Algorithm and Record-To-Record Travel. Journal of Computational Physics, Vol. 104 (1993), S. 86-92.
- [Eil71] Eilon S., Watson-Gandy C.D.T., Christofides N. (Hrsg.): Distribution Management: Mathematical Modelling and Practical Analysis. Griffin, London 1971.
- [Elc89] Elchner J.: Die Tourenkonstruktion bei heterogenem Fuhrpark. CH-Verlag, Regensburg 1989, zgl. Dissertation, Universität Regensburg 1989.
- [Eng02] Engeler K.: Mehrdepot-Tourenplanung mit Zeitfenstern. Eul, Lohmar 2002, zgl. Dissertation, Universität Wuppertal 2002.
- [Ess87] Esswein W.: Kombinierte Distanzmasse zur Lösung von Standardproblemen der Tourenplanung. Dissertation, Universität Regensburg 1987.
- [Fis81] Fisher M.L., Jaikumar R.: A Generalized Assignment Heuristic for Vehicle Routing. Networks, Vol. 11 (1981), S. 109-124.
- [Fis95] Fisher M.L.: Vehicle Routing. In: [Bal95, S. 1-33].
- [Fle90] Fleischmann B.: The Vehicle Routing Problem with Multiple Use of Vehicles. Forschungsbericht Fachbereich Wirtschaftswissenschaften, Universität Hamburg 1990.
- [Fle98] Fleischmann B.: Tourenplanung. In: Isermann H. (Hrsg.): Logistik: Gestaltung von Logistiksystemen. 2. Aufl., Verlag Moderne Industrie, Landsberg/Lech 1998, S. 287-301.
- [Foc03] Focacci F., Laburthe F., Lodi A.: Local Search and Constraint Programming. In: [Glo03a, S. 369-403].

- [Fos76] Foster B.A., Ryan D.M.: An Integer Programming Approach to the Vehicle Scheduling Problem. *Operations Research*, Vol. 27 (1976), S. 367-384.
- [Gas67] Gaskell T.J.: Bases for Vehicle Fleet Scheduling. *Operations Research Quarterly*, Vol. 18 (1967), S. 281-295.
- [Gau92] Gaudioso M., Paletta G.: A Heuristic for the Periodic Vehicle Routing Problem. *Transportation Science*, Vol. 26 (1992), S. 86-92.
- [Gar79] Garey M.R., Johnson D.S. (Hrsg.): *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*. Freeman, San Francisco 1979.
- [Gen92] Gendreau M., Hertz A., Laporte G.: New Insertion and Postoptimization Procedures for the Traveling Salesman Problem. *Operations Research*, Vol. 40 (1992), S. 1086-1094.
- [Gen94] Gendreau M., Hertz A., Laporte G.: A Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem. *Management Science*, Vol. 40 (1994), S. 1276-1290.
- [Gen96] Gendreau M., Laporte G., Séguin R.: Stochastic Vehicle Routing. *European Journal of Operational Research*, Vol. 88 (1996), S. 3-12.
- [Gen97] Gendreau M., Laporte G., Potvin J.-Y.: Vehicle Routing: Modern Heuristics. In: [Aar97a, S. 311-336].
- [Gen98a] Gendreau M., Hertz A., Laporte G., Stan M.: A Generalized Insertion Heuristic for the Traveling Salesman Problem with Time Windows. *Operations Research*, Vol. 43 (1998), S. 330-335.
- [Gen98b] Gendreau M., Potvin J.-Y.: Dynamic Vehicle Routing and Dispatching. In: [Cra98, S. 115-126].
- [Gen99] Gendreau M., Laporte G., Musaraganyi C., Taillard É.D.: A Tabu Search Heuristic for the Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem. *Computers & Operations Research*, Vol. 26 (1999), S. 1153-1173.
- [Gen02a] Gendreau M.: Recent Advances in Tabu Search. In: [Rib02, S. 370-377].
- [Gen02b] Gendreau M., Laporte G., Potvin J.-Y.: Metaheuristics for the Capacitated Vehicle Routing Problem. In: [Tot02a, S. 129-154].

- [Gen02c] Gendreau M., Potvin J.-Y.: Metaheuristics in Combinatorial Optimization. Publikation CRT-2002-36, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal 2002.
- [Gen03] Gendreau M.: An Introduction to Tabu Search. In: [Glo03a, S. 37-54].
- [Ger96] Gerdessen J.C.: Vehicle Routing Problem with Trailers. European Journal of Operational Research, Vol. 93 (1996), S. 135-147.
- [Ghi01] Ghiani G., Laporte G.: Location-Arc Routing Problems. Opsearch, Vol. 38 (2001), S. 151-159.
- [Ghi02] Ghiani G., Hertz A., Laporte G.: Recent Algorithmic Advances for Arc Routing Problems. In: Kozan E., Ohuchi A. (Hrsg.): Operations Research/Management Science at Work. Kluwer, Boston 2002, S. 1-20.
- [Ghi03] Ghiani G., Guerriero F., Laporte G., Musmanno R.: Real-Time Vehicle Routing: Algorithms and Parallel Computing Strategies. European Journal of Operational Research, Vol. 151 (2003), S. 1-11.
- [Gil74] Gillett B.E., Miller L.R.: A Heuristic Algorithm for the Vehicle Dispatch Problem. Operations Research, Vol. 22 (1974), S. 340-349.
- [Gil76] Gillett, B.E., Johnson, J.G.: Multi-Terminal Vehicle-Dispatch Algorithm. Omega, Vol. 4 (1976), S. 711-718.
- [Gio02] Giosa I.D., Tansini I.L., Viera I.O.: New Assignment Algorithms for the Multi-Depot Vehicle Routing Problem. Journal of the Operational Research Society, Vol. 53 (2002), S. 977-984.
- [Glo77] Glover F.: Heuristics for Integer Programming Using Surrogate Constraints. Decision Sciences, Vol. 8 (1977), S. 156-166.
- [Glo86] Glover F.: Future Paths for Integer Programming and Links to Artificial Intelligence. Computers & Operations Research, Vol. 13 (1986), S. 533-549.
- [Glo89] Glover F.: Tabu Search - Part I. ORSA Journal on Computing, Vol. 1 (1989), S. 190-206.
- [Glo90] Glover F.: Tabu Search - Part II. ORSA Journal on Computing, Vol. 2 (1990), S. 4-32.
- [Glo93a] Glover F., Laguna M.: Tabu Search. In: [Ree93a, S. 70-150].

- [Glo93b] Glover F., Taillard É.D., de Werra D. (Hrsg.): A User's Guide to Tabu Search. *Annals of Operations Research*, Vol. 41 (1993), S. 3-28.
- [Glo95a] Glover F., Kelly J.P., Laguna M.: Genetic Algorithms and Tabu Search: Hybrids for Optimization. *Computers & Operations Research*, Vol. 22 (1995), S. 111-134.
- [Glo95b] Glover F.: Tabu Thresholding: Improved Solutions by Nonmonotonic Trajectories. *ORSA Journal on Computing*, Vol. 7 (1995), S. 426-442.
- [Glo96] Glover F., Parker M., Ryan J.: Coloring by Tabu Branch and Bound. in: Johnson D.S., Trick M.A. (Hrsg.): *Cliques, Coloring, and Satisfiability*. DIMACS Series in Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science, Vol. 26, American Mathematical Society, 1996, S. 285-308.
- [Glo97] Glover F., Laguna M.: *Tabu Search*; Kluwer, Boston 1997.
- [Glo98] Glover F.: A Template for Scatter Search and Path Relinking. In: Hao J.K., Lutton E., Ronald R., Schoenauer M., Snyers D. (Hrsg.): *Artificial Evolution*. Lecture Notes in Computer Science, Vol. 1363, Springer, Berlin 1998, S. 13-54.
- [Glo03a] Glover F., Kochenberger G.A. (Hrsg.): *Handbook of Metaheuristics*. Kluwer, Boston 2003.
- [Glo03b] Glover F., Laguna M., Martí R.: Scatter Search and Path Relinking: Advances and Applications. In: [Glo03a, S. 1-35].
- [Gol77] Golden B.L., Magnanti T.L., Nguyen H.G.: Implementing Vehicle Routing Algorithms. *Networks*, Vol. 7 (1977), S. 113-148.
- [Gol84] Golden B.L., Assad A.A., Levy L., Gheysens F.G.: The Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem. *Computers & Operations Research*, Vol. 11 (1984), S. 49-65.
- [Gol85] Golden B.L., Stewart W.R.: Empirical Analysis of Heuristics. In: [Law85, S. 207-249].
- [Gol87] Golden B.L., Wasil E.A.: Computerized Vehicle Routing in the Soft Drink Industry. *Operations Research*, Vol. 35 (1987), S. 6-17.
- [Gol88] Golden B.L., Assad A.A. (Hrsg.): *Vehicle Routing: Methods and Studies*. North-Holland, Amsterdam 1988.

- [Gol97] Golden B.L., Laporte G., Taillard É.D.: An Adaptive Memory Heuristic for a Class of Vehicle Routing Problems with Minmax Objective. *Computers & Operations Research*, Vol. 24 (1997), S. 445-452.
- [Gol98] Golden B.L., Wasil E.A., Kelly J.P., Chao I-M.: Metaheuristics in Vehicle Routing. In: [Cra98, S. 33-56].
- [Gol02] Golden B.L., Assad A.A., Wasil E.A.: Routing Vehicles in the Real World: Applications in the Solid Waste, Beverage, Food, Dairy, and Newspaper Industries. In: [Tot02a, S. 245-286].
- [Gre03] Greistorfer P.: A Tabu Scatter Search Metaheuristic for the Arc Routing Problem. *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 44 (2003), S. 249-266.
- [Had95] Hadjiconstantinou E., Christofides N., Mingozzi A.: A new exact Algorithm for the Vehicle Routing Problem based on q-paths and k-shortest paths relaxations. *Annals of Operations Research*, Vol. 61 (1995), S. 21-43.
- [Had98] Hadjiconstantinou E., Baldacci R.: A Multi-Depot Period Vehicle Routing Problem Arising in the Utilities Sector. *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 49 (1998), S. 1239-1248.
- [Had02] Hadjiconstantinou E., Roberts D.: Routing Under Uncertainty: An Application in the Scheduling of Field Service Engineers. In: [Tot02a, S. 331-352].
- [Hal99] Hall R.W.: *Handbook of Transportation Science*. International Series in Operations Research and Management Science, Vol. 23, Kluwer, Boston 1999.
- [Han86] Hansen P.: The Steepest Ascent Mildest Descent Heuristic for Combinatorial Programming. *Congress on Numerical Methods in Combinatorial Optimization*, Capri 1986.
- [Han02] Han A.F.-W., Cho Y.-J.: A GIDS Metaheuristic Approach to the Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem. In: [Rib02, S. 399-414].
- [Han03] Hansen P., Mladenović N.: Variable Neighborhood Search. In: [Glo03a, S. 145-184].
- [Hel84] Hellmann A.: *Theorie und Praxis von Routing-Problemen: Lösungsverfahren zur Tourenplanung im Eindepot- und Mehrdepot-Fall*. SNV Studengesellschaft Nahverkehr mbH, Verlag Martienss, Schwarzenbek 1984.

- [Her02] Hertz A.: Recent Trends in Arc Routing. Les Cahiers du GERAD G-2002-51, Groupe d'études et de recherche en analyse des décisions, École des Hautes Études Commerciales de Montréal 2002.
- [Her03] Hertz A., Widmer M.: Guidelines for the Use of Meta-Heuristics in Combinatorial Optimization. *European Journal of Operational Research*, Vol. 151 (2003), S. 247-252.
- [Hes65] Hess S.W., Weaver J.B., Siegfeldt H.J., Whelan J.N., Zitlau P.A.: Nonpartisan Political Redistricting by Computer. *Operations Research*, Vol. 13 (1965), S. 998-1006.
- [Hes71] Hess S.W., Samuels S.A.: Experiences with a Sales Districting Model: Criteria and Implementation. *Management Science*, Vol. 18 (1971), S. 41-54.
- [Hil97] Hillier F.S., Lieberman G.J.: *Operations Research: Einführung*. 5. Aufl., Oldenbourg, München 1997.
- [Hjo95] Hjorring C.A.: The Vehicle Routing Problem and Local Search Metaheuristics. Dissertation, University of Auckland 1995.
- [Irn00] Irnich S.: A Multi-Depot Pickup and Delivery Problem with a Single Hub and Heterogeneous Vehicles. *European Journal of Operational Research*, Vol. 122 (2000), S. 310-328.
- [Jac99] Jacobi A.: *Kooperative Tabusuche: Ein neuer metaheuristischer Ansatz, entwickelt und dargestellt auf der Grundlage von Tourenplanungsproblemen*. Utz, München 1999, zgl. Dissertation, Universität Regensburg 1999.
- [Joh85] Johnson D.S., Papadimitriou C.H.: Performance Guarantees for Heuristics. In: [Law85, S. 145-180].
- [Joh97] Johnson D.S., McGeoch L.A.: The Traveling Salesman Problem: A Case Study. In: [Aar97a, S. 215-310].
- [Joh02] Johnson D.S.: A Theoretician's Guide to the Experimental Analysis of Algorithms. In: Goldwasser M.H., Johnson D.S., McGeoch C.C. (Hrsg.): *Data Structures, Near Neighbor Searches, and Methodology: Fifth and Sixth DIMACS Implementation Challenges*. American Mathematical Society, Providence 2002, S. 215-250.
- [Kab97] Kabath M.: *Das Konzept der periodischen Tourenplanung: Potentiale und Einsatzmöglichkeiten in Entscheidungsunterstützungssystemen für die Distributionslogistik*. Shaker, Aachen 1997, zgl. Dissertation, Universität Köln 1996.

- [Kaz03] Kazaz B., Altinkemer K.: Optimization of Multi-Feeder (Depot) Printed Circuit Board Manufacturing with Error Guarantees. *European Journal of Operational Research*, Vol. 150 (2003), S. 370-394.
- [Kin97] Kindervater G.A.P., Savelsbergh M.W.P.: Vehicle Routing: Handling Edge Exchanges. In: [Aar97a, S. 337-360].
- [Klo01] Klose A.: Standortplanung in distributiven Systemen - Modelle, Methoden, Anwendungen. Physica, Heidelberg 2001.
- [Klo02] Klose A., Drexl A.: Combinatorial Optimisation Problems of the Assignment Type and a Partitioning Approach. In: Klose A., Speranza M. G., Van Wassenhove L. N. (Hrsg.): *Quantitative Approaches to Distributions Logistics and Supply Chain Management. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, Vol. 519, Springer, Berlin 2002, S. 215-245.
- [Kna02] Knauer S.: Neue heuristische Methoden zur Optimierung des Fertigungsablaufs. Logos, Berlin 2002, zgl. Dissertation, Universität Regensburg 2002.
- [Lag03] Laguna M., Martí R.: *Scatter Search: Methodology and Implementations in C*. Kluwer, Boston 2003.
- [Lap84] Laporte G., Nobert Y., Arpin D.: Optimal Solutions to Capacitated Multi-Depot Vehicle Routing Problems. *Congressus Numerantium*, Vol. 44 (1984), S. 283-292.
- [Lap88a] Laporte G.: Location Routing Problems. In: [Gol88, S. 163-197].
- [Lap88b] Laporte G., Norbert Y., Tallefer S.: Solving a Family of Multi-Depot Vehicle Routing and Location-Routing Problems. *Transportation Science*, Vol. 22 (1988), S. 161-172.
- [Lap92a] Laporte G.: The Traveling Salesman Problem: An Overview of Exact and Approximate Algorithms. *European Journal of Operational Research*, Vol. 59 (1992), S. 231-247.
- [Lap92b] Laporte G.: The Vehicle Routing Problem: An Overview of Exact and Approximate Algorithms. *European Journal of Operational Research*, Vol. 59 (1992), S. 345-358.
- [Lap95] Laporte G., Osman I.H.: Routing Problems: A Bibliography. *Annals of Operations Research*, Vol. 61 (1995), S. 227-262.
- [Lap00] Laporte G., Gendreau M., Potvin J-Y., Semet F.: Classical and Modern Heuristics for the Vehicle Routing Problem. *International Transactions in Operational Research*, Vol. 7 (2000), S. 285-300.

- [Lap02] Laporte G., Semet F.: Classical Heuristics for the Capacitated VRP. In: [Tot02a, S. 109-128].
- [Law76] Lawler E.L.: Combinatorial Optimization: Networks and Matroids. Holt, Reinhart and Winston, New York 1976.
- [Law85] Lawler E.L., Lenstra J.K., Rinnooy Kan A.H.G., Shmoys D.B. (Hrsg.): The Traveling Salesman Problem. Wiley, Chichester 1985.
- [Li90] Li C.L., Simchi-Levi D.: Worst-Case Analysis of Heuristics for Multi-Depot Capacitated Vehicle Routing Problems. ORSA Journal on Computing, Vol. 2 (1990), S. 64-73.
- [Li04] Li F., Golden B.L., Wasil E.A.: Very Large-Scale Vehicle Routing: New Test Problems, Algorithms, and Results. Erscheint in Computers & Operations Research, voraussichtlich 2004.
- [Lia00] Liaw C.-F.: A Hybrid Genetic Algorithm for the Open Shop Scheduling Problem. European Journal of Operational Research, Vol. 124 (2000), S. 28-42.
- [Lin65] Lin S.: Computer Solutions to the Traveling Salesman Problem. Bell System Technical Journal, Vol. 44 (1965), S. 2245-2269.
- [Lin73] Lin S., Kernighan B.W.: An Effective Heuristic Algorithm for the Traveling-Salesman Problem. Operations Research, Vol. 21 (1973), S. 498-516.
- [Liu99] Liu F.-H., Shen S.-Y.: The Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem with Time Windows. Journal of the Operational Research Society, Vol. 50 (1999), S. 721-732.
- [Mar90] Martello S., Toth P. (Hrsg.): Knapsack Problems: Algorithms and Computer Implementations. Wiley, Chichester 1990.
- [Mat78] Matthäus F.: Tourenplanung - Verfahren zur Einsatzdisposition von Fuhrparks. STMV, Darmstadt 1978.
- [Mec99] Mehti R., Poujade S., Roucairol C., Lemarié B.: Global and Local Moves in Tabu Search: A Real-Life Mail Collecting Application. In: [Voß99, S. 155-174].
- [Min92] Min H., Current J., Schilling D.: The Multiple Depot Vehicle Routing Problem with Backhauling. Journal of Business Logistics, Vol. 13 (1992), S. 259-288.

- [Min98] Min H., Jayaraman V., Srivastava R.: Combined Location-Routing Problems: A Synthesis and Future Research Directions. *European Journal of Operational Research*, Vol. 108 (1998), S. 1-15.
- [Nad02] Naddef D., Rinaldi G.: Branch-and-Cut Algorithms for the Capacitated VRP. In: [Tot02a, S. 53-84].
- [Nag78] Nagel F.: MUDDY - Ein Verfahren zur Lösung großer Mehrdepot-Lieferplanprobleme. Dissertation, Universität Kiel 1978.
- [Nag88] Nag B., Golden B.L., Assad A.A.: Vehicle Routing with Site Dependencies. In: [Gol88, S. 149-159].
- [Nag99] Nagy G., Salhi S.: Consistency and Robustness in Location-Routing. *Studies in Locational Analysis*, Vol. 13 (1999), S. 3-19.
- [Nel85] Nelson M.D., Nygard K.E., Griffin J.H., Shreve W.E.: Implementation Techniques for the Vehicle Routing Problem. *Computers & Operations Research*, Vol. 12 (1985), S. 273-283.
- [Nem88] Nemhauser G.L., Wolsey L.A. (Hrsg.): *Integer and Combinatorial Optimization*. Wiley, Chichester 1988.
- [Och98a] Ochi L.S., Vianna D.S., Drummond L.M.A., Victor A.O.: A Parallel Evolutionary Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Heterogeneous Fleet. *Future Generation Computer Systems*, Vol. 14 (1998), S. 285-292.
- [Och98b] Ochi L.S., Vianna D.S., Drummond L.M.A., Victor A.O.: An Evolutionary Hybrid Metaheuristic for Solving the Vehicle Routing Problem with Heterogeneous Fleet. In: Banzhaf W., Poli R., Schoenauer M., Fogarty T.C. (Hrsg.): *Genetic Programming. Lecture Notes on Computer Science*, Vol. 1391, Springer, Berlin 1998, S. 187-195.
- [Or76] Or I.: *Traveling Salesman-Type Combinatorial Optimization Problems and their Relation to the Logistics of Regional Blood Banking*. Dissertation, Department of Industrial Engineering and Management Science, Northwestern University, Evanston, IL 1976.
- [Osm93] Osman I.H.: Meta Strategy Simulated Annealing and Tabu Search Algorithms for the Vehicle Routing Problem. *Annals of Operations Research*, Vol. 41 (1993), S. 421-451.
- [Osm95] Osman I.H.: Heuristics for the Generalized Assignment Problem: Simulated Annealing and Tabu Search Approaches. *OR Spektrum*, Vol. 17 (1995), S. 211-226.

- [Osm96a] Osman I.H., Kelly J.P. (Hrsg.): Meta-Heuristics: Theory & Applications. Kluwer, Boston 1996.
- [Osm96b] Osman I.H., Kelly J.P.: Meta-Heuristics: An Overview. In: [Osm96a, S. 1-21].
- [Osm96c] Osman I.H., Salhi S.: Local Search Strategies for the Vehicle Fleet Mix Problem. In: [Ray96, S. 131-153].
- [Osm02] Osman I.H., Wassan N.A.: A Reactive Tabu Search Meta-Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Back-Hauls. *Journal of Scheduling*, Vol. 5 (2002), S. 263-285.
- [Pae81] Paessens H.: Tourenplanung bei der regionalen Hausmüllentsorgung. Dissertation, Universität Karlsruhe 1981.
- [Pae88] Paessens H.: The Savings Algorithm for the Vehicle Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, Vol. 34 (1988), S. 336-344.
- [Pal92] Paletta G.: A Multiperiod Traveling Salesman Problem: Heuristic Algorithms. *Computers & Operations Research*, Vol. 19 (1992), S. 789-795.
- [Pal02] Paletta G.: The Period Traveling Salesman Problem: A New Heuristic Algorithm. *Computers & Operations Research*, Vol. 29 (2002), S. 1343-1352.
- [Par02] Pardalos P.M., Resende M.G.C. (Hrsg.): Handbook of Applied Optimization. Oxford University Press, Oxford 2002.
- [Per87] Perl J.: The Multi Depot Routing Allocation Problem. *American Journal of Mathematical and Management Science*, Vol. 7 (1987), S. 7-34.
- [Pes97] Pesant G., Gendreau M., Rousseau J-M.: GENIUS-CP: A Generic Single-Vehicle Routing Algorithm. In: *Principles and Practice of Constraint Programming: Proceedings of the Third International Conference (CP'97)*. Lecture Notes in Computer Science, Vol. 1330, Springer, Berlin 1997, S. 420-434.
- [Pes98] Pesant G., Gendreau M., Potvin J-Y., Rousseau J-M.: An Exact Constraint Logic Programming Algorithm for the Traveling Salesman Problem with Time Windows. *Transportation Science*, Vol. 32 (1998), S. 12-29.
- [Pes99] Pesant G., Gendreau M.: A Constraint Programming Framework for Local Search Methods. *Journal of Heuristics*, Vol. 5 (1999), S. 255-279.

- [Pet03] Petch R.J., Salhi S.: A Multi-Phase Constructive Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Multiple Trips. *Discrete Applied Mathematics*, Vol. 133 (2003), S. 69-92.
- [Pol03] Polacek M., Hartl R.F., Doerner K., Reimann M.: A Variable Neighborhood Search for the Multi Depot Vehicle Routing Problem with Time Windows. *Forschungsbericht, Lehrstuhl für Produktion und Logistik, Universität Wien* 2003.
- [Pot95] Potvin J.-Y., Rousseau J.-M.: An Exchange Heuristic for Routing Problems with Time Windows. *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 46 (1995), S. 1433-1446.
- [Pot96] Potvin J.-Y., Kervahut T., Garcia B-L., Rousseau J-M.: The Vehicle Routing Problem with Time Windows Part I: Tabu Search. *INFORMS Journal on Computing*, Vol. 8 (1996), S. 158-164.
- [Pri02] Prins C.: Efficient Heuristics for the Heterogeneous Fleet Multi-trip VRP with Application to a Large-Scale Real Case. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, Vol. 1 (2002), S. 135-150.
- [Pri04] Prins C.: A Simple and Effective Evolutionary Algorithm for the Vehicle Routing Problem. *Erscheint in Computers & Operations Research*, voraussichtlich 2004.
- [Psa88] Psaraftis H.N.: Dynamic Vehicle Routing Problems. In: [Gol88, S. 223-248].
- [Psa95] Psaraftis H.N.: Dynamic Vehicle Routing: Status and Prospect. *Annals of Operations Research*, Vol. 61 (1995), S. 143-164.
- [Raf82] Raft O.M.: A Modular Algorithm for an Extended Vehicle Scheduling Problem. *European Journal of Operational Research*, Vol. 11 (1982), S. 67-76.
- [Ram98] Ramalhinho-Lourenço H., Serra D.: Adaptive Approach Heuristics for the Generalized Assignment Problem. *Economic Working Papers Series Nr. 288, Department of Economics and Business, Universitat Pompeu Fabra, Barcelona* 1998.
- [Ray96] Rayward-Smith V.J., Osman I.H., Reeves C.R., Smith G.D. (Hrsg.): *Modern Heuristic Search Methods*. Wiley, Chichester 1996.
- [Ree93a] Reeves C.R. (Hrsg.): *Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems*. Blackwell, London 1993.
- [Ree93b] Reeves C.R.: Genetic Algorithms. In: [Ree93a, S. 151-196].

- [Ree93c] Reeves C.R.: Evaluation of Heuristic Performance. In: [Ree93a, S. 304-315].
- [Ree96] Reeves C.R.: Modern Heuristic Techniques. In: [Ray96, S. 1-25].
- [Ree03] Reeves C.R.: Genetic Algorithms. In: [Glo03a, S. 55-82].
- [Reg95] Rego C., Roucairol C.: Using Tabu Search for Solving a Dynamic Multi-Terminal Truck Dispatching Problem. *European Journal of Operational Research*, Vol. 83 (1995), S. 411-429.
- [Reg96] Rego C., Roucairol C.: A Parallel Tabu Search Algorithm Using Ejection Chains for the Vehicle Routing Problem. In: [Osm96a, S. 661-675].
- [Reg98a] Rego C.: A Subpath Ejection Method for the Vehicle Routing Problem. *Management Science*, Vol. 44 (1998), S. 1447-1459.
- [Reg98b] Rego C.: Relaxed Tours and Path Ejections for the Traveling Salesman Problem. *European Journal of Operational Research*, Vol. 106 (1998), S. 522-538.
- [Reg01] Rego C.: Node-Ejection Chains for the Vehicle Routing Problem: Sequential and Parallel Algorithms. *Parallel Computing*, Vol. 27 (2001), S. 201-222.
- [Rei80] Reichardt E.: Modelle und Verfahren der Unternehmensforschung zur Lösung von Tourenplanungsproblemen. Dissertation, Universität Regensburg 1980.
- [Rei94] Reinelt G. (Hrsg.): The Traveling Salesman: Computational Solutions for TSP Applications. *Lecture Notes on Computer Science*, Vol. 840, Springer, Berlin 1994.
- [Rei04] Reimann M., Dörner K., Hartl R.: D-Ants: Savings Based Ants Divide and Conquer the Vehicle Routing Problem. *Computers & Operations Research*, Vol. 31 (2004), S. 563-591.
- [Ren96a] Renaud Y., Laporte G., Boctor F.F.: A Tabu Search Heuristic for the Multi-Depot Vehicle Routing Problem. *Computers & Operations Research*, Vol. 23 (1996), S. 229-235.
- [Ren96b] Renaud J., Boctor F.F., Laporte G.: An Improved Petal Heuristic for the Vehicle Routing Problem. *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 47 (1996), S. 329-336.
- [Ren96c] Renaud J., Boctor F.F., Laporte G.: A Fast Composite Heuristic for the Symmetric Traveling Salesman Problem. *INFORMS Journal on Computing*, Vol. 8 (1996), S. 134-143.

- [Ren02] Renaud J., Boctor F.F.: A Sweep-Based Algorithm for the Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, Vol. 140 (2002), S. 618-628.
- [Res03] Resende M.G.C., Ribeiro C.C.: Greedy Randomized Adaptive Search Procedures. In: [Glo03a, S. 219-249].
- [Rib02] Ribeiro C., Hansen P. (Hrsg.): *Essays and Surveys in Metaheuristics*. Kluwer, Boston 2002.
- [Ric99] Rich J.: *A Computational Study of Vehicle Routing Applications*. Dissertation, Department of Computational and Applied Mathematics, Rice University, Houston, Texas 1999.
- [Roc94] Rochat Y., Semet F.: A Tabu Search Approach for Delivering Pet Food and Flour in Switzerland. *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 45 (1994), S. 1233-1246.
- [Roc95] Rochat Y., Taillard É.D.: Probabilistic Diversification and Intensification in Local Search for Vehicle Routing. *Journal of Heuristics*, Vol. 1 (1995), S. 147-167.
- [Rös93] Röscher P.: *Rechnergestützte Tourenplanung unter besonderer Berücksichtigung praktischer Restriktionen*. Dissertation, Universität Bremen 1993.
- [Rus79] Russell R.A., Igo W.: An Assignment Routing Problem. *Networks*, Vol. 9 (1979), S. 1-17.
- [Rus91] Russell R.A., Gribbin D.: A Multiphase Approach to the Period Routing Problem. *Networks*, Vol. 21 (1991), S. 747-765.
- [Rya93] Ryan D.M., Hjorring C., Glover F.: Extensions of the Petal Method for Vehicle Routing. *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 44 (1993), S. 289-296.
- [Sal92] Salhi S., Sari M., Saidi D., Touati N.A.C.: Adaption of Some Vehicle Fleet Mix Heuristics. *Omega*, Vol. 20 (1992), S. 653-660.
- [Sal97a] Salhi S., Thangiah S.R., Rahman F.: A Genetic Clustering Method for the Multi-Depot Vehicle Routing Problem. In: Smith G.D., Steele N.C., Nigel C., Albrecht R.F. (Hrsg.): *Artificial Neural Nets and Genetic Algorithms*. Proceedings of the International Conference in Norwich, UK, Springer, Berlin 1997, S. 234-237.
- [Sal97b] Salhi S., Sari M.: A Multi-Level Composite Heuristic for the Multi-Depot Vehicle Fleet Mix Problem. *European Journal of Operational Research*, Vol. 103 (1997), S. 95-112.

- [Sal99] Salhi S., Nagy G.: A Cluster Insertion Heuristic for Single and Multiple Depot Vehicle Routing Problems with Backhauling. *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 50 (1999), S. 1034-1042.
- [Sav86] Savelsbergh M.W.P.: Local Search for Routing Problems with Time Windows. *Annals of Operations Research*, Vol. 4 (1985), S. 285-305.
- [Sav92] Savelsbergh M.W.P.: The Vehicle Routing Problem with Time Windows: Minimizing Route Duration. *ORSA Journal on Computing*, Vol. 4 (1992), S. 146-154.
- [Sch97] Schneider W.G., Mächte A.: Rechnergestützte Tourenplanungssysteme. Forschungsbericht WIOR-503, Institut für Wirtschaftstheorie und Operations Research, Universität Karlsruhe 1997.
- [Sch99] Schneider J.J.: Effiziente parallelisierbare physikalische Optimierungsverfahren. Dissertation, Universität Regensburg 1999.
- [Sch01] Schröder M.: Gebiete optimal aufteilen: OR-Verfahren für die Gebietsaufteilung als Anwendungsfall gleichmäßiger Baumzerlegung. Dissertation, Universität Karlsruhe 2001.
- [Sem92] Semet F., Loewenton I.: The Traveling Salesman Problem under Accessibility Constraints. Rapport ORWP 92/02, Département de Mathématiques, Écoles Polytechnique Fédérale de Lausanne 1992.
- [Sem93] Semet F., Taillard E.: Solving Real-Life Vehicle Routing Problems efficiently using Tabu Search. *Annals of Operations Research*, Vol. 41 (1993), S. 469-488.
- [Sem95] Semet F.: A Two-Phase Algorithm for the Partial Accessibility Constrained Vehicle Routing Problem. *Annals of Operations Research*, Vol. 61 (1995), S. 45-65.
- [Sni02] Snizek J., Bodin L., Levy L., Ball M.: Capacitated Arc Routing Problem with Vehicle-Site Dependencies: The Philadelphia Experience. In: [Tot02a, S. 287-308].
- [Sol87] Solomon M.M.: Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints. *Operations Research*, Vol. 35 (1987), S. 254-265.
- [Ste70] Steckhan H.: Ein ungarischer Subalgorithmus für die Lösung von Hitchcockproblemen. In: Henn R.: *Operations Research-Verfahren*, Vol. 7, Meisenheim am Glan 1970, S. 229-269.

- [Ste97a] Steckhan H.: Gliederzugumlauf innerhalb der Rohmilchanfuhr - eine beschaffungslogistische Fallstudie. Regensburger Diskussionsbeiträge zur Wirtschaftswissenschaft Nr. 295, Universität Regensburg 1997.
- [Ste97b] Steckhan H.: Trimming the Savings Algorithm to Route Heterogeneous Vehicles and to Initiate Tabu Search for Improvement. Regensburger Diskussionsbeiträge zur Wirtschaftswissenschaft Nr. 297, Universität Regensburg 1997.
- [Ste03] Steckhan H.: Gängige Optimierungsmethoden bei Restriktionenvielfalt. Vorlesungsskript, Universität Regensburg 2003. Internet: http://www.wiwi.uni-regensburg.de/steckhan/frameset/index_skript.html, Abruf am 6.9.2003.
- [Stö87] Stöckl J.P., Haisch K.H., Betz J.: Beschaffungslogistik: Technik, Organisation und Planung der Milcherfassung. Freising-Weihenstephan 1987.
- [Stü99] Stützle T.G.: Local Search Algorithms for Combinatorial Problems - Analysis, Improvements, and New Applications. Infix, Sankt Augustin 1999, zgl. Dissertation, Technische Universität Darmstadt 1998.
- [Sum95] Sumichrast R.T., Markham I.S.: A Heuristic and Lower Bound for a Multi-Depot Routing Problem. Computers & Operations Research, Vol. 22 (1995), S. 1047-1056.
- [Tai93] Taillard É.D.: Parallel Iterative Search Methods for Vehicle Routing Problems. Networks, Vol. 23 (1993), S. 661-673.
- [Tai96a] Taillard É.D.: Heuristic Column Generation Method for the Heterogeneous Fleet VRP. Publikation CRT-96-03, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal 1996, zgl. RAIRO Operations Research, Vol. 33 (1999), S. 1-14.
- [Tai96b] Taillard É.D., Laporte G., Gendreau M.: Vehicle Routing with Multiple Use of Vehicles. Journal of the Operational Research Society, Vol. 47 (1996), S. 1065-1070.
- [Tai97] Taillard É.D., Badeau P., Gendreau M., Guertin F., Potvin J.-Y.: A Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows. Transportation Science, Vol. 31 (1997), S. 170-186.
- [Tai01] Taillard É.D., Gambardella L.-M., Gendreau M., Potvin J.-Y.: Adaptive Memory Programming: A Unified View of Metaheuristics. European Journal of Operational Research, Vol. 135 (2001), S. 1-16.

- [Tai02] Taillard É.D., Voß S.: POPMUSIC - Partial Optimization Metaheuristic Under Special Intensification Conditions. In: [Rib02, S. 613-629].
- [Tai03] Taillard É.D.: Heuristic Methods for Large Centroid Clustering Problems. *Journal of Heuristics*, Vol. 9 (2003), S. 51-73.
- [Tan84] Tan C.C.R., Beasley J.E.: A Heuristic Algorithm for the Period Vehicle Routing Problem. *Omega*, Vol. 12 (1984), S. 497-504.
- [Tan03] Tansini L., Urquhart M., Viera O.: Comparing Assignment Algorithms for the Multi-Depot VRP. Internet: <http://www.fing.edu.uy/inco/pedeciba/bibliote/reptec/TR0108.pdf>, Abruf am 3.10.2003.
- [Tar02a] Tarantilis C.D., Kiranoudis C.T.: Distribution of Fresh Meat. *Journal of Food Engineering*, Vol. 51 (2002), S. 85-91.
- [Tar02b] Tarantilis C.D., Kiranoudis C.T.: BoneRoute: An Adaptive Memory-Based Method for Effective Fleet Management. *Annals of Operations Research*, Vol. 115 (2002), S. 227-241.
- [Tar04a] Tarantilis C.D., Kiranoudis C.T., Vassiliadis V.S.: A Threshold Accepting Metaheuristic for the Heterogeneous Fixed Fleet Vehicle Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, Vol. 152 (2004), S. 148-158.
- [Tar04b] Tarantilis C.D., Diakoulaki D., Kiranoudis C.T.: Combination of Geographical Information System and Efficient Routing Algorithms for Real Life Distribution Operations. *European Journal of Operational Research*, Vol. 152 (2004), S. 437-453.
- [Tei04] Teixeira J., Antunes A.P., de Sousa J.P.: Recyclable Waste Collection Planning - A Case Study. Erscheint in *European Journal of Operational Research*, voraussichtlich 2004.
- [Tha01] Thangiah S.R., Salhi S.: Genetic Clustering: An Adaptive Heuristic for the Multidepot Vehicle Routing Problem. *Applied Artificial Intelligence*, Vol. 15 (2001), S. 361-383.
- [Til69] Tillman F.A.: The Multiple Terminal Delivery Problem with Probabilistic Demands. *Transportation Science*, Vol. 3 (1969), S. 192-204.
- [Til71] Tillman F.A., Hering R.W.: A Study of a Look-Ahead Procedure for Solving the Multiterminal Delivery Problem. *Transportation Research*, Vol. 5 (1971), S. 225-229.

- [Til72] Tillman F.A., Cain T.M.: An Upperbound Algorithm for the Single and Multiple Terminal Delivery Problem. *Management Science*, Vol. 18 (1972), S. 664-682.
- [Tot98a] Toth P., Vigo D.: Exact Solution of the Vehicle Routing Problem. In: [Cra98, S. 1-31].
- [Tot98b] Toth P., Vigo D.: The Granular Tabu Search (and its Application to the Vehicle-Routing Problem). Arbeitspapier OR/98/9, Dipartimento di Elettronica, Informatica e Sistemistica (DEIS), Università di Bologna 1998.
- [Tot02a] Toth P., Vigo D. (Hrsg.): The Vehicle Routing Problem. *SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications*, Philadelphia 2002.
- [Tot02b] Toth P., Vigo D.: An Overview of Vehicle Routing Problems. In: [Tot02a, S. 1-26].
- [Tot02c] Toth P., Vigo D.: VRP with Backhauls. In: [Tot02a, S. 195-224].
- [Tot02d] Toth P., Vigo D.: Branch-and-Bound Algorithms for the Capacitated VRP. In: [Tot02a, S. 29-51].
- [Tot04a] Toth P., Vigo D.: The Granular Tabu Search and its Application to the Vehicle-Routing Problem. Erscheint in *INFORMS Journal on Computing*, voraussichtlich 2004.
- [Tot04b] Toth P., Vigo D.: Models, Relaxations and Exact Approaches for the Capacitated Vehicle Routing Problem. Erscheint in *Discrete Applied Mathematics*, voraussichtlich 2004.
- [Tun00] Tung D.V., Pinnoi A.: Vehicle Routing-Scheduling for Waste Collection in Hanoi. *European Journal of Operational Research*, Vol. 125 (2000), S. 449-468.
- [Tuz99] Tuzun D., Burke L.I.: A Two-Phase Tabu Search Approach to the Location Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, Vol. 116 (1999), S. 87-99.
- [Vig96] Vigo D.: A Heuristic Algorithm for the Asymmetric Capacitated Vehicle Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, Vol. 89 (1996), S. 108-126.
- [Vol83] Volgenant A., Jonker R.: The Symmetric Traveling Salesman Problem and Edge Exchanges in Minimal 1-Trees. *European Journal of Operational Research*, Vol. 12 (1983), S. 394-403.

- [Voß99] Voß S., Martello S., Osman I.H., Roucairol C. (Hrsg.): Meta-Heuristics: Advances and Trends in Local Search Paradigms for Optimization. Kluwer, Boston 1999.
- [Vou03] Voudouris C., Tsang E.P.K.: Guided Local Search. In: [Glo03a, S. 185-218].
- [War94] Wark P., Holdt J.: A Repeated Matching Heuristic for the Vehicle Routing Problem. Journal of the Operational Research Society, Vol. 45 (1994), S. 1156-1167.
- [Was02] Wassan N.H., Osman I.H.: Tabu Search Variants for the Mix Fleet Vehicle Routing Problem. Journal of the Operational Research Society, Vol. 53 (2002), S. 768-782.
- [Weu83] Weuthen H.-K.: Tourenplanung - Lösungsverfahren für Mehrdepotprobleme. Dissertation, Universität Karlsruhe 1983.
- [Woo93] Woodruff D.L., Zemel E.: Hashing Vectors for Tabu Search. Annals of Operations Research, Vol. 41 (1993), S. 123-137.
- [Wre71] Wren A.: Computers in Transport Planning and Operation. Ian Allan, London 1971.
- [Wre72] Wren A., Holliday A.: Computer Scheduling of Vehicles from One or More Depots to a Number of Delivery Points. Operational Research Quarterly, Vol. 23 (1972), S. 333-344.
- [Xu96] Xu J., Kelly J.P.: A Network Flow-Based Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem. Transportation Science, Vol. 30 (1996), S. 379-393.
- [Xu98] Xu J., Chiu S.Y., Glover F.: Fine-Tuning a Tabu Search Algorithm with Statistical Tests. International Transactions in Operational Research, Vol. 5 (1998), S. 233-244.
- [Yan00] Yang W.-T., Chu L.-C.: A Heuristic Algorithm for the Multi-Depot Periodic Vehicle Routing Problem. Journal of Information & Optimization Sciences, Vol. 21 (2000), S. 359-367.
- [Yel70] Yellow P.: A Computational Modification to the Savings Method of Vehicle Scheduling. Operational Research Quarterly, Vol. 21 (1970), S. 281-283.
- [Zim97] Zimmermann W.: Operations Research: Quantitative Methoden zur Entscheidungsvorbereitung. 8. Aufl., Oldenbourg, München 1997.