

**Beitrag zum Einsatz von Forecast - Methoden zur
Modellierung dynamischer Location-Routing Probleme
mit stochastischer Nachfrage**

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften,
Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik der
Universität Duisburg-Essen
zur Erlangung des akademischen Grades

eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Alexander Goudz

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Bernd Noche
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Frank Lobeck

Tag der mündlichen Prüfung: 17. Juni 2015

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	VIII
Abkürzungsverzeichnis	X
Symbol- und Variablenverzeichnis	XIII
1 Einleitung und Aufbau der Arbeit	1
2 Zielsetzung und Motivation	4
2.1 Gegenwärtige Situation von Unternehmen in der Logistik und die daraus resultierende Problemstellung	4
3 Theoretische Grundlagen	7
3.1 Klassische Standortplanung	7
3.1.1 Die Standortplanung	7
3.1.2 Facility-Location Problem	8
3.1.3 Bewertung von Alternativen	8
3.2 Tourenplanung (Vehicle-Routing Problem)	9
3.2.1 Definition	9
3.2.2 Abgrenzung	9
3.3 Kombinierte Standort-Tourenplanung	10
3.3.1 Definition	12
3.3.2 Überblick und Einordnung	14
4 Mathematische Modellierung	17
4.1 Standortplanung	17
4.1.1 Wichtige Ausprägungen des FLP	17
4.1.2 Das Modell: Multi-Depot-Facility-Location Problem	17
4.2 Das Modell: Multi-Depot-Vehicle-Routing Problem	19

4.3	Das Modell: LRP	21
5	Periodisches Location-Routing Problem (PLRP)	24
5.1	Perioden in der Optimierung	24
5.2	Eine iterative Metaheuristik für das PLRP von Prodhon	25
5.2.1	Ausgangslage und Restriktionen des PLRP	26
5.2.2	Vorgehensweise zur Lösung eines PLRP	26
6	Instanzen für neue Problemklassen	29
6.1	Definition und Abgrenzung	29
6.1.1	Andere Formen des PLRP	31
6.1.2	Periodic-Location-Routing Problem vs. Dynamic-Location-Routing Problem	32
6.2	Instanzen erstellen	33
6.2.1	Modifizieren von bestehenden Instanzen	33
6.2.2	Eine PVRP Instanz	34
6.2.3	Eine LRP Instanz	35
6.3	Instanzen generieren	36
6.3.1	Exogene Variablen	37
6.3.2	Endogene Variablen	37
6.3.3	Erzeugte Beispielinstantz	41
6.4	Stochastische Nachfrage bzw. Einflussgrößen	42
6.4.1	Trendförmige Nachfrage	42
6.4.2	Saisonale Nachfrage	43
6.4.3	Schwankende bzw. zufällige Nachfrage	43
7	Generierung von Probleminstanzen	45
7.1	Methoden der Zeitreihenanalyse im Kontext der Bedarfsprognose	45
7.2	Verfahren der exponentiellen Glättung	46
7.3	ARIMA-Verfahren	47
7.4	Prognosegenauigkeit und Flexibilität	48
7.5	Implementierungsaufwand	48
7.6	Excel-Tool zur Erstellung automatischer Prognosen anhand exponentieller Glättungsmethoden	49
7.7	Methoden zur Informationserstellung	49
7.7.1	Kundenbedarfszeitreihen	49
7.7.2	Generierung von Zeitreihen nach der erweiterten Pegelklassifikation	51
7.7.3	Zeitreihenmodelle und Glättungsparameter	54

7.8	Erstellen einer Instanz	56
7.9	Programm zum Erstellen von synthetischen Zeitreihen	57
7.9.1	Verwendete Programmiersprache und Bibliotheken	57
7.9.2	Unterschied zwischen dem Makro und neuem Programm	59
7.10	Beginnen der Arbeit	59
7.10.1	Eingabedateien	60
7.10.2	Generierte Instanzen	63
8	Optimierungstool AdL(e)R[©]	64
8.1	Metaheuristiken	64
8.2	Genetischer Algorithmus	65
8.3	Gruppenorientiertes genetisches Kodieren (GGA)	68
8.4	Genetische Operatoren	69
8.5	Einfüge - Heuristik	71
8.6	Konstruktions- und Einfüge- Heuristiken	71
8.6.1	Konstruktionsheuristiken	71
8.6.2	Einfüge - Heuristiken	72
8.6.3	Basic Greedy - Heuristik	72
8.6.4	Regret - Heuristik	73
9	Vergleich sukzessive Standortplanung (LAP) und Tourenplanung (VRP) mit kombinierter Standort-Tourenplanung (LRP)	75
9.1	Restriktionen und Regeln	75
9.2	Parameter	76
9.3	Sukzessive vs. Kombinierte Planung	77
9.4	Erstellen von Instanzen	77
9.4.1	Excel-Tool zur Erstellung von Instanzen	77
9.4.2	Initial-Instanzen	78
9.5	Ergänzung der Prodhon-Instanzen	80
9.6	Auswertung aller Durchläufe	81
10	Modelle des LRP mit variablen Standortentscheidungen	85
10.1	Typisierung der Modellvarianten	85
10.2	Differenzierung der einzelnen Modellvarianten	86
10.3	Statisches LRP mit einmaliger Konfiguration der Standorte	91
10.4	Dynamische Modelle mit variablen Standortentscheidungen	95

10.4.1	Dynamisch-deterministisches LRP mit periodischer Konfiguration der Standorte	95
10.4.2	Dynamisch-deterministisches LRP mit einmaliger Konfiguration der Standorte	104
10.4.3	Dynamisch-stochastisches LRP mit periodischer Konfiguration der Standorte	108
11	Strafkostenberechnung	117
11.1	Problemstellung	117
11.2	Ergebnisse der Optimierung	118
11.3	Strafen Typ 1: Verletzung der Depotkapazität	118
11.4	Strafen Typ 2: Verletzung der Fahrzeugkapazität	119
11.5	Strafkosten einer Instanz	120
11.6	Berechnung und Ergebnisse	120
12	Analyse der generierten Instanzen	124
12.1	Analyse anhand verschiedener Metriken	124
12.2	Analyse der Ergebnisse nach der Optimierung	125
12.3	Strafkostensätze	127
12.4	Zusammenfassung	128
13	Modellierung der unteren Schranken zur Bestimmung der Güte von heuristischen Lösungen von LRP-Modellen	132
13.1	Allgemeines	132
13.2	Untere Schranken für das klassische, kapazitierte LRP in der Literatur	135
13.2.1	Untere Schranke 1 (Lower Bound 1) - Dekomposition des LRP in TSP und KP	135
13.2.2	Untere Schranke 2 (Lower Bound 2) - Zeilengenerierungsverfahren	137
13.2.3	Untere Schranke 3 (Lower Bound 3) - Branch-and-Cut-Verfahren	138
13.3	Untere Schranken, die im Rahmen der Forschungsarbeit ermittelt wurden	139
13.3.1	Untere Schranke nach Albareda-Sambola (LB A)	139
13.3.2	Dekomposition - Lower Bound	144
13.3.3	Untere Schranken nach Zeilengenerierungsverfahren (LB B)	146
13.4	Untere Schranken für die Varianten des dynamischen kapazitierten LRP	155
13.4.1	Periodische Standort- und Tourenentscheidung bei isolierter Periodenbetrachtung	155
13.4.2	Einmalige Standortentscheidung zu Beginn des Planungshorizonts unter Kenntnis der Nachfrage aller Perioden	158

13.4.3	Periodische Standortentscheidung zu Beginn jeder Periode unter Kenntnis der Nachfrage aller Perioden des gesamten Planungshorizonts	160
14	Methodenvergleich im dynamischen LRP: Forecast-Gesamtoptimierung vs. Vorperiodische Optimierung vs. Optimierung mit realen Bedarfen	164
14.1	Forecast vs. Vorperiode	164
14.2	Parametrierung von AdL(e)R [©]	168
14.3	LRP-Modellenvergleich anhand von Szenarien	170
14.4	Auswertung der Ergebnisse	176
15	Fazit und Vorschläge für weitere Forschungsarbeiten	179
	Literaturverzeichnis	184
	Anhang	A-1
A		A-1
A.1	Eingabemaske Excel - Tool (Eigene Darstellung)	A-1
A.2	Modell - Instanzen von Caroline Prodhon (Eigene Darstellung)	A-2
A.3	Ergebnisse aller Instanzen Vergleich LRP vs. LAP und VRP	A-8
A.4	Gesamtauswertung Paarvergleich	A-13
A.5	Ergebnisse Optimierungsstudie dynamische LRP Modelle	A-14
A.5.1	Allgemein	A-14
A.5.2	Nach Cluster	A-16
A.5.3	Nach Depots	A-18
A.5.4	Nach Kunden	A-20
A.5.5	Nach Fahrzeugkapazität	A-22
A.5.6	Nach Zeitreihen	A-24
A.5.7	Vergleich nach Kunden, Depots und Fahrzeugkapazität	A-26
A.5.8	Vergleich alle Fälle	A-29

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1:	Sukzessivplanung (li) vs. Simultanplanung (re) in Anlehnung an Engele (1980)	11
Abb. 3.2:	Abgrenzende Gegenüberstellung von LRP und VRP (Quelle: in Anlehnung an Ahn (2008)	14
Abb. 6.1:	Trendförmige Nachfrage (Eigene Abbildung)	42
Abb. 6.2:	Saisonale Nachfrage (Eigene Abbildung)	43
Abb. 6.3:	Schwankende Nachfrage (Eigene Abbildung)	44
Abb. 6.4:	Dichtefunktion der Wahrscheinlichkeitsverteilung (Eigene Abbildung) . .	44
Abb. 7.1:	KK-Modell ($l_t = 100, \alpha = 0$) (in Anlehnung an Hyndman)	53
Abb. 7.2:	KK-Modell ($l_t = 100, \alpha = 2$) (in Anlehnung an Hyndman)	53
Abb. 7.3:	Eingabe der Fehlerkomponente (Eigene Darstellung)	54
Abb. 7.4:	Eingabe der Glättungsparameter im Tabellenblatt „Zeitreihenerstellung“ (Eigene Darstellung)	55
Abb. 7.5:	Struktur einer Instanz in XML-Datei (Eigene Darstellung)	61
Abb. 8.1:	Klassifizierung Metaheuristiken (Eigene Darstellung)	65
Abb. 8.2:	Genotyp, Phänotyp und Fitness in der Natur und im GA	66
Abb. 8.3:	Schematischer Ablauf des Genetischen Algorithmus (Eigene Darstellung)	68
Abb. 8.4:	Gruppenorientiertes Kodieren - in Anlehnung an Pankratz (2005)	69
Abb. 8.5:	Der gruppenorientierte Crossover - Operator - in Anlehnung an Pankratz (2005)	70
Abb. 9.1:	Grafische Darstellung einer Instanz (20-5-1b)(Eigene Darstellung)	79
Abb. 9.2:	Erläuterung der Instanz-Dateien	80
Abb. 9.3:	Verteilung von Depots und Kunden (Eigene Darstellung)	81
Abb. 10.1:	Klassifizierung von Modellvarianten (Eigene Darstellung)	86
Abb. 10.2:	Dynamisch-deterministisches LRP mit einperiodischer Informationsnutzung	87
Abb. 10.3:	Dynamisch-deterministisches LRP mit mehrperiodischer Informationsnutzung	87
Abb. 10.4:	Dynamisch-deterministisches LRP mit einmaliger Standortkonfiguration .	88

Abb. 10.5: Dynamisch-stochastisches LRP mit periodischer Standortkonfiguration . . .	89
Abb. 10.6: Dynamisch-stochastisches LRP mit einmaliger Standortkonfiguration . . .	89
Abb. 11.1: Typ 2-Strafkurve	119
Abb. 13.1: Ähnlichkeit in der Routingstruktur	136
Abb. 13.2: Instanzspezifischer Verlauf des GAP-Werts für LB A (in blau) und für die LB nach Belenguer et al. (in grau) (Eigene Darstellung)	144
Abb. 13.3: Graph mit einem Depot und 20 Kundenknoten (Eigene Darstellung) . . .	145
Abb. 13.4: Graph nach optimaler Lösung des TSP (Eigene Darstellung)	146
Abb. 13.5: Graph nach optimaler Lösung des VRP (Eigene Darstellung)	146
Abb. 13.6: Instanzspezifischer Verlauf des GAP - Werts für LB B1 (in grün), LB B2 (in blau) und für die LB nach Belenguer et al. (in grau)	155

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1:	Klassifikation von LRPs (in Anlehnung an Min et al. (1998))	13
Tab. 6.1:	Mögliche Lieferungskombinationen	32
Tab. 6.2:	Auszug einer PVRP Instanz (Eigene Abbildung)	35
Tab. 6.3:	Auszug einer LRP Instanz Christofides69-50x5-Dept (Eigene Abbildung)	35
Tab. 6.4:	Auszug einer PLRP Instanz (Eigene Abbildung)	36
Tab. 6.5:	Nachfragematrix, Kunden x Perioden (Eigene Abbildung)	40
Tab. 6.6:	Beispiel einer generierten Instanz	41
Tab. 7.1:	Zeitreihenklassifizierung in Anlehnung an Hyndman	50
Tab. 7.2:	Prognosefunktionen der Modellklassen	52
Tab. 7.3:	Zeitreihenmodelle (in Anlehnung an Hyndman)	62
Tab. 9.1:	Namensunterteilung der Instanzen von Caroline Prodhon	79
Tab. 9.2:	Paarvergleich LRP/VRP vs. FLP + VRP	82
Tab. 9.3:	Paarvergleich LRP/VRP vs. LRP	82
Tab. 9.4:	Paarvergleich LRP vs. FLP + VRP	83
Tab. 10.1:	Ausprägungskonstellationen der binären Betriebszustandsvariablen am Beispiel der Depotschließung (Eigene Darstellung)	100
Tab. 10.2:	Zusammenfassung der LRP-Modelle (Eigene Darstellung)	114
Tab. 10.3:	Legende zu LRP	116
Tab. 11.1:	Ergebnisse der Strafkostenberechnung	121
Tab. 12.1:	Beispiel zur Bestimmung von SKS	128
Tab. 12.2:	Ergebnisse für Instanzen (Anzahl der Kunden - Anzahl der Depots - Fix- kosten für die Nutzung des Fahrzeugs) 20-5-1000, 50-5-1000, 100-5- 1000, 100-10-1000, 200-10-1000	130
Tab. 12.3:	Ergebnisse für Instanzen (Anzahl der Kunden - Anzahl der Depots - Fix- kosten für die Nutzung des Fahrzeugs) 20-5-1000, 50-5-1000, 100-5- 1000, 100-10-1000, 200-10-1000	131
Tab. 13.1:	Rechnendauer und Qualität einer unteren Schranke	137

Tab. 13.2:	Rechenzeit für die Bestimmung einer LB mit dem ZG-Verfahren	138
Tab. 13.3:	Rechenstudie zur LB A	143
Tab. 13.4:	Instanzspezifische durchschnittliche GAP-Werte für LB A	144
Tab. 13.5:	Rechenstudie zur LB B1	149
Tab. 13.6:	Rechenstudie zur LB B2	153
Tab. 13.7:	Instanztypspezifische durchschnittliche prozentuale GAP-Werte	154
Tab. 13.8:	Instanztypspezifische durchschnittliche GAP-Werte für LB B1 und LB B2	154
Tab. 13.9:	Änderung der Kostenarten für jedes einzelne Depot	158
Tab. 13.10:	Ausprägungskonstellationen der binären Betriebszustandsvariable am Beispiel der Depotschließung	162
Tab. 14.1:	Periodenweise Nachfragen- und Liefermengenverläufe Fall 1	166
Tab. 14.2:	Periodenweise Nachfragen- und Liefermengenverläufe Fall 2	166

Abkürzungsverzeichnis

AdL(e)R[©]	Advanced Location Routing
aGV	absolute Gesamtverbesserung
AMPL	A Mathematical Programming Language
ARIMA	Autoregressive integrated moving average
ARMA	Autoregressive Moving Average
ATSP	Asymmetrisches TSP
AZ	Abnehmerzentren
CLRP	Capacitated Location Routing Problem
DK	Depotkosten
DLRP	Dynamic Location Routing Problem
ELS	Evolutionary Local Search
ETS	Error-Trend-Seasonal or Exponential Smoothing
FLP	Facility Location Problem
FTL	Full Truck Load
GA	Genetic Algorithm
GAP	Gibt an, um wieviel die gefundene heuristische Lösung maximal schlechter ist als die (unbekannte) exakte Lösung
GE	Geldeinheiten
GGA	Grouping Genetic Algorithm
GK	Gesamtkosten

GRASP	Greedy Randomized Adaptive Search Procedure
GTS	Granular Tabu Search
GV	Gesamtverbesserung
KP	Knapsackproblem
LAP	Location Allocation Problem
LB	Lower Bound
LGRTS	Lagrangean Granular Relaxation Tabu Search
LR	Lagrangean Relaxation
LRP	Location Routing Problem
LS	Local Search
ME	Mengeneinheiten
MDFLP	Multi Depot Facility Location Problem
MDVRP	Multi Depot Vehicle Routing Problem
NP	nondeterministic polynomial time
PLRP	Periodic Location Routing Problem
PVRP	Periodic Vehicle Routing Problem
RECWA	Randomized Extended Clarke and Wright Algorithm
RT	Routenkosten
SKS	Strafkostensatz
St	Strafen
TSP	Travelling Salesman Problem
UB	Upper Bound
VBA	Visual Basic for Applications
VRP	Vehicle Routing Problem
WLP	Warehouse Location Problem

ZG Zeilengenerierung

Symbol- und Variablenverzeichnis

V	Menge aller Knoten, d.h. eine Vereinigung aus der Menge aller Depots I und der Menge sämtlicher Kunden J , $V = I \cup J$
I	Anzahl der potentiellen Standorte (Depots), ($i = 1, 2, \dots, I$)
J	Anzahl der möglichen Abnehmerzentren (Kunden), ($j = 1, 2, \dots, J$)
S	Teilmenge der Menge aller Kunden, $S \subseteq J$
$r(S)$	Minimale Anzahl der Fahrzeuge, um die alle Kunden in S zu beliefern
H	Planungshorizont, beinhaltet die Perioden $t = 1, \dots, H $
K	Anzahl der zur Verfügung stehenden Fahrzeuge, ($k = 1, 2, \dots, K$)
F	Fixkosten für die Nutzung des Fahrzeugs k
Q	Fahrzeugkapazität
O_i	Kosten der Eröffnung des Depots i
U_i	Fixkosten für den Betrieb des Depots i
C_i	Kosten der Schließung des Depots i
y_{i0}	Geschlossener Ausgangszustand sämtlicher Depots i
b_i	Produktionskapazität des Standorts i
W_i	Kapazität des Depots i
f_i	Fixkosten am Standort i
v_i	Anzahl der Touren, die in i starten
d_j	Nachfrage des Kunden j (Bedarfsmenge des Abnehmerzentrums j)
d_{jt}	Nachfrage des Kunden j in Periode t
c_{ij}	Transportkosten zwischen den Knoten i und j

Binäre Variablen

γ_i	Errichtung der Produktionsstätte (Depots) am Standort i
w_i	Eröffnung des Depots i
w_{it}	Eröffnung des Depots i in Periode t
y_i	Benutzung des Depots i
y_{it}	Benutzung des Depots i in Periode t
z_i	Schließung des Depots i
z_{it}	Schließung des Depots i in Periode t
f_{ij}	Zuordnung des Kunde j zu dem Depot i
f_{ijt}	Zuordnung des Kunde j zu dem Depot i in Periode t
x_{ij}	Befahren der Strecke von i zu j
x_{ijk}	Benutzung des Fahrzeugs k auf der Strecke von i zu j
x_{ijkt}	Benutzung des Fahrzeugs k auf der Strecke von i zu j in Periode t
$Normal(\mu, \sigma)$	Normalverteilung mit dem Mittelwert μ und der Standardabweichung σ
μ	Mittelwert der Nachfrage
σ	Standardabweichung der Nachfrage
t	Periode t des Planungshorizonts H
$cost_t$	Gesamtkosten einer Periode t
$cost_H$	Gesamtkosten, die im Planungshorizont H anfallen
δ	Veränderungsfaktor bzw. Veränderungssummand
c_j^{var}	Variable Umschlagskosten am Depot j [GE/ME]
$c_{g_1 g_2}^{ka}$	Fahrkosten bei Benutzung der Strecke $g_1 - g_2$ [GE]

$x_{g_1 g_2 r}^{zkar}$	Verwendung der Strecke $g_1 - g_2$ auf der Route r
x_{ij}^{zkv}	Zuordnung von Kunde i zu Depot j
q_i^k	Nachfrage von Kunde i [ME]
$x_{g_1 r}^{zknr}$	Zuordnung von Knoten g zur Route r
k_r^r	Fahrzeugkapazität auf einer Route r [ME]
d^{max}	Maximale Fahrleistung eines Auslieferungsfahrzeugs [EE]
K_M	Genügend große Zahl, $K_M \geq d^{max}$
D_g	Kumulierte Distanz bis zum Knoten g [EE]
k_j^v	Umschlagskapazität von Depot j [ME]
U	Menge der noch nicht eingeplanten Nachfragen
K	Menge der Touren
$\Delta f_{i,k}$	Veränderung des Zielfunktionswertes beim Einfügen von Nachfrage i in Tour k
$\Delta f_{i,x_i,j}$	Kosten für das Einfügen von Nachfrage i an ihre j -beste Position

Kapitel 1

Einleitung und Aufbau der Arbeit

Die Logistikbranche ist mit 2,75 Millionen Angestellten und einem Umsatz von rund 223 Milliarden Euro eine der größten Wirtschaftsbranchen in Deutschland¹. Die Anforderungen an die Logistik steigen stetig. So werden jährlich 52 Tonnen Güter für jeden Bundesbürger logistisch bearbeitet und transportiert². Gleichzeitig sinkt der Anteil der Logistikkosten an den Gesamtkosten in Handel und Industrie³. Außerdem wird die Warenverteilung immer schneller, z. B. durch Lieferungen beim Onlinekauf bereits am nächsten Tag, und die Zeitpunkte, wie z. B. bei Just-In-Time-Lieferungen⁴, präziser. Zusammenfassend: Viele Waren sollen kostengünstig und schnell an den Kunden geliefert werden.

In Deutschland gibt es 2,1 Millionen LKW⁵, welche im Jahre 2011 etwa 72 Prozent des gesamten Güterverkehrs durchgeführt haben⁶. Mit Hilfe von Heuristiken und computergestützten Berechnungen können die optimalen Standorte und Routen der Fahrzeuge gefunden werden. Darüber hinaus hat in den letzten Jahren die Geschwindigkeit in der Kommunikation durch den Einsatz von Mobiltelefonen und Internetverbindungen enorm zugenommen. Verbraucher, aber auch zunehmend die Industrieunternehmen, übertragen ihre Erfahrungen aus der schnellen Informationsübertragung auf ihre Anforderungen hinsichtlich einer (fast) ebenso schnellen Güterverteilung. Die Ansprüche an schnelle Verteilsysteme (z. B. Online-Kauf mit Lieferung am kommenden Tag) erzeugen höhere Kosten in Unternehmen und nehmen auch als Wettbewerbsvorteil einen immer größeren Stellenwert ein. Das Ziel des Managements ist es deshalb, die Senkung von Kosten durch die Auslegung von effektiven und effizienten Vertriebssystemen und Netzwerken zu gewährleisten. Damit

¹Vgl. <http://de.statista.com/themen/733/transport-und-logistik/#chapter2> [101]

²Vgl. Vahrenkamp R. et al. (2007): S.2 [94]

³<http://de.statista.com/statistik/daten/studie/6346/umfrage/anteil-der-logistikkosten-an-den-gesamtkosten> [102]

⁴Vgl. Schulte G. (2001): S.342 [83]

⁵Vgl. Vahrenkamp R. et al. (2007): S.2 [94]

⁶<http://de.statista.com/statistik/daten/studie/12195/umfrage/anteil-der-lkw-am-gueterverkehr-in-deutschland/> [103]

gelangen Standort- und/oder Tourenplanung zunehmend in den Fokus des Interesses.

Die Optimierung von Standorten und Touren ist in vielen Fällen aber voneinander inhaltlich abhängig, da zum Beispiel bei der Warenverteilung die Transportkosten von dem Standort des Logistikzentrums, also dem Start- und Endpunkt der Tour, abhängen und dadurch ein Einfluss auf die Lösung des jeweils anderen Problems entsteht.

Hier setzt die Theorie der kombinierten Standort-Tourenplanung an, bei der gleichzeitig durch die Kombination von möglichen Standorten und möglichen Touren das Optimum gesucht wird. In der englischsprachigen Literatur wird dieser Modellansatz als **Location-Routing- Problem (LRP)** bezeichnet und dem Forschungsbereich des Operations Research zugeordnet, in wissenschaftlichen Untersuchungen aber verhältnismäßig wenig behandelt. Die Grundidee ist, dass eine durchgehende, gleichzeitige Betrachtung zu niedrigeren Kosten führt, als bei einer schrittweisen Einzelbetrachtung. Im nächsten Kapitel wird dieser Ansatz aus der gegenwärtigen Situation der Logistikunternehmen vertieft und die daraus resultierende Problemstellung erläutert.

Das 3. Kapitel befasst sich mit der theoretischen Grundlagen der klassischen Standort- (FLP), der Touren (VRP)- und der kombinierten Standort-Tourenplanung (LRP). Nach einem Überblick und allgemeinen Herangehensweise werden im vierten Kapitel für die erläuterten Planungsprobleme die bereits existierenden mathematischen Modelle aufgezeigt.

Als eine strategische Erweiterung eines LRP ist die Berücksichtigung mehrerer Planungsperioden zu verstehen, welche das PLRP (das *Periodische-Location-Routing-Problem*) darstellt. Dieser Ansatz und die Unterschiede zu statischer Problemstellung werden im Kapitel 5 genauer erklärt.

Zur Modellierung kombinatorischer Optimierungsprobleme werden sog. Probleminstanzen verwendet. Instanzen werden dabei hauptsächlich dazu genutzt, die Algorithmen, Heuristiken und diverse Lösungsansätze zu testen und zu überprüfen. Bei den neuen, wie PLRP, Problemklassen existieren noch nicht genug Instanzbibliotheken, dass man diese ohne Weiteres für neue wissenschaftliche Ansätze übertragen kann. Kapitel 6 verschafft zu Beginn den Überblick über existierende Instanzen und zeigt, wie neue Probleminstanzen für deterministische und stochastische Nachfragen generiert werden können. Kapitel 7 zeigt auf, wie die Instanzen mit stochastischer Nachfrage mithilfe des Excel-Programms zum Erstellen von synthetischen Zeitreihen generiert werden.

Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit liegt in der Untersuchung der dynamischen Location-Routing Problemen mit stochastischen, prognosebezogenen Nachfragen. Zu diesem Zweck wurde eigens für diese Arbeit das Tool zur Modellierung und Optimierung von dynamischen LRPs namens **AdL(e)R[©]** (Advanced Location Routing) entwickelt. Seine Funktionsweise basierend auf dem Einsatz genetischer Algorithmen wird im Kapitel 8 näher erläutert.

Bevor im weiteren Verlauf der Arbeit die dynamischen Modelle des LRP erläutert werden, zeigt das 9. Kapitel die Vorteile einer kombinierten Standort-Tourenplanung (LRP) gegenüber einer sukzessiven Standortplanung (LAP) und Tourenplanung (VRP) auf.

Im Kapitel 10 wird erstmalig PLRP modelliert und deren mathematische Formulierung aufgezeigt.

Während sich Kapitel 11 mit der Entwicklung der Berechnungsfunktion der Strafkosten bei unterschätzten Nachfragemengen beschäftigt, werden im Kapitel 12 die generierten Probleminstanzen mit Strafkostensätzen analysiert.

Kapitel 13 befasst sich mit der Modellierung der unteren Grenzen zur Beurteilung der Güte von heuristischen Lösungen für die dynamischen kapazitierten LRP.

Im Kapitel 14 werden anhand von Szenarien die zuvor erläuterten Modelle des dynamischen LRP mittels Optimierungstools **AdL(e)R**[©] ausgewertet. Dabei werden die Forecast-Gesamtoptimierung und Vorperiodische Optimierung miteinander verglichen. Im Anschluss erfolgt dann die Gegenüberstellung der beiden Methoden mit den LRP-Modellen mit realen Nachfragen.

Die Arbeit wird mit einem Fazit zu erreichten Ergebnissen und einem Ausblick auf künftige Forschungsrichtungen im Zusammenhang mit dynamischen LRP abgeschlossen.

Kapitel 2

Zielsetzung und Motivation

2.1 Gegenwärtige Situation von Unternehmen in der Logistik und die daraus resultierende Problemstellung

Die Anforderungen an Unternehmen in der Logistikbranche haben sich in den letzten Jahren sehr verschärft. Die Lagerkapazitäten werden stets sehr gering gehalten und die Just-in-Time Belieferung ist zum Standard geworden. Während durch die zunehmende Globalisierung die Transporte von Gütern rund um den Globus immer weiter zunehmen, werden die Lagerbestände an den Standorten stets sehr gering gehalten, um bei dem enormen Kostendruck im internationalen Vergleich wettbewerbsfähig zu bleiben. Gerade Deutschland als Exportnation ist dabei stark von den Aufträgen aus dem Ausland abhängig. So kann es passieren, dass in einem Monat ein Großauftrag eingeht und die Lagerumschlagskapazität rasant zunimmt, während zu anderen Zeiten die Beschäftigungsauslastung geringer ausfällt und dadurch auch die Nachfrage des Kunden wesentlich sinkt. Logistikunternehmen sehen sich demnach aktuell hauptsächlich zwei Trends gegenüber: Zum einen ist das die schwankende Kundennachfrage und zum anderen das Just-in-Time Prinzip der Zulieferungskette. Diese beiden Entwicklungen, integriert betrachtet, sind für Logistikunternehmen eine echte Herausforderung. Wenn Unternehmen die Transporte erst dann verschicken würden, wenn sie die Kundennachfrage genau kennen, so werden sie durch die benötigten Transportzeiten nicht dem Just-in-Time Prinzip gerecht werden. Wenn aber im Gegenzug die Transporte rechtzeitig verschickt würden, entsteht wiederum ein Problem durch die schwankende Nachfrage der Kunden. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, müssen Logistikfirmen ihre Kunden selbst auch dann beliefern können, wenn sie ihre genauen Nachfragewerte nicht kennen. Es ist demzufolge unabdingbar, die Nachfrage richtig abschätzen zu können.

Lösungsansätze für Standort- und Tourenprobleme wurden in der Literatur bereits aus-

föhrlich behandelt. Die Standortplanung unterstötzt eher langfristige Entscheidungen, wöhrend die Tourenplanung kurzfristig umzusetzen und auch wieder einfach zu ändern ist. Es wird üblicherweise sowohl in der Theorie als auch in der Praxis eine unabhängige Betrachtung durchgeführt, die Probleme dadurch nacheinander, sprich sukzessiv, gelöst.

Die Optimierung von Standorten und Touren ist in vielen Fällen aber voneinander inhaltlich abhängig, da zum Beispiel bei der Warenverteilung die Transportkosten von dem Standort des Logistikzentrums, also dem Start- und Endpunkt der Tour, abhängen und dadurch einen Einfluss auf die Lösung des jeweils anderen Problems entsteht.

Hier setzt die Theorie der kombinierten Standort-Tourenplanung an, bei der gleichzeitig durch die Kombination von möglichen Standorten und möglichen Touren das Optimum gesucht wird. In der englischsprachigen Literatur wird dieser Modellansatz als *Location-Routing-Problem (LRP)* bezeichnet und dem Forschungsbereich des Operations Research zugeordnet, in wissenschaftlichen Untersuchungen aber immer noch verhältnismäßig wenig behandelt. Die Grundidee ist also, dass eine durchgehende, gleichzeitige Betrachtung der Standort- und Tourenplanung zu niedrigeren Kosten föhrt, als bei einer schrittweisen Einzelbetrachtung.

Bruns hat das Location Problem als Standortplanung unter Berücksichtigung von Tourenplanungsaspekten⁷ bezeichnet. In sehr ähnlicher Weise haben Balakrishnan et al. den Begriff als essentiell wichtige strategische Entscheidung, die den Facility-Bereich der Unternehmen betreffen⁸, beschrieben. Nagy und Salhi schließen sich der Betrachtungsweise ebenfalls an, heben jedoch das Standortproblem als Masterproblem hervor, das simultan mit einem Tourenplanungsproblem gelöst werden muss⁹. Damit unterstreichen sie das Prinzip des integrierten Lösungsverfahrens in dieser Problematik.

Die Forschung im Bereich des Location-Routing Problems kann dabei in verschiedene Bereiche unterteilt werden. Man spricht von einem statischen und einem dynamischen Problem. Das *statische* Problem ist dabei dadurch gekennzeichnet, dass die Parameter zur Berechnung eines Problems bekannt sind und sich innerhalb der Berechnung nicht mehr ändern. Man bezeichnet das statische Location-Routing Problem deshalb als einperiodische Betrachtung. Wenn sich die Parameter von Periode zu Periode ändern, so liegt ein mehrperiodisches Problem vor, das als *dynamische* Location-Routing Problem bezeichnet wird. Die Vermutung liegt nahe, dass dynamische Probleme ein breites Feld an Optimierungsmöglichkeiten bieten z.B. bezüglich der Depot- (Öffnung und Schließen in verschiedenen Perioden) oder der Transportkosten (periodenweise Routenänderungen) etc.

Des Weiteren wird das Location-Routing Problem in *deterministische* und *stochastische*

⁷Vgl. Bruns A.D. (1998): S.1ff [15]

⁸Vgl. Balakrishnan A. et al. (1987): S.56 [8]

⁹Vgl. Nagy G. et al. (2007): S.650 [63]

Probleme unterschieden. Bei *deterministischen* Problemen geht man generell davon aus, dass die zukünftigen Ereignisse durch Vorbedingungen eindeutig festgelegt sind. Bezogen auf das Location-Routing Problem ist das auf die zukünftigen Nachfragen der Kunden bezogen. Das deterministische Problem ist dementsprechend eine Optimierung anhand bekannter Nachfragewerte der Kunden. Das *stochastische* Problem kennt die tatsächlichen Nachfragemengen der Kunden in der Zukunft nicht und versucht, mit Hilfe statistischer Methoden eine Abschätzung der zukünftigen Nachfrage zu prognostizieren und bezüglich der Prognose zu optimieren. An dieser Stelle spielt die Prognosequalität eine wesentliche Rolle. Es gilt also, Verfahren zu finden, die zukünftigen Bedarfe möglichst zuverlässig ermitteln können. In diesem Zusammenhang werden die Methoden der Zeitreihenanalyse zur Anwendung kommen. Im Rahmen dieser Arbeit wird u.a. ein Excel-Tool zum Erstellen von synthetischen Zeitreihen entwickelt, das in der Lage ist, automatische Prognose der künftigen Materialbedarfe zu prognostizieren.

Ferner werden erstmalig verschiedene Modelle der dynamischen LRP formuliert und mit deterministischer bzw. stochastischer Nachfrage näher untersucht und anhand von Szenarien miteinander verglichen. Dafür kommt eigens entwickeltes Optimierungstool namens **AdL(e)R[©]** (**Advanced-Location-Routing**) zum Einsatz. Seine Funktionsweise basiert auf der Anwendung von genetischen Algorithmen zur Lösung von NP-schweren Optimierungsproblemen¹⁰.

Durch die Betrachtung der dynamischen Fälle des LRP erwartet der Autor signifikante Senkung der mit der Standort- und Tourenplanung verbundenen Gesamtkosten.

Da die mathematischen Modelle ebenfalls für Lieferdienste oder Müllentsorgung verwendet werden können, wird nachfolgend in dieser Arbeit der neutrale Begriff „Fahrzeuge“ benutzt. Den Ort, an dem die Fahrzeuge ihre Fahrten starten und enden, definieren wir als „Depot“. Beispiele dafür sind Auslieferungslager, Sammellager und Fahrzeugdepots¹¹.

Die Lage der Depots hat einen direkten Einfluss auf die variablen Fahrtkosten und somit auf die Logistikkosten des jeweiligen Unternehmens. Des Weiteren hat auch die Routen- und Tourenplanung einen wichtigen Einfluss auf die Kosten. Eine „Tour“ beschreibt alle Kunden, die auf einer Fahrt bedient werden. Die Reihenfolge, in der die Kunden beliefert werden, wird als „Route“ bezeichnet¹². Standortentscheidungen und Tourenplanungen stellen große Herausforderungen im Supply Chain Management¹³ dar, weil sie einen großen Einfluss auf die Kosten haben¹⁴. Ein effektives und effizientes Distributionssystem wird somit Teil der Unternehmensstrategie¹⁵.

¹⁰Vgl. Vahrenkamp R. et al. (2007); S.49 [93]

¹¹Vgl. Domschke W. et al. (2010): S.132 [26]

¹²Ebenda

¹³Vgl. Duhamel C. et al. (2008): S.1 [31]; Duhamel C. et al. (2010): S.1912 [32]

¹⁴Vgl. Wu T.-H. et al. (2002): S.1394 [98]

¹⁵Vgl. Belenguer J.-M. et al. (2011): S.931 [11]

Kapitel 3

Theoretische Grundlagen

3.1 Klassische Standortplanung

3.1.1 Die Standortplanung

Die *Standortplanung* spielt für den Erfolg des Unternehmens auf dem Markt eine wichtige Rolle, da bei dieser strategischen Planung die Grundsteine für die spätere Stellung des Unternehmens im Wettbewerb gelegt werden. Bei einer rudimentären Behandlung kommt es so zu Einbußen, da vorhandenes Potential, hinsichtlich des Servicegrades sowie des Qualitätslevels, nicht optimal genutzt wird. Um dem entgegenzuwirken, gibt es im Bereich der klassischen Standortplanung viele Modelle, die dazu beitragen, die real existierenden Bedingungen weitestgehend in eine Entscheidungsfindung mit einzubeziehen. Dadurch ist es möglich, im Hinblick auf viele Faktoren, Gegebenheiten und Parameter eine Planung durchführen zu können, die den für das Unternehmen bestmöglichen Standort ermittelt.¹⁶

Doch womit beschäftigt sich die Standortplanung eigentlich genau? Bei der Planung stellt sich folgende Frage: „Wo sollten meine Standorte langfristig positioniert sein, um möglichst optimale Ergebnisse zu liefern (minimale Gesamtdistanz (MINISUM) oder Minimierung der maximalen Distanz (MINIMAX) zwischen Depot und Kunde)?“¹⁷.

Theoretiker wie G. Rand und F.E. Maranzana erkannten bereits in den sechziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts, dass die Standortplanung von Produktionsstätten, Logistikzentren und sonstigen Versorgungspunkten oft von den Transportkosten beeinflusst wird¹⁸.

Heutzutage gibt es eine Vielzahl an verschiedenen Modellen, die als Ansatzpunkt genutzt werden können und das Problem jeweils mit einem bestimmten Schwerpunkt bzw. mit vordefinierten Restriktionen betrachten.

¹⁶Vgl. Fitzsimmons J.A. et al. (2006): S.253ff [36]

¹⁷Vgl. Klaus P. et al. (2008): S.427 [52]

¹⁸Vgl. Nagy G. et al. (2007): S.650 [63]

3.1.2 Facility-Location Problem

Werden bei der Standortplanung nicht nur die besten Standorte aus allen möglichen bestimmt, sondern gleichzeitig eine Zuordnung der Kunden vorgenommen, wird dies als Location-Allocation Problem (LAP) bezeichnet¹⁹. Das LAP an sich kann wiederum in Single-Facility-Location und Multiple-Facility-Location Probleme unterteilt werden. Die in der Literatur beschriebenen Modelle Facility-Location Problem (FLP) und Warehouse-Location Problem (WLP)²⁰ sind vergleichbar.

Der Einsatz der Standortplanung als Entscheidungsinstrument der strategischen Unternehmensplanung ist bei verschiedenen Szenarien und Einrichtungen (z.B. Lager-, Produktionsstätten, Krankenhäusern etc.) möglich. Dies kann folgendes bedeuten:

- Schließung aktueller Standorte,
- Bewertung und Optimierung bestehender Standorte,
- Planung neuer Standorte.

Die Auslöser für die oben genannten Szenarien sind unterschiedlich und können auf Kapazitätsengpässe, -überschüsse, Modernisierungen, Kostenfaktoren, Nachfrageänderungen oder andere Änderungen/Verlagerungen, aber auch auf die Unternehmenshistorie zurückgeführt werden. Die Bewertung und Optimierung von Standorten wird vor allem auf Benchmarkbasis (im Vergleich zu Wettbewerbern) durchgeführt²¹.

3.1.3 Bewertung von Alternativen

Bei der Standortwahl selbst sind verschiedene Kriterien zu berücksichtigen, deren Beurteilung nach verschiedenen Methoden gewichtet werden kann. Die qualitativen Faktoren wie z.B. Nähe zu Kunden, Zugang zu Rohstoffen oder Infrastruktur, Verfügbarkeit von qualifizierten Arbeitskräften etc. können am sinnvollsten mit einer Nutzwertanalyse bewertet werden. Bei der Nutzwertanalyse wird durch Bewertung der Alternativen nach gewichteten Kriterien der Standort mit dem höchsten Gesamtnutzen bestimmt.

Der Vergleich von zwei Standorten kann durch zwei Kostenfunktionen mittels einer Break-Even-Analyse durchgeführt werden. Mit dieser Analyse kann ermittelt werden, bei welcher Parameterkonstellation (Produktionsmenge usw.), welche Kostenfunktion niedrigere Werte liefert und damit welcher Standort kostengünstiger ist. Der Schnittpunkt (Break-Even-Punkt) gibt dabei die Parameterkonstellation gleicher Kosten für beide Standorte an.²²

¹⁹Vgl. Sule D.R. (2001): S.159 [88]

²⁰Vgl. Domschke W. (2007): S.45 [28]; Domschke W. et al. (1996): S.41ff [29]; Vahrenkamp R. et al. (2007): S.187ff [93]

²¹Vgl. Günther H.-O. et al. (2009): S.63ff [42]

²²Vgl. Günther H.-O. (2009): S.71ff [42]

Wie bereits erwähnt, werden für die verschiedensten Anwendungen der Standortplanung neue Modelle entwickelt. Aus diesem Grund gibt es auch für einige Modelle in der Literatur verschiedene Bezeichnungen. Dies gilt auch für das hier im späteren Verlauf in der Software verwendete Standortoptimierungsmodell.

3.2 Tourenplanung (Vehicle-Routing Problem)

3.2.1 Definition

Im Gegensatz zu Standortplanung, die strategische, langfristige Entscheidungen beinhaltet, finden die Tourenplanungsansätze auf der taktisch-operativen Ebene statt. Dabei stellt sich die Frage: „Welcher Kunde soll auf welcher Route von welchem Transportmittel in welcher Reihenfolge erreicht werden?“.

Die *Tourenplanung* (engl. *Vehicle Routing*) ist ein Instrument zur Bestimmung der Transportvorgänge von einem Depot zu den einzelnen Kundenstandorten unter Berücksichtigung bestehender Restriktionen, z.B. der Transportmittel (Anzahl, Kapazität, Fahrzeit, . . .). Erstmals wurde das VRP 1959 in der Literatur als „The Truck Dispatching Problem“ von Dantzig und Ramser veröffentlicht.²³

Je nach Notwendigkeit können die Routen entweder täglich (operativ) oder durch einen Masterplan (über mehrere Wochen hinweg – taktisch) geändert werden. Damit kann eine schnelle Reaktion auf beispielsweise Nachfrageschwankungen oder Zeitrestriktionen sichergestellt werden. Ein Tourenplan kann je nach Zielsetzung durch Minimierung der Gesamtlänge, Minimierung der Anzahl von Touren/Fahrzeugen oder durch gleichmäßige Auslastung der Fahrzeuge optimiert werden. Dies haben Christofides et al. Bereits 1979 festgestellt.²⁴

Bei den Tourenplanungsproblemen handelt es sich hinsichtlich der mathematischen Behandlung überwiegend um schwer lösbare Optimierungsaufgaben, sogenannte NP²⁵-schwere Probleme.²⁶

3.2.2 Abgrenzung

Während ein Vertriebsmitarbeiter oder ein Paketzusteller seine Kunden gezielt besucht, ist die Optimierung für Briefträger oder Müllentsorgung stets auf Straßenzüge ausgerichtet.

²³Vgl. Dantzig G.B. et al. (1959): S.80-91 [24]

²⁴Vgl. Christofides N. et al. (1979): S.315ff [17]

²⁵NP - nondeterministic polynomial time

²⁶Vgl. Vahrenkamp R. et al. (2007): S.47f [93]

Die Tourenplanung kann deshalb unter den Aspekten kanten- (z.B. Briefträger) oder knotenorientiert (z.B. Vertreterbesuch) untersucht werden. Bei kantenorientierten Tourenplanungsproblemen werden ganze Straßenzüge (=Kanten) betrachtet und deren Reihenfolge geplant. In der Literatur wird dieses Problem deshalb als „Briefträgerproblem“ bzw. in der englischsprachigen Literatur als „Chinese-Postman-Problem“ bezeichnet²⁷. Die knotenorientierten Tourenplanungsprobleme betrachten einzelne Adressaten/Kunden (=Knoten). Diese Betrachtung ist in der Literatur als „Travelling Salesman Problem“ (TSP) bekannt²⁸.

Können alle Abnehmer mit einem Fahrzeug beliefert werden, geht es „lediglich“ darum, die günstigste Reihenfolge für die Tour des Paketzustellers zu bestimmen. In der Realität wird die Kapazität eines einzelnen Transportfahrzeugs nicht für alle Kunden ausreichen (Ausnahme: Vertreterbesuch). Deshalb wird das Problem in zwei Teilprobleme aufgespalten: Die Zuordnung der Abnahmemengen auf mehrere Fahrzeuge und die optimale Reihenfolge der Destinationen für die einzelnen Fahrzeuge. Diese Teilprobleme können u.a. durch den Savings-Algorithmus oder nacheinander (sequentiell) durch den Sweep-Algorithmus gelöst werden²⁹.

Die minimale Distanz kann weder durch Einzelbelieferung noch durch das einfache Traveling-Salesman-Problem erreicht werden, sondern bedarf einer Gruppierung von Abnehmern zu Touren einzelner Fahrzeuge³⁰.

In der Literatur gibt es eine Vielzahl von Varianten des Vehicle-Routing-Modells zur Umsetzung von Tourenproblemen. Dies liegt vor allem daran, dass es in der Praxis kein einheitliches Problem gibt, sondern fallspezifisch differenzierte Restriktionen bestehen und deshalb unterschiedliche Lösungsansätze gewählt und je nach Modell unterschiedlich viele Restriktionen eingebunden werden (z.B. Zeitfenster, Vorrangbeziehungen etc.). Deshalb werden immer mehr Methoden des Operations Research und neue Software zur Lösung dieser Probleme entwickelt und angewendet³¹.

3.3 Kombinierte Standort-Tourenplanung

Angenommen, ein Depot beliefert 10 Kunden, die regelmäßig auf einem Kreis mit dem Radius r verteilt sind, mit genau einem Fahrzeug. Bei der sukzessiven Planung würde typischerweise der Mittelpunkt des Kreises als bester Standort für das Depot festgelegt

²⁷Vgl. Grünert T. et al. (2005): S.541f. [40]; Vahrenkamp R. (2003): S.235f [95]

²⁸Vgl. Sule D.R. (2001): S.227f [88]

²⁹Vgl. Vahrenkamp R. et al. (2007): S.277 [93]

³⁰Vgl. Vahrenkamp R. et al. (2007): S.275f [93]; Günther H.-O. et al. (2009): S.293 [42]

³¹Vgl. Domschke W. (1997): S.204 [27]; Grünert T. et al. (2005): S.315 [40]

werden. Für die Belieferung aller Kunden ergibt sich eine Gesamtstrecke L mit

$$L = 2\pi r + 2r - \frac{2\pi r}{10}$$

Bei der Simultanplanung stellt man fest, dass ein Standort auf dem Kreis besser für das Depot geeignet ist, da die Gesamtstrecke nur noch

$$L' = 2\pi r$$

beträgt. Es ergibt sich also eine Verbesserung/Verkürzung des Plans um

$$\Delta L = 1 - \frac{2\pi r}{2\pi r + 2r - \frac{2\pi r}{10}} = 0,17919 = 17,92\%^{32}$$

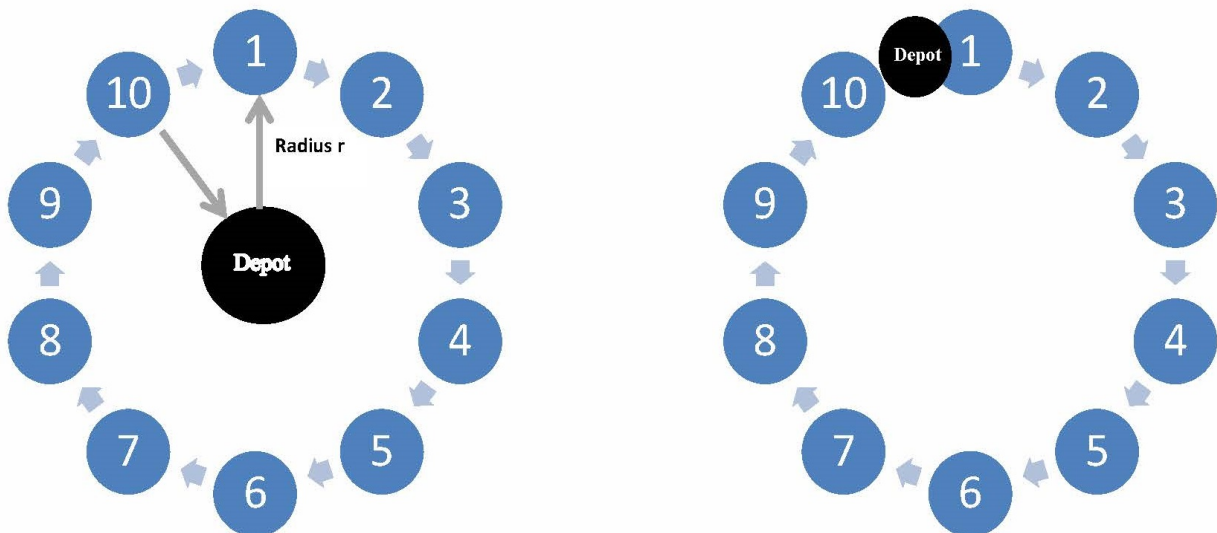


Abbildung 3.1: Sukzessivplanung (li) vs. Simultanplanung (re) in Anlehnung an Engele (1980)³³

Dieses Beispiel zeigt, dass die anfängliche Überlegung, das Depot zentral zu positionieren, nicht unbedingt die beste Lösung ist und auch nicht die erwarteten Standorte zu Kosteneinsparungen führen können. Dass die sukzessive Planung zu suboptimalen Lösungen führt, beschreiben auch Salhi und Rand 1989 an einem ähnlichen Beispiel mit drei Kunden als Eckpunkte eines Dreiecks³⁴.

³²Vgl. Engele G. (1980): S.3f [34]

³³Ebenda

³⁴Vgl. Salhi S. et al. (1989): S.150f [78]

3.3.1 Definition

In der Praxis wird häufig zunächst die Planung für neue Standorte durchgeführt und mit den daraus entstandenen Ergebnissen (Anordnung oder Auswahl der Standorte) eine Tourenplanung für den Transport der Waren zu den Kunden erstellt. Gerechtfertigt wird diese sukzessive Vorgehensweise oft durch erhöhte Kosten und Planungszeiträume, die entstehen, wenn durch die Entscheidung über neue Depots diese auch gebaut werden müssen. Wie die Beispiele zeigen, lohnt sich die kombinierte Betrachtung vorzunehmen, um Kosten einzusparen. Deshalb sollte diese komplexe Koordination durch eine integrierte Betrachtung gelöst werden, um damit eine kostenminimale Gesamtlösung zu erhalten.

Diese als kombinierte oder integrierte Standort-Tourenplanung bezeichnete Theorie wird hauptsächlich in der englischsprachigen Literatur behandelt und deshalb auch durch den Begriff **Location-Routing-Problem (LRP)** geprägt.

Das LRP ist im Gegensatz zum TSP kein eindeutig definiertes Problem. Es ist eher „as a set of problems within location theory“ zu verstehen³⁵. Nadizadeh et al. definieren: „The LRP is defined as a facility Location Problem (FLP) that solves the vehicle routing problem (VRP), simultaneously“³⁶. Diese Betrachtung verfolgt weiter Arno Bruns in seiner im Jahre 1998 veröffentlichten Dissertation mit dem Titel „Zweistufige Standortplanung unter Berücksichtigung von Tourenplanungsaspekten“³⁷. Nach Min et al. löst das LRP „The joint problem of determining the optimal number, capacity and location of facilities (domicilies) serving more than one customer/supplier, and finding the optimal set of vehicle schedules and routes“³⁸.

Beim LRP geht es also um die Auswahl möglicher Standorte und die Bestimmung der zugeordneten Routen zu Kunden unter Berücksichtigung von Kapazitätsbeschränkungen für Depots und Transportmittel. Alle Kunden müssen erreicht werden, dabei sollen aber die Gesamtkosten als Summe aus Fixkosten für Depots und Fahrzeuge und den variablen Transportkosten minimiert werden³⁹. Prins et al. definieren das LRP mit Kapazitätsbeschränkungen für Depots und Touren als „allgemeines LRP“⁴⁰.

Das LRP kann, wie viele Modelle, sehr unterschiedlich charakterisiert werden. Die Aspekte und Einflussfaktoren können hinsichtlich Lösungsansatz oder Problemperspektive klassifiziert werden. Die wichtigsten Merkmale für die erste Unterscheidung der Varianten des LRP sind die Hierarchie, die Art der Nachfrage, der Planungshorizont und die Art des Lösungsansatzes. Diese und weitere Merkmale sind in der Tabelle (3.1) dargestellt.

³⁵Vgl. Nagy G. et al. (2007): S.649 [63]

³⁶Vgl. Nadizadeh A. et al. (2011): S.7499 [62]

³⁷Vgl. Bruns A.D. (1998): S.1ff [15]

³⁸Vgl. Min H. et al. (1998): S.1-15 [61]

³⁹Vgl. Belenguer J.-M. et al. (2011): S.932 [11]

⁴⁰Vgl. Prins C. et al. (2007): S.470-483 [69]

⁴¹Vgl. Min H. et al. (1998): S.3 [61]

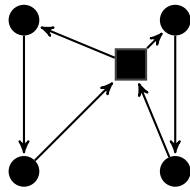
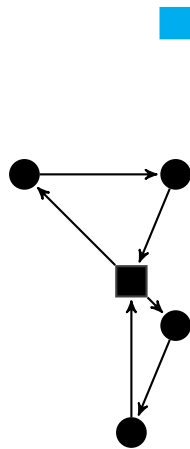
Klassifikation nach Problemperspektive:	Klassifikation nach Lösungsansatz:
Hierarchie	Exakte Lösungsverfahren
<ul style="list-style-type: none"> • Einfach • Mehrfach 	<ul style="list-style-type: none"> • Branch & Bound • Dynamische Programmierung • Ganzzahlige Programmierung • Nichtlineare Programmierung
Art von Angebot / Nachfrage	Heuristische Lösungsverfahren
<ul style="list-style-type: none"> • Deterministisch • Stochastisch 	<ul style="list-style-type: none"> • Standortplanung, dann Tourenplanung • Tourenplanung, dann Standortplanung • Savings - Algorithmus • Verbesserungsverfahren
Planungshorizont	
<ul style="list-style-type: none"> • Eine Periode (Statisch) • Mehrere Perioden (Dynamisch) 	
Zielfunktion	
<ul style="list-style-type: none"> • Ein Ziel • Mehrere Ziele 	
Anzahl der Depots / Fabriken	
<ul style="list-style-type: none"> • Eine • Mehrere 	
Anzahl der Transportmittel	
<ul style="list-style-type: none"> • Ein Fahrzeug • Mehrere Fahrzeuge 	
Kapazität der Transportmittel	
<ul style="list-style-type: none"> • Unbeschränkt • Beschränkt 	
Kapazität der Fabriken	
<ul style="list-style-type: none"> • Unbeschränkt • Beschränkt 	
Art der Daten	
<ul style="list-style-type: none"> • Theoretisch • Praxiswerte 	

Tabelle 3.1: Klassifikation von LRPs (in Anlehnung an Min et al. (1998))⁴¹

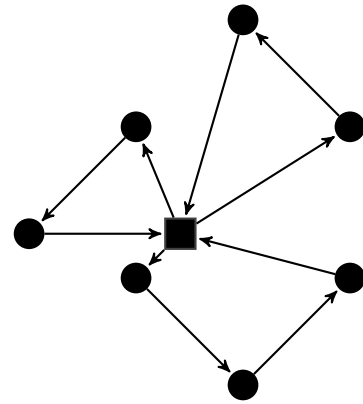
Während beim VRP zu einem bestimmten Standort lediglich die Touren zu den Abnehmern geplant und ermittelt werden müssen, müssen beim LRP Standorte und Routen in wirtschaftlicher Abhängigkeit ermittelt werden. Um diese beiden Ziele zu verfolgen, muss ein ganzheitlicher Lösungsansatz verwendet werden, der vor allem die Wechselwirkungen von Standorten und Touren charakterisiert. Zu diesen Definitionen zählt auch die Forderung nach mehreren Zielen je Tour (Multiple Stops), da nur durch diese Forderung die Reihenfolgeplanung je Tour relevant wird. Man erkennt, dass das LRP direkt mit den beiden Modellen

Standort- und Tourenplanung verbunden ist. Dabei sollen alle anfallenden Gesamtkosten möglichst gering gehalten werden. Die Standorte können also noch nicht als gegeben betrachtet werden, wie die Abbildung (3.2) aufzeigt.

LRP



VRP






-  Geschlossenes Depot
-  Offenes Depot
-  Kunde

Abbildung 3.2: Abgrenzende Gegenüberstellung von LRP und VRP (Quelle: in Anlehnung an Ahn (2008)⁴²)

LRP ist ein integrierter Ansatz, der das Vertriebsmanagement unterstützt und aus mathematischer Sicht zu den kombinatorischen Optimierungsproblemen zählt. Da sowohl das FLP als auch das VRP zu den NP-schweren Problemen zählen, ergibt sich diese Klassifizierung auch für das LRP.

Die Bedeutung von integrierten Ansätzen ist in letzter Zeit gestiegen. Neben dem LRP gibt es weitere Ansätze, die sowohl das Tourenproblem als auch das Standortproblem in Kombination mit anderen Problemen betrachten⁴³.

3.3.2 Überblick und Einordnung

Es gibt eine Vielzahl verschiedener Formulierungen und Ausführungen für LRP. Laporte⁴⁴ beschreibt in seinem Artikel den aktuellen Stand aus dem Jahre 1988 zu verschiedenen Formulierungen, Lösungsansätzen sowie rechnergestützten Ergebnissen. Min et al.

⁴²Vgl. Ahn J. (2008): S.39 [3]

⁴³Vgl. Belenguer J.-M. et al. (2011): S.931 [11]; Nagy G. et al. (2007): S.650f [63]

⁴⁴Vgl. Laporte G. (1988): S.163-197 [55]

(1998)⁴⁵ geben einen nach 7 Faktoren klassifizierten Überblick über wissenschaftliche Artikel aus der Literatur. Die meisten dieser Artikel verwenden entweder keine Kapazitätsbeschränkungen oder separat alleine für Standortplanung oder für Tourenplanung, aber nicht kombiniert bei beiden gleichzeitig. Das LRP wird überwiegend als deterministisches⁴⁶ Problem behandelt, den alternativen stochastischen⁴⁷ Fall untersuchen zum Beispiel Laporte et al. (1989)⁴⁸.

Sahli und Rand haben bereits 1989 eine Analyse des LRP mit Hilfe von drei verschiedenen Algorithmen (Random Destination Algorithmus, Alternate Location Allocation und Drop-Heuristik) für jeweils ein einzelnes Depot und für unbegrenzte Anzahl an Depots durchgeführt. Sahli und Rand stellten damals fest, dass die Reihenfolge der besten Depots nach Standort- und nach Tourenplanung nicht immer übereinstimmen und die Anzahl an Fahrzeugen mit der Anzahl der Depots steigt, obwohl die Gesamtdistanz durch Eröffnung eines neuen Depots hypothetisch sinken sollte⁴⁹.

Zur Lösung von LRP können entweder exakte Verfahren oder Heuristiken (Näherungslösungen) verwendet werden. Der größere Anteil der wissenschaftlichen Artikel verwendet Heuristiken und teilt die Probleme dabei in Teilprobleme auf, die dann nacheinander oder iterativ gelöst werden. Nur wenige Artikel beschäftigen sich in den vergangenen Jahren mit exakten Verfahren. Der Grund ist, dass, im Vergleich zu Heuristiken, die exakten Verfahren nur begrenzte Größen von Instanzen⁵⁰ lösen.

Nachfolgend wird ein Überblick über die aktuellen Forschungsthemen und Lösungsansätze innerhalb des Location-Routing-Problems gegeben. Die dort genannten Algorithmen basieren meistens auf der Kombination oder Erweiterung von metaheuristischen Algorithmen. Einige der möglichen heuristischen und metaheuristischen Lösungsansätze werden später in dieser Arbeit erläutert.

Heuristische Ansätze mit Kapazitätsbeschränkungen sowohl für Standorte als auch für die Touren behandeln z.B: Prins et al. (2006) und Prins et al. (2007)⁵¹. Letztere, Prins et al. (2007), lösen das Standort-Teilproblem mit einer Lagrange Relaxation und das Touren-Teilproblem mit einer Tabu Suche und erzielen damit laut Belenguer et al. (2011)⁵² die im Durchschnitt besten Ergebnisse, die in der Literatur veröffentlicht wurden.

Prins et al. (2006)⁵³ verwenden einen *GRASP* Algorithmus mit einem Lernprozess („Memory oft the Depots“) innerhalb der Heuristik, um ein CLRP mit homogener, unbeschränkter

⁴⁵Vgl. Min H. et al. (1998): S.5ff [61]

⁴⁶Verfahren mit festgelegten und reproduzierbaren Zuständen

⁴⁷Verwendung von zufallsgenerierten Zuständen

⁴⁸Vgl. Laporte G. et al. (1989): S.71ff [56]

⁴⁹Vgl. Salhi S. et al. (1989): S.154f [78]

⁵⁰Vgl. Kapitel 6 dieser Arbeit

⁵¹Vgl. Prins C. et al. (2006): S.221ff [70]; Prins C. et al. (2007): S.470ff [69]

⁵²Vgl. Belenguer J.-M. et al. (2011): S.932 [11]

⁵³Vgl. Prins C. et al. (2006): S.221ff [70]

Flotte zu lösen. Es wird ein sogenannter *Path-Relinking* Algorithmus verwendet, um nachträglich zu optimieren (Postoptimization). Aufgrund von Instanzen mit 200 Kunden können hier gute Ergebnisse erzielt werden⁵⁴.

Prins et al. (2007)⁵⁵ verwenden für ein allgemeines LRP mit Fixkosten für die Öffnung von Depots oder Routen einen approximativen Algorithmus, der das FLP mit einem Lagrangean Relaxation (LR) Algorithmus und das Tourenproblem mit einer Granular Tabu Search (GTS) löst und deshalb in dieser Kombination als LGRTS bezeichnet wird.

Duhamel et al. haben 2010 eine neue Metaheuristik entwickelt, die für die großen Instanzen in der Literatur von bis zu 200 Kunden und möglichen 20 Depots bestmögliche Lösungen generiert. Es wird eine GRASP-Heuristik mit einer evolutionären lokalen Suche kombiniert und als *GRASP \times ELS* bezeichnet⁵⁶.

Nadizadeh et al. (2011)⁵⁷ präsentieren einen *Greedy Clustering Ansatz*, der im ersten Schritt mit Hilfe eines *Greedy Verfahrens* Kunden gruppiert, im zweiten Schritt die besten Depots auswählt, im dritten Schritt die Gruppierungen unter Berücksichtigung von Kapazitätsbeschränkungen den Depots zuordnet und im letzten Schritt die Routen mit einem *Ameisen-Verfahren* bestimmt.

Im folgenden Kapitel werden mathematische Modelle der zuvor erläuterten Planungsprobleme aufgezeigt.

⁵⁴Vgl. Duhamel C. et al. (2010): S.1912f [32]

⁵⁵Vgl. Prins C. et al. (2007): S.470ff [69]

⁵⁶Vgl. Duhamel C. et al. (2010): S.1912f [32]

⁵⁷Vgl. Nadizadeh A. et al. (2011): S.7501ff [62]

Kapitel 4

Mathematische Modellierung

4.1 Standortplanung

4.1.1 Wichtige Ausprägungen des FLP

Ein Standortproblem soll ein Set von Standorten so lokalisieren, dass die Nachfrage kostenminimal und unter der Einhaltung der Nebenbedingungen befriedigt werden kann. Die Entscheidung über das richtige Set hängt dabei von der Lage der Kunden ab und muss dementsprechend nachhaltig sein, d.h. nicht nur unter aktuellen Systemparametern optimal funktionieren, sondern für die gesamte Lebensdauer eines Standortes profitabel sein⁵⁸. Dabei kann das betrachtete Distributionsnetzwerk einige Kapazitätsbeschränkungen beinhalten. Ferner können mehrere Schichten der Depots, z.B. Produktionsstätte und Läger, modelliert werden.

4.1.2 Das Modell: Multi-Depot-Facility-Location Problem

Das **Multi-Depot-Facility-Location-Problem** (MDFLP) ist eine Variante des einfachen FLP mit mehreren Depots und Kapazitätsbeschränkungen. Es werden hier mehrere Depots als Startposition betrachtet. Modellierungen können in der Literatur voneinander abweichen. Das nachfolgende Modell wird in der Literatur folgendermaßen beschrieben:

Ein Unternehmen beliefert J Abnehmerzentren (Kunden) mit der zugehörigen Bedarfsmenge d_j . Die Fixkosten f_i sind nur von der jeweiligen Produktionsstätte / dem potentiellen Standort i abhängig, die zum Standort zugehörige Kapazität beträgt b_i . Die Transportkosten hingegen hängen von der von Standort i an ein Abnahmezentrum j gelieferten Menge x_{ij} ab.

⁵⁸Vgl. Hassanzadeh A. et al. (2009): S.1 [44]

Dem MDFLP liegen folgende Annahmen zugrunde:

- Mehrere, durch Berücksichtigung qualitativer Kriterien, vorausgewählte potentielle Standorte stehen zur Auswahl.
- Es sind mehrere Abnehmerzentren (AZ) vorhanden, die beliefert werden müssen.
- Der Bedarf der AZ wird in aggregierter Form (ME) angegeben.
- Die zu betrachtenden Kosten sind die jeweiligen Fix- und Transportkosten⁵⁹.

Ziel ist es, auf Standort-Fixkosten und Kosten des Transports bezogene, kostenminimale Standorte zu bestimmen. Dafür werden folgende Variablen festgelegt:

x_{ij} Transportmenge von Standort i zum Abnehmerzentrum j

$$\gamma_i = \begin{cases} 1, & \text{wenn an Standort } i \text{ eine Produktionsstätte errichtet wird} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

$$Z = \sum_{i=1}^I f_i \gamma_i + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J c_{ij} x_{ij} \quad (4.1)$$

unter Berücksichtigung der Restriktionen/Nebenbedingungen:

$$\sum_{i=1}^I x_{ij} = d_j, \quad \forall j = 1, 2, \dots, J \quad (4.2)$$

$$\sum_{j=1}^J x_{ij} \leq b_i \gamma_i, \quad \forall i = 1, 2, \dots, I \quad (4.3)$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad \forall i = 1, 2, \dots, I; \quad \forall j = 1, 2, \dots, J \quad (4.4)$$

$$\gamma_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i = 1, 2, \dots, I \quad (4.5)$$

Daten:

- b_i Produktionskapazität des Standorts i
- c_{ij} Transportkosten zwischen Standort i und Abnehmerzentrum j (pro Mengeneinheit)
- d_j Bedarfsmenge des Abnehmerzentrums j
- f_i Fixkosten pro Jahr am Standort i

⁵⁹Vgl. Günther H.-O. et al. (2009): S.75 [42]

- I Anzahl der potentiellen Standorte ($i=1,2, \dots, I$)
 J Anzahl der möglichen Abnehmerzentren ($j=1,2, \dots, J$)⁶⁰

Lösungen für das Facility-Location-Problem können unter der Nutzung von, zum Beispiel, algorithmischen Näherungs- oder Verbesserungsverfahren erzeugt werden.

4.2 Das Modell: Multi-Depot-Vehicle-Routing Problem

Das komplexe Modell **Multi-Depot-Vehicle-Routing-Problem** (MDVRP) wird für die rechnergestützte Auswertung dieser Arbeit verwendet und basiert auf dem klassischen, kapazitätsbeschränkten Vehicle Routing Problem (VRP)⁶¹. Diese Variante des VRP verwendet mehrere Depots und ist durch diese Betrachtung praxisnah. Dabei können die Auslieferungsrouten an einem beliebigen Depot starten, müssen dort aber auch wieder enden. Das Modell gehört ebenfalls zu den NP-schweren Optimierungsaufgaben⁶². Das MDVRP ist für Unternehmen unterschiedlichster Branchen relevant und wird in der Praxis auch für die Aufteilung von Vertriebsgebieten genutzt.

Dem MDVRP-Modell von Bruns⁶³ liegen folgende Annahmen zugrunde:

- Der Start- und Endpunkt jeder Route ist ein festes Depot,
- Jeder Kunde wird genau einmal angefahren,
- Die Kapazitätsbeschränkung der Transportmittel je Route dürfen nicht überschritten werden,
- Die gesamten Transportkosten sollen minimiert werden⁶⁴.

Ausgehend von J Depots mit jeweils der Kapazität k_j^v wird eine Menge I an Kunden i beliefert. Die an den Depots stationierten, mit der Kapazität k_r^r begrenzten Transportmittel, verfolgen die Routen r zu allen Kunden. Dabei muss die maximal zurückzulegende Distanz d^{max} berücksichtigt werden.

Es wird für die Zuordnung x_{ij}^{zkv} der Kunden zu den Depots die Menge an Routen R gesucht, bei der die Gesamtkosten ϑ_{MDVRP} minimiert und dennoch alle Nachfragen der Kunden bedient werden.

$$\vartheta_{MDVRP} := \min \sum_i \sum_j c_j^{var} q_i^k x_{ij}^{zkv} + \sum_{g_1} \sum_{g_2} \sum_r c_{g_1 g_2}^{ka} x_{g_1 g_2 r}^{zkar} \quad (4.6)$$

⁶⁰Vgl. Günther H.-O. (2009): S.75f [42]; Domschke W. et al. (1996): S.53f [29]

⁶¹Vgl. Wendt O. (1995): S.26ff [96]

⁶²Vgl. Renaud J. et al. (1996): S.229 [76]

⁶³Vgl. Bruns A.D. (1998): S.41ff [15]

⁶⁴Vgl. Renaud J. et al. (1996): S.229f [76]

Unter Berücksichtigung der Restriktionen/Nebenbedingungen:

$$\sum_r \sum_{g_1} x_{g_1 g_2 r}^{zkar} = 1, \quad \forall g_2 \in I \quad (4.7)$$

$$\sum_{g_2} x_{g_1 g_2 r}^{zkar} = \sum_{g_2} x_{g_2 g_1 r}^{zkar}, \quad \forall g_1, r \quad (4.8)$$

$$\sum_{g_2} x_{g_1 g_2 r}^{zkar} = x_{g_1 r}^{zknr}, \quad \forall g_1, r \quad (4.9)$$

$$\sum_{g_1 \in I} x_{g_1 r}^{zknr} q_i^k \leq k_r^r, \quad \forall g_1, r \quad (4.10)$$

$$D_{g_1} + d_{g_1 g_2} - \left(1 - \sum_r x_{g_1 g_2 r}^{zkar}\right) \cdot K_M \leq D_{g_2}, \quad \forall g_1, g_2 \in I \quad (4.11)$$

$$D_{g_1} + d_{g_1 g_2} \cdot \sum_r x_{g_1 g_2 r}^{zkar} \leq d^{max}, \quad \forall g_1 \in I; \quad \forall g_2 \in J \quad (4.12)$$

$$\sum_j x_{ij}^{zkv} = 1, \quad \forall i \quad (4.13)$$

$$\sum_i q_i^k x_{ij}^{zkv} \leq k_j^v, \quad \forall j \quad (4.14)$$

$$x_{g_1 r}^{zknr} + x_{g_2 r}^{zknr} - x_{ij}^{zkv} \leq 1, \quad \forall i, j, r, g_1 \in I; g_2 \in J; g_1 = i; g_2 = j \quad (4.15)$$

$$x_{ij}^{zkv} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j \quad (4.16)$$

$$D_g \geq 0, \quad \forall g \quad (4.17)$$

$$x_{g_1 g_2 r}^{zkar}, x_{g_1 r}^{zknr} \in \{0, 1\}, \quad \forall g_1, g_2, r \quad (4.18)$$

Daten:

- c_j^{var} Variable Umschlagskosten am Depot j [GE / ME]
- $c_{g_1 g_2}^{ka}$ Fahrkosten bei Benutzung der Strecke $g_1 - g_2$ [GE]
- $x_{g_1 g_2 r}^{zkar}$ Verwendung der Strecke $g_1 - g_2$ auf der Route r
- x_{ij}^{zkv} Zuordnung von Kunde i zu Depot j
- q_i^k Nachfrage von Kunde i [ME]
- $x_{g_1 r}^{zknr}$ Zuordnung von Knoten g zur Route r
- k_r^r Fahrzeugkapazität auf einer Route r [ME]

- d^{max} Maximale Fahrleistung eines Auslieferungsfahrzeugs [EE]
- K_M Genügend große Zahl, $K_M \geq d^{max}$
- D_g Kumulierte Distanz bis zum Knoten g [EE]
- k_j^v Umschlagskapazität von Depot j [ME]⁶⁵

In dem vorgestellten MDVRP werden die im Modell von Bruns berücksichtigten Restriktionen

- maximale Fahrleistung eines Auslieferungsfahrzeugs (Gleichung (4.12)),
- Umschlagskapazität (Gleichung (4.14)) und
- variable Umschlagskosten

nicht betrachtet, so dass die Nebenbedingungen (4.12) und (4.14) vernachlässigt werden können.

Zur Lösungsfindung werden meistens Heuristiken eingesetzt, die sich für das MDVRP in Simultan- und Sukzessivverfahren unterteilen lassen⁶⁶. Bei kleinem Umfang der Modellgrößen (Instanzen) können auch exakte Verfahren wie das Branch- & Bound- Verfahren eingesetzt werden⁶⁷.

4.3 Das Modell: LRP

Das von Prins et al. 2007⁶⁸ als CLRP bezeichnete Modell ist eines der verbreiteten in der Literatur und wird an dieser Stelle näher erläutert. Auch ohne die Bezeichnung „Multi Depot“ verwendet dieser Ansatz mehrere Depots. Es handelt sich um ein gewichtetes, gerichtetes Netzwerk mit homogenen, kapazitätsbeschränkten Transportmitteln. Das Modell bestimmt, welches Depot eröffnet wird, die Zuordnung der Kunden zu den Depots und die Routen der Fahrzeuge, um alle Kunden zu erreichen. Die Gesamtkosten als Summe aus Fixkosten für Depots und Fahrzeuge und aus variablen Transportkosten sollen minimiert werden.

Dem Modell liegen folgende, zusätzliche Annahmen zugrunde:

- Jede Nachfrage d_j wird von genau einem Fahrzeug bedient,
- Jede Route startet und endet am gleichen Depot und darf nicht die Fahrzeugkapazität überschreiten,

⁶⁵Vgl. Bruns A.D. (1998): S.41ff [15]

⁶⁶Vgl. Domschke W. (1997): S.255 [27]

⁶⁷Vgl. Domschke W. (1997): S.1 [27]; Vahrenkamp R. et al. (2007): S.50-53 [93]; Zimmermann H.-J. (2008): S.252-254 [99]

⁶⁸Vgl. Prins C. et al. (2007): S.471f [69]; Duhamel C. et al. (2010): S.1913 [32]

- Die dem jeweiligen Depot zugeordneten Routen dürfen in der Summe die Kapazität des Depots nicht überschreiten.

Es werden drei binäre Variablen für dieses Modell verwendet:

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{wenn Fahrzeug } k \text{ die Kante } i \text{ zu } j \text{ benutzt} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

$$\gamma_i = \begin{cases} 1, & \text{wenn an Standort } i \text{ ein Depot errichtet wird} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

$$f_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{wenn Kunde } j \text{ dem Depot } i \text{ zugeordnet wird} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

Die mathematische Modellierung beschreibt ein Minimierungsproblem:

$$\text{Minimiere } z = \sum_{i \in I} O_i y_i + \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} c_{ij} x_{ijk} + \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{i \in J} F x_{ijk} \quad (4.19)$$

unter Berücksichtigung der Restriktionen/Nebenbedingungen:

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in V} x_{ijk} = 1, \quad \forall j \in J \quad (4.20)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{i \in V} d_j x_{ijk} \leq Q, \quad \forall k \in K \quad (4.21)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ijk} - \sum_{j \in V} x_{jik} = 0, \quad \forall k \in K, \forall i \in V \quad (4.22)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ijk} \leq 1, \quad \forall k \in K \quad (4.23)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ijk} \leq |S| - 1, \quad \forall S \subseteq J; \quad \forall k \in K \quad (4.24)$$

$$\sum_{u \in J} x_{iuk} + \sum_{u \in V \setminus \{j\}} x_{ujk} \leq 1 + f_{ij}, \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J, \quad \forall k \in K \quad (4.25)$$

$$\sum_{j \in J} d_j f_{ij} \leq W_i y_i, \quad \forall i \in I \quad (4.26)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in V, \quad \forall j \in V, \quad \forall k \in K \quad (4.27)$$

$$y_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I \quad (4.28)$$

$$f_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J \quad (4.29)$$

Daten:

- V Menge der Knoten (inkl. Kunden und mögliche Depots)
- c_{ij} Fahrkosten bei Benutzung der Strecke von Knoten i zu j
- F Fixkosten pro Fahrzeug
- Q Fahrzeugkapazität
- K Anzahl der Fahrzeuge
- d_j Nachfrage des Kunden j
- W_i Kapazität des Depots i
- O_i Eröffnungskosten für Depot i
- I Anzahl der möglichen Standorte
- J Anzahl der Kunden

Gleichung (4.19) summiert die Eröffnungskosten der Depots, Fixkosten der Fahrzeuge und die gesamten variablen Transportkosten. Durch Gleichung (4.20) wird garantiert, dass jeder Kunde zu genau einem Depot zugeordnet wird und nur einen direkten Vorgänger hat, er also nur von einem Fahrzeug beliefert wird. Die Kapazitätsrestriktionen werden durch die Gleichungen (4.21) und (4.26) umgesetzt. Die Kontinuität der Routen und die Bedingung gleicher Start- und Endpunkte werden mit den Gleichungen (4.22) und (4.23) festgesetzt. Gleichung (4.24) sorgt für die Eliminierung von Subtours und Gleichung (4.25) prüft, dass ein Kunde nur dann einem Depot zugeordnet werden kann, wenn auch eine existierende Verbindung zwischen Depot und Kunde vorhanden ist. Die abschließenden Gleichungen (4.27), (4.28) und (4.29) geben die möglichen Boolean-Werte der Entscheidungsvariablen an⁶⁹. Andere Modellierungen beschreiben zum Beispiel Belenguer et al. oder Baldacci et al⁷⁰.

⁶⁹Vgl. Prins C. et al. (2007): S.472 [69]

⁷⁰Vgl. Belenguer J.-M. et al. (2011): S.932 [11]; Baldacci R. et al. (2011): S.1285ff [9]

Kapitel 5

Periodisches Location-Routing Problem (PLRP)

Eine zusätzliche strategische Erweiterung eines LRP ist die Berücksichtigung mehrerer Planungsperioden, welche das PLRP darstellt. Jedoch ist das PLRP in der Literatur nicht annähernd so weit verbreitet wie seine Urform, das LRP. Am Einfachsten zu beschreiben ist das PLRP als eine Kombination aus LRP und PVRP⁷¹. Die periodische Tourenplanung (PVRP) ist eine einfache Erweiterung des klassischen VRP, bei der Kunden über einen bestimmten Planungshorizont mehrmals beliefert werden müssen und nicht wie gewöhnlich nur an einem Tag, wie es bei VRP der Fall ist⁷². Periodische Probleme zerlegen den Planungshorizont in mehrere Perioden. Innerhalb dieses Horizonts bestehen meistens Unsicherheiten in Bezug auf die Kundennachfrage. Gegenüber einperiodischen LRP eignet sich diese Variante viel besser im Hinblick auf realitätsnahe logistische Probleme.

5.1 Perioden in der Optimierung

Eine Periode beschreibt eine Dauer von unbekannter Anzahl an Tagen⁷³. So kann je Branche oder Anliegen, die Zahl der Tage von zwei bis X definiert werden. Dabei liegt die Schwierigkeit darin, Touren für jeden einzelnen Tag dieser X -Tage Periode zu bestimmen, wobei auch ein Kunde während dieser Dauer öfters beliefert werden kann⁷⁴. Diese Tourenfindung ist genau wie das VRP selbst NP-hart. Das Hauptziel ist auch hierbei, die Gesamtkosten aller Touren innerhalb dieses Periodenhorizontes zu minimieren. Diese Restriktion wurde historisch in der Logistik noch nicht lange wissenschaftlich untersucht und besitzt

⁷¹Vgl. Pirkwieser S. et al. (2010): S.1ff [68]

⁷²Ebenda

⁷³Vgl. Christofides N. et al. (1984): S.237ff [16]

⁷⁴Ebenda

daher in der Literatur nicht so eine Präsenz wie andere (Neben-) Bedingungen.

Die Anfänge der publizierten literarischen Werke zum Thema „Perioden“ in Betrachtung der Routenprobleme gehen zurück in die Anfangsjahre der 1970-er. Beltrami und Bodin (1974) und Russel und Igo (1979) entwickelten Heuristiken, die eigentlich zur Bestimmung eines VRP vorgesehen waren und erwähnten dabei die Möglichkeiten auf eine periodisierte Sichtweise⁷⁵. Erst Mitte der Achtziger Jahre wurde PVRP genauer erläutert. Dabei ist wesentlich die Arbeit von Christofides und Beasley (1984) zu erwähnen, in der sie als Hauptbestandteil ein heuristisches Modell zur Lösung von „Periodic Vehicle Routing Problem“ (PVRP) herleiten. Sie gehen vom Grundproblem des VRP aus und erweitern dieses um den Gedanken der Perioden. Ungefähr zur gleichen Zeit brachten Tan und wiederum Beasley (1984) eine Definition über einen Algorithmus zur Lösung eines PVRP heraus⁷⁶. Diese beiden Beiträge legten den Grundstein zur Erforschung der logistischen Probleme mit Blickpunkt auf die Periodisierung. Cordeau, Gendreau und Laporte stellten 1997 ein heuristisches Modell vor⁷⁷, welches eine Modifikation hinsichtlich unausführbarer Zwischenergebnisse während der Suchphase beinhaltet und sich so bis heute von den meisten der restlichen Modelle abgrenzt. Eine Fallstudie zum Thema PVRP im Bereich der Müllentsorgung schrieben Coene, Arnout und Spijksma (2008)⁷⁸, in der nach einer sorgfältigen Beschreibung des Problems, ein komplexes mathematisches Modell vorgestellt wird. Eine Kombination von PVRP und LRP fand in der Arbeit von Prodhon (2007) statt, die somit die Periodisierung zum Thema LRP definierte und das PLRP entstand. Prodhon beschäftigte sich weiter mit diesem Thema und entwickelte zusammen mit Prins (2008)⁷⁹ und in Eigenarbeit (2009)⁸⁰ Algorithmen und Metaheuristiken zur Lösung des PLRP. Dabei kombinierte sie einen Algorithmus mit den Bedingungen des „Population Management“, um brauchbare Ergebnisse für eine optimale Lösung des PLRP zu finden.

5.2 Eine iterative Metaheuristik für das PLRP von Prodhon

Prodhon (2007)⁸¹ war die Erste, die für das kombinierte Problem aus LRP und PVRP eine realistische Lösung hergeleitet hat. Ihre Lösung stellt eine Metaheuristik dar, welche versucht, das Problem global zu betrachten, indem diese mehrere Entscheidungsebenen,

⁷⁵Vgl. Tan C. et al. (1984): S.497ff [89]

⁷⁶Vgl. Angelelli E. et al. (2002): S.233ff [5]

⁷⁷Vgl. Cordeau J.F. et al. (1997): S.105ff [22]

⁷⁸Vgl. Coene S. et al. (2008): S.1-15 [20]

⁷⁹Vgl. Prodhon C. et al. (2008): S.43ff [72]

⁸⁰Vgl. Prodhon C. (2009): S.15ff [73]

⁸¹Vgl. Prodhon C. (2007): S.159 [71]

während der Lösungskonstruktion, berücksichtigt. Das Ziel im Hinblick auf die Minimierung der Gesamtkosten ist es, herauszufinden, welche Depots geöffnet werden sollen, welche Kombination von Auslieferungstagen den Kunden zugeordnet werden sollen und welche Routen gefahren werden sollen⁸². Ist erst einmal ein Bedarf für einen Kunden bekannt und seine gewünschte Belieferungshäufigkeit, so werden diesem feste Auslieferungstage, die auch eingehalten werden müssen, zugewiesen.

5.2.1 Ausgangslage und Restriktionen des PLRP

Das PLRP ist in einem Horizont H und einem kompletten und gewichteten Netzwerk $G = (V, E, C)$ definiert. V ist eine Menge von Knoten, bestehend aus einer Menge I von m möglichen Depotstandorten und einer Menge $J = V \setminus I$ von n Kunden. c_{ij} stellt die Transportkosten zwischen zwei beliebigen Knoten i und j dar. Eine Kapazität W_i und Eröffnungskosten O_i sind jedem Depot $i \in I$ zugeordnet. Jeder Kunde $j \in J$ muss mit einer gegebenen Frequenz in H bedient werden und dabei ist $Comb_j$ die Menge der möglichen Auslieferungstage. Desweiteren ist d_{jlr} die Bestellung von Kunde j an einem Tag l von $r \in Comb_j$ Kombinationen. Eine Anzahl K von identischen Fahrzeugen mit der Kapazität Q ist jeden Tag verfügbar. Jedes in H mindestens einmal benutzte Fahrzeug verursacht Fixkosten F und darf höchstens eine Route pro Tag abfahren. Folgende Restriktionen sind dabei einzuhalten:

- Jeder Kunde j muss und darf ausschließlich an Tagen l aus einer Kombination $r \in Comb_j$ von genau einem Fahrzeug mit der Bestellmenge d_{jlr} beliefert werden.
- Die Anzahl an Routen, die pro Tag gefahren wird, darf N nicht überschreiten.
- Jede Route muss innerhalb eines Tages in dem gleichen Depot enden, von dem diese auch gestartet ist. Des Weiteren darf die transportierte Menge Q nicht überschreiten.
- Die Gesamtladung aller Routen, die einem Depot an jedem Tag $l \in H$ zugeteilt sind, darf die jeweilige Depotkapazität ebenfalls nicht überschreiten⁸³.

5.2.2 Vorgehensweise zur Lösung eines PLRP

Der erste Schritt zur Lösung eines PLRP mit Hilfe der iterativen Metaheuristik ist die Bestimmung geeigneter Standorte. Die Standortauswahlphase des hierfür verwendeten Algorithmus beginnt mit der Betrachtung eines fiktiven Tages, an dem alle Kunden beliefert werden müssen. Die identischen Depots die hierbei gewählt werden, müssen über den

⁸²Vgl. Prodhon C. (2007): S.160 [71]

⁸³Ebenda

gesamten Planungshorizont H geöffnet bleiben. Aus diesem Grund sollten diese Depots entsprechend der Kundenmenge und Kundenverteilung J ausgewählt werden. Des Weiteren wird eine fiktive Kapazität $W_i \times IHI$ jedem Depot $i \in I$ zugeteilt. Die Bestellmenge eines jeden Kunden j wird als seine Gesamtbestellmenge dividiert durch seine Belieferungshäufigkeit, in H , gesehen. Das aus dieser Sichtweise entstehende Problem ist ein LRP an dem fiktiven Tag, welches mit Hilfe des *RECWA* gelöst wird. Dies ist eine Form des klassischen *Clarke-and-Wright Algorithmus*⁸⁴, welcher bei der Lösungsfindung bei LRP zur Anwendung kommt. Die dabei in der bestmöglichen Lösung enthaltenen Depotstandorte werden während dem Durchlaufen der iterativen Heuristik offen gehalten. Ist erstmals eine gewisse Anzahl an Depots geöffnet, wird es zum Ziel, eine umsetzbare Lösung für das PLRP zu konstruieren, indem jeder Kunde einer Besuchskombination und einem Depot, unter Berücksichtigung des Routenaspekts, zugeordnet wird. Die Kundenzuordnungen aus der vorherigen Lösung des fiktiven LRP stellen dabei eine gute Grundbasis dar. Diese sind ebenfalls vielversprechende Lösungsmöglichkeiten für das PLRP, falls deren Belieferungstage diese Kombinationen zulassen. Alle Kombinationsmöglichkeiten von Kunden und Depots werden absteigend nach ihrer Übereinstimmungsfrequenz in einer Liste L geführt.

Der nächste Schritt ist diese Liste zu durchlaufen bis alle Kunden einer, für das PLRP passenden, Kombination zugeteilt sind oder die komplette Liste abgefertigt ist. Sollte die daraus entstehende Lösung einen oder mehrere Kunden nicht einbeziehen, werden für diese Extra-Routen angelegt, mit dem Ziel, die Kosten minimal zu halten⁸⁵. Zu diesem Zeitpunkt ergibt sich ein Standard VRP für jeden einzelnen Tag. Ab jetzt hilft eine verstärkte Konzentration auf die Tourenplanung, die bis dahin besten Lösungen aus den vorherigen Schritten meistens noch einmal zu verbessern. Erneut wird ein *RECWA* angewendet, diesmal folgt anschließend ein *Local-Search* (LS). Unter LS wird ein Algorithmus gesehen, der eine Möglichkeit nach der anderen durchläuft bis ein Optimum gefunden ist oder eine vorher festgelegte Zeit verstrichen ist. Eine Lösung wird immer dann ausgewählt und angenommen, wenn diese besser ist als alle ihr vorangegangenen Lösungen. Dieses Schema wiederholt sich mehrere Male, was eine iterative Heuristik ausmacht.

Prodhon schlägt des Weiteren vor, dass der LS der für jeden einzelnen Tag durchlaufen wird, zusätzlich mit zwei weiteren LS, welche sich über den ganzen Planungshorizont erstrecken und diesen durchlaufen, kombiniert werden sollte. Der erste dieser beiden soll Besuchskombinationen und damit verbundene Kundenkombinationen erarbeiten. Das Ganze geschieht unter Berücksichtigung der gegebenen Restriktionen mit dem Ziel, die vorherigen Routenkosten zu reduzieren. Der zweite LS versucht die Anzahl der Fahrzeuge, die einem Depot zugeordnet sind, zu minimieren, weil dies Fixkosten und auch Wartungskosten ver-

⁸⁴Vgl. Clarke G. et al. (1964): S.568ff [18]

⁸⁵Vgl. Prodhon C. (2007): S.160f [71]

ursachen. Nach diesen Schritten wäre der Lösungsansatz von Prodhon abgeschlossen⁸⁶.

Die vorgestellte iterative Metaheuristik von Prodhon stellt den ersten Lösungsansatz für ein PLRP da. Getestet wurde diese Methode anhand drei unterschiedlicher Kundenszenarien mit bis zu jeweils 200 Kunden. Die hierbei entstandenen Ergebnisse zeigen, dass diese Metaheuristik gute Lösungen innerhalb akzeptabler Zeit, für das PLRP liefert⁸⁷.

⁸⁶Vgl. Prodhon C. (2007): S.161f [71]

⁸⁷Vgl. Prodhon C. (2007): S.163 [71]

Kapitel 6

Instanzen für neue Problemklassen

6.1 Definition und Abgrenzung

Instanzen sind im Operations Research konkrete Beispielprobleme für kombinatorische Optimierungsprobleme und enthalten je nach Problemklasse verschiedene Informationen. Instanzen bestehen aus den Eingangsdaten und, falls vorhanden, der optimalen Lösung, sowie der für die Lösung benötigten Rechenzeit. Instanzen können unterschiedlich groß und schwierig sein; Größere Instanzen sind nicht zwingend schwieriger als die Kleineren. Der Schwierigkeitsgrad hängt von der Parameterkonstellation ab.

Instanzen werden hauptsächlich dazu genutzt, Algorithmen, Heuristiken und diverse Lösungsansätze zu testen und zu überprüfen. Somit sind Instanzen für die Entwicklung neuer Lösungswege extrem wichtig.

Für die meisten bekannten kombinatorischen Optimierungsproblemen, z.B. das Traveling Salesman Problem (TSP)⁸⁸ oder eben für das Location-Routing Problem (LRP)⁸⁹, gibt es unzählige sogenannte Instanzbibliotheken bzw. Instanzsammlungen. In diesen Instanzbibliotheken werden die Instanzen nach Problemklassen und Instanzgrößen aufgelistet. Unter den Instanzen gibt es sogenannte *Benchmark-Instanzen*, welche unter Wissenschaftlern bekannt sind und oft benutzt werden. Solche Benchmark-Instanzen werden für die Forschung neuer Algorithmen häufig angewendet. Es gibt jedoch einige Problemklassen, vor allem neue, für die es noch keine solchen Bibliotheken gibt, so dass man vorhandene Instanzen für die eigene Problemstellung modifizieren oder eigene Instanzen generieren muss.

Wie bereits oben ausgeführt, besteht der Planungshorizont beim PLRP aus mehreren Perioden. Eine Periode kann wiederum aus mehreren Tagen bestehen. Wenn man mehrere Perioden betrachtet, entsteht eine Unsicherheit bezüglich verschiedener Parameter. Unter

⁸⁸<http://comopt.ifi.uni-heidelberg.de/software/TSPLIB95/> [105]

⁸⁹http://sweet.ua.pt/~iscf143/_private/SergioBarretoHomePage.htm [106]

anderem kann sich die Anzahl der Kunden sowie derer Nachfragen oder Koordinaten ändern. Die Nachfrage kann sich verändern z.B. durch den Markteintritt eines Konkurrenten im selben Gebiet.

Aufgrund solcher Veränderungen kann es, aus Kostengründen, ratsam sein, ein weiteres Depot zu öffnen oder ein bestehendes zu verlagern. So eine Umstrukturierung würde zusätzliche Kosten verursachen, die nicht außer Acht gelassen werden dürfen. Für jede Periode müssen die Touren angepasst werden, da womöglich die Kapazität der Fahrzeuge nicht mehr ausreicht oder die Kapazität der Depots nicht ausgeschöpft bzw. nicht optimal ausgelastet wird. Und falls diese Veränderungen signifikant sind, müssen die Depots auch dementsprechend angepasst werden⁹⁰.

Das PLRP wird dadurch dynamisch, dass am Anfang jeder Periode die Routen neu konfiguriert werden und, falls nötig, auch die Standorte der Depots verändert werden müssen. Dies geschieht nur dann, wenn sich die Nachfrage oder andere Parameter signifikant ändern. Deshalb wird diese Art des mehrperiodigen LRP auch *Dynamic Location Routing Problem* (DLRP) genannt.

Das PLRP ist zwar komplizierter als das normale LRP, dafür aber näher an der Realität, da das LRP nur eine Periode betrachtet. Das PLRP kann auch weitere Einschränkungen beinhalten und sich auch mit anderen Problemen vermischen, wie z.B. durch vorgegebene Zeitfenster für die Lieferungen (*PLRP with Time Windows*).

Um die benötigten Instanzen zu generieren, muss zuerst definiert werden, welche Informationen relevant sind und für das Lösen des PLRP benötigt werden:

- Koordinaten (x, y) der möglichen Depots
- Anzahl der möglichen Standorte der Depots J
- Koordinaten (x, y) der Kunden
- Anzahl der Kunden I
- Kosten für das Eröffnen eines Depots
- Kosten für das Schließen eines Depots
- Fixe Kosten der geöffneten Depots
- Anzahl der Fahrzeuge
- Kapazität der Fahrzeuge
- Kapazität der Depots
- Fixe Kosten für die eingesetzte Fahrzeuge

⁹⁰Vgl. Laporte G. et al. (1989): S.471ff [54]

- Kosten für den Transport (Vereinfachung: Hierbei kann es sich um einen fixen Kostensatz für jedes gefahrene Kilometer handeln)
- Nachfrage der einzelnen Kunden
- Anzahl der Perioden, die im Planungshorizont betrachtet werden
- Anzahl der Tage, aus denen eine Periode besteht

In den Instanzen werden hauptsächlich keine Entfernungen angegeben, sondern Koordinaten. Wenn man nun die Entfernung zwischen zwei Punkten A und B benötigt, dann muss die Euklidische Entfernung herangezogen werden

$$S_{AB} = \sqrt{(X_A - X_B)^2 / (Y_A - Y_B)^2} \quad (6.1)$$

Für die Transportkosten wird die Vereinfachung angenommen, dass es sich um ein symmetrisches Problem handelt und dass Kostenabweichungen aufgrund verschiedener Geschwindigkeiten (z.B. durch das Befahren von Autobahnen) oder topografische Beschaffenheit (z.B. bergisches Gebiet) nicht stattfinden. Es wird von einem homogenen Transportkostensatz pro gefahrenem Kilometer ausgegangen, der für alle Fahrzeuge gleich ist.

6.1.1 Andere Formen des PLRP

In einer anderen bekannten Betrachtungsweise des PLRP spielen die Lieferungshäufigkeiten eine besondere Rolle. Innerhalb einer Periode, welche bekanntlich aus mehreren Tagen besteht, wünschen sich die Kunden, dass ihre Nachfragen an mehreren Tagen befriedigt werden⁹¹, wobei die Anzahl der Lieferungen nicht größer sein kann als die Anzahl der Tage aus denen die Periode besteht.

Bei solchen PLRPs besteht eine Periode üblicherweise aus einer Woche, also aus sieben Tagen. Als besondere Einschränkung kann auch zwischen produktiven und unproduktiven Tagen unterschieden werden. Dies würde bedeuten, dass eine Periode sieben Tage, fünf produktive (Werktage) und zwei unproduktive (Wochenende), beinhaltet.

Man könnte vereinfacht annehmen, dass es für den Kunden gleichgültig ist, an welchen Tagen die Lieferungen erfolgen, solange sie innerhalb der Perioden stattfinden und sich an die gewünschte Anzahl halten. Für den Lieferanten jedoch könnte es aus Kostengründen nicht unerheblich sein, an welchen Tagen seine Lieferungen beim Kunden ankommen. So kann der Lieferant bestimmte Lieferungskombinationen vorgeben (s. Tabelle (6.1)).

Ein besonderes Merkmal dieser Betrachtungsweise des PLRP besteht darin, dass die Perioden als zyklisch verstanden werden. Dies bedeutet, dass die Angaben aus einer Peri-

⁹¹Vgl. Prodhon C. (2007): S.160 [71]

ode für alle weiteren Perioden gelten. Deshalb würden die Instanzen eines solchen PLRP nur die Daten einer Periode enthalten. Durch diese Annahme wird ein solches PLRP zu einem statischen Problem, da jede Dynamik durch die fehlende Neuberechnung der Touren und der Standorte in jeder Periode verloren geht.

Häufigkeit	Kombination der Lieferungstage
1	Montag Dienstag Mittwoch Donnerstag Freitag
2	Montag - Mittwoch Montag - Donnerstag Dienstag - Freitag
3	Montag - Mittwoch - Freitag

Tabelle 6.1: Mögliche Lieferungskombinationen⁹²

In der Forschung hat sich in den letzten Jahren Caroline Prodhon besonders intensiv mit den Lösungsansätzen des PLRP beschäftigt⁹³.

6.1.2 Periodic-Location-Routing Problem vs. Dynamic-Location-Routing Problem

Das oben bereits definierte PLRP unterscheidet sich vom DLRP dadurch, dass das DLRP von zyklischen Perioden ausgeht. Demzufolge wiederholt sich die Nachfrage bei jeder Periode, so dass keine Veränderungen vorgenommen werden und es somit ein statisches Problem ergibt. Außerdem können im DLRP mehrere Lieferungen an einem Kunden innerhalb einer Periode erfolgen. Der Grund dafür ist, dass sich die Kunden eine bestimmte Häufigkeit an Lieferungen wünschen. Besonders intensiv beschäftigt sich Caroline Prodhon mit diesem Problem. Entsprechende Instanzen sowie Veröffentlichungen befinden sich auf ihrer Homepage⁹⁴.

Obwohl das DLRP und das PLRP mehrere Perioden betrachten, haben beide unterschiedliche Schwerpunkte und sollten als zwei eigenständige Probleme betrachtet werden.

⁹²Caroline Prodon: <http://prodhonc.free.fr/homepage>, Zugriff am 24.11.2014 [107]

⁹³Vgl. Prodhon C. (2007) [71]; Prodhon C. et al. (2008) [72]; Prodhon C. (2009) [73]

⁹⁴Caroline Prodon: <http://prodhonc.free.fr/homepage>, Zugriff am 24.11.2014 [107]

6.2 Instanzen erstellen

Um neue Instanzen erstellen zu können, sind verschiedene Ansätze möglich:

- Modifizieren von bestehenden Instanzen,
- Generieren von neuen Instanzen,
- Anhand von realen Daten.

6.2.1 Modifizieren von bestehenden Instanzen

Wenn man Instanzen aus verwandten Problemen betrachtet, erkennt man, dass diese teilweise nützlich sein könnten für die eigene Problemstellung. Da das PLRP sich aus dem LRP ableitet, und dieser wiederum aus zwei Problemstellungen besteht, nämlich aus dem Location-Allocation Problem und aus dem Vehicle-Routing Problem, sollten die Instanzen der drei Probleme untersucht werden.

LRP-Instanzen

Die Instanzen des LRP sind meistens in Daten bezüglich der Kunden und der Depots zweigeteilt. In den Kundendaten sind normalerweise die Koordinaten und die Nachfragen der Kunden enthalten. Die Depotdaten beinhalten die Koordinaten, die Kapazität sowie fixe und variable Kosten der möglichen Depots. Die LRP-Instanzen enthalten also die wichtigsten Informationen für die Standortplanung. Für die Daten der Kunden sind die LRP-Instanzen nur teilweise nützlich, da sie nur die Nachfragen von einer Periode enthalten.

LAP-Instanzen

Das Location-Allocation Problem beschäftigt sich hauptsächlich mit den Depots. Da aber die dazu benötigten Daten bereits in den LRP-Instanzen drin sind, sind die LAP-Instanzen nicht von Belangen.

VRP-Instanzen

Da es beim VRP üblicherweise nur ein festes Depot gibt, betreffen die meisten Daten die der Kunden. Sie beinhalten normalerweise die Anzahl der Kunden sowie deren Koordinaten, die Anzahl der Fahrzeuge und die Nachfrage der Kunden. Da es für das VRP mehrere Erweiterungen, und somit mehrere Variationen gibt, werden auch diese untersucht.

Unter anderem gibt es folgende Spezialfälle des VRP⁹⁵:

- *Capacitated VRP (CVRP)* - Die Fahrzeuge haben alle eine bestimmte Kapazität. Beim *Uncapacitated VRP* hingegen haben die Fahrzeuge eine unendliche Kapazität.

⁹⁵Vgl. <http://neo.lcc.uma.es/radi-aeb/WebVRP/> [108]; Toth P. et al. (2002): S.6, Bild 1.1. [92]

- *Split Delivery VRP (SDVRP)* – Derselbe Kunde darf durch mehrere Fahrzeuge beliefert werden.
- *Stochastic VRP (SVRP)* – Eine oder mehrere Angaben sind stochastisch, d.h. sind nicht deterministisch und können somit nicht konkret angegeben werden. Beispiele hierfür sind, die Anzahl der Kunden oder die Nachfrage der einzelnen Kunden.
- *VRP with Backhauls (VRPB)* – Nachdem die von einem Fahrzeug zu beliefernde Kunden versorgt wurden, werden auch Abholungen beim Kunden vorgenommen.
- *VRP with Pick-Up and Delivering (VRPPD)* – Es werden sowohl Lieferungen als auch Abholungen beim Kunden vorgenommen.
- *VRP with Time Windows (VRPTW)* – Der Kunde muss innerhalb eines vorgegebenen Zeitintervalls beliefert werden.
- *Periodic VRP (PVRP)* – Es werden mehrere Perioden in Betracht gezogen.
- *Dynamic VRP (DVRP)* – Die Nachfrage ist stochastisch und wird erst bei der Auftragerfassung bekannt.

Relevant für die gesuchte PLRP Instanz ist das PVRP. Hier gelten auch verschiedene Perspektiven und Herangehensweisen. Wie beim PLRP besteht der Planungshorizont üblicherweise aus mehreren Perioden, die wiederum aus mehreren Tagen bestehen können. Die Instanzen des PVRP enthalten die Anzahl der Fahrzeuge sowie deren Kapazität, die Anzahl der Tage, aus denen eine Periode besteht und die Anzahl der Kunden sowie deren Koordinaten und Nachfragen.

Beim PVRP mit zyklischen Perioden und mehreren Lieferungen pro Periode wünschen sich die Kunden eine bestimmte Anzahl an Lieferungen pro Periode, welche kleiner oder gleich groß sind, wie die Anzahl der Tage, aus denen eine Periode besteht. In diesem Fall beinhalten die Instanzen zusätzlich die gewünschte Lieferungshäufigkeiten. Da die Perioden jedoch zyklisch sind, ändern sich die Nachfragen nicht, so dass man die Nachfragen von mehreren gleichgroßen Instanzen benutzen muss.

Aus den Instanzen des LRP und der PVRP lassen sich nun alle benötigten Informationen für das PLRP herleiten.

6.2.2 Eine PVRP Instanz

Bei diesem Beispiel handelt es sich um eine zyklische Periode. Um die fehlenden Nachfragen, die für in dieser Arbeit benötigte Instanzen heranzukommen, brauchen wir n gleichgroße Instanzen (in diesem Fall aus 100 Kunden), wobei n gleich groß ist, wie die Anzahl der Perioden, die im Planungshorizont enthalten sind.

Zeile	Beschreibung der Spalten	Instanz
I	Problemtyp: 1=PVRP; Anzahl der Kunden	1 100
II und III	Maximale Dauer einer Tour (beim PVRP belanglos); Maximale Kapazität eines Fahrzeugs für einen Tag	0 200 0 200
ab IV	Nummerierung der Kunden (0=Depot, und daher irrelevant); X-Koordinate; Y-Koordinate; Belieferungsdauer (Nur bei PVRP with Time Windows wichtig); Nachfrage	0 35 35 0 0 1 41 49 0 10 2 35 17 0 7 3 55 45 0 13

Tabelle 6.2: Auszug einer PVRP Instanz (Eigene Abbildung)

6.2.3 Eine LRP Instanz

Depotnummer	X-Koordinate	Y-Koordinate	Kapazität	Fixe Kosten
1	10	49	10000	40
2	20	30	10000	40
3	5	25	10000	40

Kunden:

X-Koordinaten	Y-Koordinaten	Nachfrage
41	49	10
35	17	7
55	45	13
...

Tabelle 6.3: Auszug einer LRP Instanz Christofides69-50x5-Dept (Eigene Abbildung)⁹⁶

Durch das Kombinieren von LRP- und PVRP-Instanzen lassen sich alle wichtigen Informationen für das PLRP gewinnen. Es muss dennoch darauf geachtet werden, dass die Kapazität der Fahrzeuge größer sein muss als die höchste Nachfrage der Kunden.

Als Beispiel werden die oben genannten Instanzen (Tabelle (6.2) und Tabelle (6.3)) zusammengetragen, um eine PLRP Instanz mit einem Planungshorizont von einer Periode zu erzeugen.

⁹⁶http://sweet.ua.pt/~iscf143/_private/SergioBarretoHomePage.htm [106]

Erzeugte PLRP Instanz:

Wenn man noch zusätzliche Informationen braucht, lassen sich diese aus den entsprechenden VRP-Instanzen herleiten. Beispielsweise, wenn man eine Instanz für ein PLRP *with Time Windows* braucht, könnte man die Instanzen aus einem PVRP *with Time Windows* nutzen.

Allgemeine Daten:

Anzahl der Perioden	5
Anzahl der Depots	5
Anzahl der Kunden	100
Anzahl der Fahrzeuge	4
Kapazität der Fahrzeuge	200

Depots:

X-Koordinaten	Y-Koordinaten	Kapazität	Fixe Kosten
10	49	10000	40
20	30	10000	40
5	25	10000	40
...

Kunden:

X-Koordinaten	Y-Koordinaten	Nachfrage
41	49	10
35	17	7
55	45	13
...

Tabelle 6.4: Auszug einer PLRP Instanz (Eigene Abbildung)

Diese Methode eignet sich am besten bei Instanzen für neue Erweiterungen oder Weiterentwicklungen von Hauptproblemen, z.B. für eine neue Erweiterung des LRP respektive PLRP.

6.3 Instanzen generieren

Um eine neue Instanz zu generieren, muss zuerst definiert werden, welche Informationen *exogen* und welche *endogen* sind. Auch der Definitionsbereich der einzelnen Variablen muss definiert werden. Als Beispiel wird eine kleine PLRP Instanz generiert.

6.3.1 Exogene Variablen

Exogene Variablen sind jene Variablen, die unabhängig sind und andere Variablen beeinflussen. Durch die exogenen Variablen wird die Größe der Instanz vorgegeben. Exogene Variablen sind demzufolge die Anzahl der Depots, Kunden und der verfügbaren Fahrzeuge, sowie die Anzahl der Perioden, die im Planungshorizont betrachtet werden.

Planungshorizont

Der Planungshorizont ist eine der wichtigsten Informationen des PLRP, da es ein besonderes Merkmal ist. Da eine PLRP Instanz als eine Matrix aus dem Planungshorizont und der Anzahl der Kunden dargestellt wird, ist die Größe des Planungshorizonts von enormer Bedeutung. Für das folgende Beispiel wird einen Planungshorizont von fünf Perioden gewählt.

Anzahl der Kunden

Wie der Planungshorizont ist die Anzahl der Kunden für die Größe der Instanz sehr wichtig. Die nachfolgende Beispielinstantz wird aus zehn Kunden bestehen.

Anzahl der Depots

Durch die Anzahl der Depots wird zwar die Größe der Instanz nicht erheblich beeinflusst, dafür aber der Schwierigkeitsgrad der Instanz. Bei einer gleich bleibenden Anzahl der Kunden steigt die Komplexität und damit die Rechenzeit bei einer wachsenden Anzahl der möglichen Depots. Als Beispiel wird eine kleine Anzahl von drei möglichen Depots betrachtet.

Fahrzeuge

Die Anzahl der maximal verfügbaren Fahrzeuge ist unbegrenzt. Hierbei handelt es sich jedoch nicht zwingend um die Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge, die erst bei der Tourenplanung errechnet wird. Je mehr verfügbare Fahrzeuge es gibt, desto flexibler und somit schwieriger zu berechnen ist die Tourenplanung.

6.3.2 Endogene Variablen

Endogene Variablen sind abhängige Variablen, dessen Ausprägung von den Exogenen Variablen bestimmt wird. Die endogenen Variablen lassen sich nach dem Zufallsprinzip automatisch generieren. Zu beachten sind lediglich die Definitionsbereiche.

Kapazitäten der Fahrzeuge

Durch das Erzeugen der Kapazitäten von Fahrzeugen wird festgelegt, ob die generierte Instanz für den Uncapacitated PLRP oder für den Capacitated PLRP bestimmt ist. Die Kapazitäten der Fahrzeuge können automatisch generiert oder, falls gewünscht, festgelegt werden. Ihnen werden üblicherweise gerundete Zahlen zugewiesen, die für alle Fahrzeuge gelten. Dies gilt nur bei der Annahme, dass es sich um eine homogene Fahrzeugflotte handelt. Handelt es sich jedoch um eine heterogene Fahrzeugflotte, müssen die Kapazitäten der einzelnen Fahrzeuge erzeugt bzw. festgelegt werden. Die Kapazität selbst muss größer als die größte Nachfrage der Kunden sein, um diese durch ein Fahrzeug abdecken zu können, und klein genug sein, um mehrere Touren zu ermöglichen. Als Beispiel wurde eine Kapazität von 100 Einheiten gewählt, die für alle Fahrzeuge gleich ist.

Transportkosten

Die Transportkosten werden traditionell mit einer Kostenfunktion beschrieben, da sie aus fixen und variablen Kosten bestehen. Die fixen Kosten fallen immer an, egal wie viel gefahren wurde. Darunter fallen unter anderem die Anschaffungskosten und Abschreibungen, sowie Instandhaltungskosten an. Die variablen Kosten hängen davon ab, wie viel gefahren wird. Darunter fallen Spritkosten sowie die Löhne für die Fahrer an. Die variablen Kosten werden in den Instanzen meistens nicht angegeben, da für das Lösen des Problems mit Strecken gerechnet, also nach dem kürzesten Weg gesucht wird. Als Beispiel werden die fixen Kosten von 5000 Geldeinheiten für jedes eingesetzte Fahrzeug und der Vollständigkeitswegen ein Transportkostensatz von 10 Geldeinheiten pro gefahrenen Kilometer gewählt.

Kundenkoordinaten

Die Koordinaten der Kunden werden nach dem Zufallsprinzip erzeugt. Es können Grenzen definiert werden, innerhalb derer sich die Kunden befinden, um z.B. einen Gebiet oder eine Stadt zu simulieren. Die Koordinatenpaare dürfen sich nicht wiederholen und müssen positiv sein. Beim Rechnen sollten die Einheiten nicht vergessen werden.

Als Beispiel werden die Koordinatenpaare 1 : [23; 32], 2 : [14; 5], 3 : [49; 15], 4 : [15; 17], 5 : [8; 39], 6 : [33; 7], 7 : [40; 40], 8 : [4; 8], 9 : [27; 14] und 10 : [38; 29] aus den Definitionsbereich $D := \{x, y \in N_0, 0 \leq x, y \leq 50\}$ erzeugt.

Falls man die Kundenkoordinaten nicht zufällig erzeugt, sondern diese anhand von Städten oder Ähnlichem definieren möchte, muss beachtet werden, dass ein richtiger Bezugspunkt gewählt werden muss, so dass sich die gewählten Koordinaten im ersten Quadranten des Koordinatensystems befinden.

Depotkoordinaten

Die Koordinaten werden zufällig generiert. Hierbei können, wie bei den Koordinaten der Kunden, Grenzen definiert werden, z.B. $0 \leq y \leq 50$. Die Koordinatenpaare dürfen sich selbstverständlich nicht wiederholen und es gelten dieselben Einschränkungen wie bei den Kundenkoordinaten.

Als Beispiel hier werden die Koordinatenpaare $A : [14; 23]$, $B : [3; 47]$ und $C : [32; 5]$ aus dem Definitionsbereich $D := \{x, y \in N_0, 0 \leq x, y \leq 50\}$ generiert.

Kapazitäten der Depots

Alle Depots können eine gleich große Kapazität oder unterschiedliche Kapazitäten haben. Für den Fall, dass ein Multi-Depot nicht erlaubt bzw. gewünscht ist, muss die Kapazität des einzigen Depots groß genug sein, um die Nachfrage aller Kunden abdecken zu können.

Im folgenden Beispiel können mehrere Depots gleichzeitig geöffnet sein und es gilt eine homogene Kapazität von 500 Einheiten für alle Depots.

Depotkosten

Bei jedem Depot fallen unterschiedliche Kosten an, je nachdem, ob ein Depot gerade geöffnet oder geschlossen wird oder sich im Betrieb befindet. Wird ein Depot geöffnet, so fallen vor allem Anschaffungskosten an, wird ein Depot geschlossen, so entstehen Kosten unter anderem durch das Freisetzen von Personal. Die Kosten, die durch den Betrieb eines Depots entstehen, sind hauptsächlich Lagerhaltungskosten. Alle Kosten sind von der Größe und Kapazität des Depots, sowie von der Art und dem Wert der Güter, abhängig. Auch andere Faktoren können einen Einfluss auf die Kosten haben, wie z.B. seine Lage.

Im nächsten Beispiel gelten folgende Kosten für alle Depots:

- Eröffnen eines Depots = 2.000 Geldeinheiten
- Schließen eines Depots = 1.000 Geldeinheiten
- Betrieb eines Depots = 200 Geldeinheiten pro Periode

Planungsperioden

Die Planungsperioden können theoretisch aus unterschiedlich vielen Tagen bestehen und beliebig groß sein. Eine Periode besteht jedoch üblicherweise aus einem Tag. Würde eine Periode aus einer Woche, also fünf Werktagen, bestehen, kann die Belieferung der Kunden an einem der fünf möglichen Tage stattfinden. In diesem Fall muss der Lieferant die Kunden den verfügbaren Tagen zuordnen und so einteilen, dass die Lieferungen kostenoptimal sind.

Dadurch wird das PLRP noch komplexer. In unserem Beispiel bestehen die Perioden aus jeweils einem Tag.

Nachfrage

Die Nachfrage der Kunden kann deterministisch oder stochastisch sein. Für das folgende Beispiel wird der einfachere Fall der deterministischen Nachfrage betrachtet. Hierbei ist zu beachten, dass die Nachfrage der einzelnen Kunden die Kapazität eines Fahrzeugs nicht überschreiten darf.

Als Beispiel wird die folgende Nachfragematrix nach dem Zufallsprinzip erzeugt. Die einzige Einschränkung hierbei ist, dass keine Nachfrage die Kapazität der Fahrzeuge von 100 Einheiten überschreiten darf:

Kunde Nr.	1. Periode	2. Periode	3. Periode	4. Periode	5. Periode
Kunde 1	47	27	50	64	31
Kunde 2	35	31	41	14	11
Kunde 3	20	10	22	43	81
Kunde 4	43	51	10	51	28
Kunde 5	11	19	60	93	20
Kunde 6	51	78	28	34	78
Kunde 7	23	25	51	46	55
Kunde 8	78	27	72	50	43
Kunde 9	61	43	78	11	28
Kunde 10	54	54	14	84	34

Tabelle 6.5: Nachfragematrix, Kunden x Perioden (Eigene Abbildung)

6.3.3 Erzeugte Beispielinstantz

Die dazugehörige Beispielinstantz sieht folgendermaßen aus:

Zeile	Beschreibung der Spalten	Instanz							
I	Anzahl der Perioden	5							
II	Anzahl der Kunden; Anzahl der Depots	10	3						
III	Fahrzeugkapazität;	100	5000	10					
bis	Fixe Kosten der Fahrzeuge;	100	5000	10					
VII	Transportkostensatz	100	5000	10					
		100	5000	10					
		100	5000	10					
VIII	Kundennummer;	1	23	32	47	27	50	64	31
bis	X-Koordinate;	2	14	5	35	31	41	14	11
XVII	Y-Koordinate,	3	49	15	20	10	22	43	81
	Nachfrage in der 1. Periode,	4	15	17	43	51	10	51	28
	Nachfrage in der 2. Periode,	5	8	39	11	19	60	93	20
	Nachfrage in der 3. Periode;	6	33	7	51	78	28	34	78
	...	7	40	40	23	25	51	46	55
		8	4	8	78	27	72	50	43
		9	27	14	61	43	78	11	28
		10	38	29	54	54	14	84	34
XVIII	Depotnummer;	1	14	23	500	2000	1000	200	
bis	X-Koordinate;	2	3	47	500	2000	1000	200	
XX	Y-Koordinate;	3	32	5	500	2000	1000	200	
	Depotkapazität;								
	Eröffnungskosten;								
	Schließungskosten;								
	Betriebskosten								

Tabelle 6.6: Beispiel einer generierten Instanz

Die hier erzeugte Beispielinstantz enthält mehr Informationen als für eine Lösung benötigt wird.

Durch diese Methode lassen sich Instanzen sowohl für neue Erweiterungen von bekannten Problemklassen als auch für komplett neue Problemklassen erzeugen.

6.4 Stochastische Nachfrage bzw. Einflussgrößen

Bei der im letzten Abschnitt erzeugten Beispielinstantz wurde von deterministischen Einflussgrößen ausgegangen. Wie könnten jedoch Instanzen aussehen, wenn sie von stochastischen Einflussgrößen ausgehen? Stochastische Einflussgrößen sind ausschließlich kundenbezogen, sie betreffen also die Anzahl der Kunden sowie deren Koordinaten und Nachfragen.

Die Koordinaten von neuen Kunden oder Kunden, die umziehen, sind unmöglich zu prognostizieren, deshalb beschäftigt sich dieser Abschnitt ausschließlich mit der stochastischen Nachfrage.

Die Nachfrage der Kunden kann sich wie folgt ändern:

- Trendförmig⁹⁷,
- Saisonal⁹⁸,
- Schwankend.

6.4.1 Trendförmige Nachfrage

Eine trendförmige Nachfrage kennzeichnet sich dadurch, dass sie monoton steigend oder fallend ist (s. Abbildung (6.1)), und wird durch eine lineare Funktion beschrieben. Diese Funktion wird durch eine Regressionsanalyse, z.B. durch die Methode der kleinsten Quadrate⁹⁹, anhand von Daten aus der Vergangenheit ermittelt. Durch die ermittelte Funktion können schließlich Prognosen aufgestellt werden.

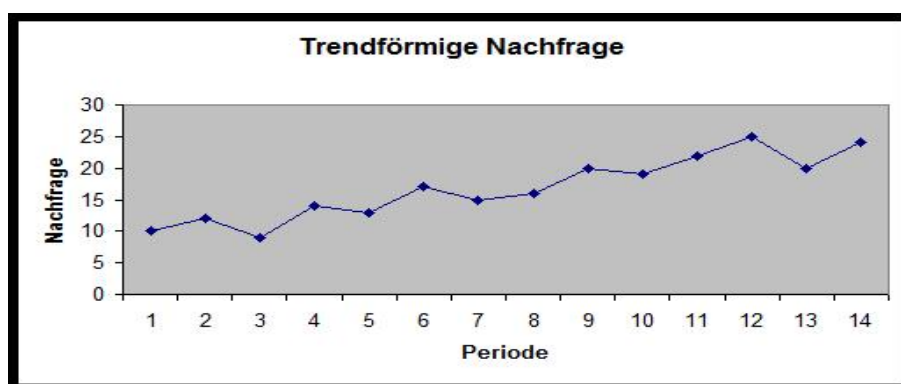


Abbildung 6.1: Trendförmige Nachfrage (Eigene Abbildung)

⁹⁷Vgl. Schira J. (2005): S.129ff [80]

⁹⁸Ebenda

⁹⁹Vgl. Papageorgiou M. et al. (2012): S.121 [65]

Für die Erzeugung einer Instanz existieren keine Daten aus der Vergangenheit, so dass man eine zufällig gewählte lineare Funktion wählen muss, um die trendförmigen Nachfragen über mehrere Perioden hin zu erzeugen.

6.4.2 Saisonale Nachfrage

Eine saisonale Nachfrage wird durch ein über mehrere Perioden wiederkehrendes Muster gekennzeichnet (s. Abbildung (6.2)). Für die saisonale Nachfrage können Prognosen, wie bei der trendförmigen Nachfrage, anhand von Daten aus vergangenen Nachfragen, ausgestellt werden. So eine Nachfrage kann durch eine Sinusfunktion simuliert und auf diese Weise in eine Instanz integriert werden.

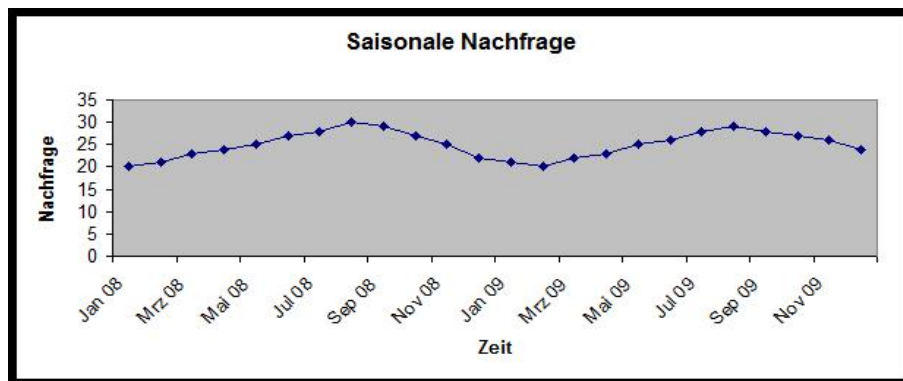


Abbildung 6.2: Saisonale Nachfrage (Eigene Abbildung)

Außerdem können die sogenannten Konjunkturschwankungen¹⁰⁰ eine Rolle spielen. Diese drei Arten von Schwankungen: Trend-, Saisonal- und Konjunkturschwankungen können sich überlagern und einen komplexen Nachfrageverlauf ergeben (s. Abbildung (6.3)).

6.4.3 Schwankende bzw. zufällige Nachfrage

Sowohl die trendförmige als auch die saisonale Nachfrage unterliegen einem Muster, so dass relativ präzise Prognosen gemacht und Instanzen mit konkreten Nachfragen erzeugt werden können. Was passiert jedoch, wenn die Nachfrage über eine bestimmte Spannbreite verteilt ist und kein Muster aufweist?

Die Streuung einer solchen Nachfrage unterliegt einer bestimmten Wahrscheinlichkeitsverteilung und kann auf diese Weise dargestellt werden. Dazu müssen zuerst Annahmen gemacht werden. Die Nachfragen sind diskret verteilt, d.h. sie haben endlich viele oder ab-

¹⁰⁰Vgl. Schira J. (2005): S.130 [80]

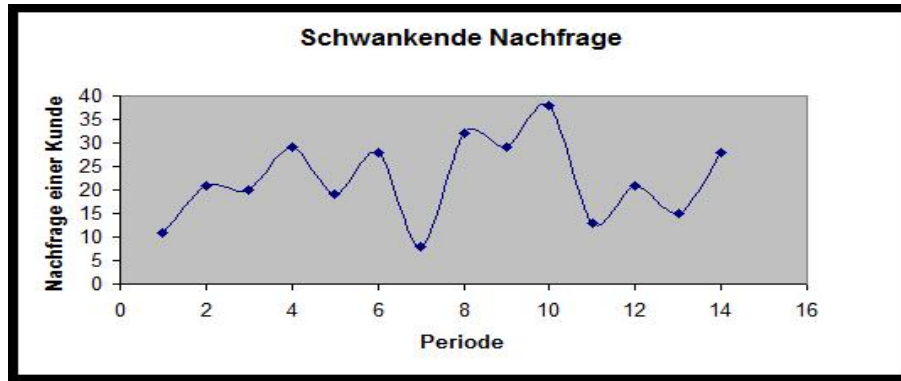


Abbildung 6.3: Schwankende Nachfrage (Eigene Abbildung)

zählbar unendlich viele Werte¹⁰¹ und sind stochastisch voneinander unabhängig, d.h. eine Nachfrage wird nicht von einer anderen Nachfrage beeinflusst.

Nun kann durch eine geeignete Wahrscheinlichkeitsverteilung bestimmte Nachfrage-typen dargestellt werden. Diese könnten dann in niedrige, mittlere und hohe Nachfragen unterteilt werden¹⁰². Es kann aber auch nach Art der Streuung unterschieden werden (s. Abbildung (6.4)).

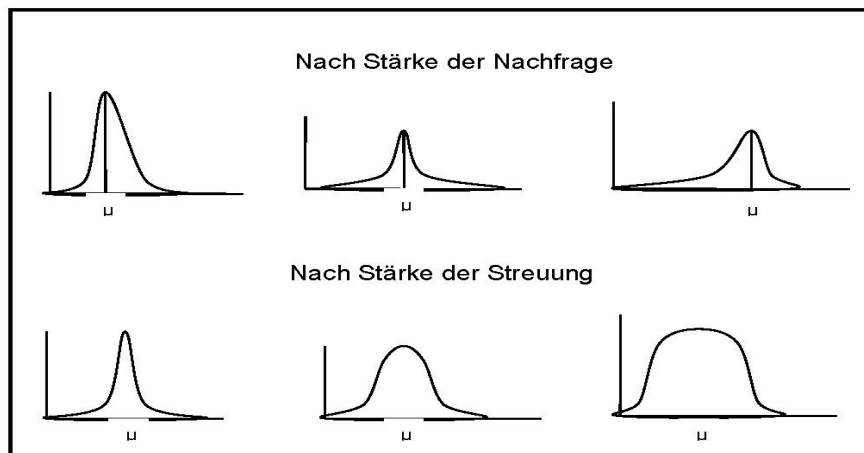


Abbildung 6.4: Dichtefunktion der Wahrscheinlichkeitsverteilung (Eigene Abbildung)

Bei dieser Art von Nachfragen lassen sich keine konkreten Zahlen angeben, sondern nur Wahrscheinlichkeiten, mit denen gerechnet wird.

¹⁰¹Vgl. Schira J. (2005): S.258 [80]

¹⁰²Vgl. Secomandi N. (2001): S.799 [85]; Gendreau M. et al. (1995): S.1ff [37]

Kapitel 7

Generierung von Problem instanzen

Für die Prognose anhand von Zeitreihenverfahren, existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahren.¹⁰³ Ziel bei der Auswahl von Verfahren im Rahmen eines automatischen Prognosesystems ist die Bildung einer Verfahrensdatenbank anhand der ein möglichst großes Spektrum der anwendungsfallspezifisch zu erwartenden Zeitreihencharakteristiken möglichst exakt prognostiziert werden kann. Prognoseverfahren existieren für verschiedene Anwendungsgebiete. So werden bspw. in zur Wetterprognose oder zur Prognose von chemischen Prozessen in der Regel andere Verfahren verwendet als im Anwendungsbereich der Bedarfsprognose bzw. der Materialwirtschaft. Ebenfalls existieren viele spezielle Verfahren, für den spezifischen Einsatz in bestimmten Branchen oder für spezielle Problemstellungen.¹⁰⁴ Entsprechend der Problemstellung liegt der Fokus daher auf Verfahren, die im Rahmen der Materialwirtschaft ihre Anwendung finden und im Gegensatz zu spezifischen Branchenlösungen allgemein anwendbar sind.

7.1 Methoden der Zeitreihenanalyse im Kontext der Bedarfsprognose

Methoden zur Ermittlung der Vorteilhaftigkeit von Prognoseverfahren sind bereits in den frühen achtziger Jahren des letzten Jahrhunderts aufgezeigt worden.¹⁰⁵ Diese wurden im Zeitverlauf von verschiedenen Autoren kritisch beurteilt und erweitert, richten sich jedoch zumeist auf ein übergeordnetes Auswahlproblem, bspw. der Wahl zwischen quantitativen und qualitativen Verfahren.

¹⁰³Vgl. Mertens P. et al. (1980): S.1 [60]

¹⁰⁴Vgl. Mertens P. et al. (1980): S.2 [60]

¹⁰⁵Vgl. Mertens P. et al. (1980): S.4 [60]

Die Abgrenzung der für den Einsatz im Rahmen der Bedarfsprognose angemessenen Prognoseverfahren ist in entsprechender Fachliteratur nicht eindeutig. Allgemein werden Methoden der Mittelwertbildung, der exponentiellen Glättung, naive Verfahren sowie Verfahren der linearen Regression für den Einsatz in der Bedarfsprognose vorgestellt.¹⁰⁶ Diese Verfahrensklassen werden vereinzelt in der Literatur um trigonometrische Verfahren, ARIMA-Verfahren und Prognoseverfahren unter Anwendung von Neuronalen Netzen erweitert.¹⁰⁷

Sowohl die trigonometrische Verfahren als auch Regressionsverfahren sind dem Verfahren der exponentiellen Glättung hinsichtlich der Prognosequalität unterlegen.¹⁰⁸ Gleichmaßen werden Verfahren der Neuronalen Netze vernachlässigt, deren Modellbildung aufgrund der erheblichen Komplexität große Erfahrungen in deren Umgang erfordert. In diesem Zusammenhang können bereits geringe Fehler zu einer erheblichen Leistungseinschränkung führen, so dass eine Anwendung entsprechend der Problemstellung nicht angemessen erscheint.¹⁰⁹ Der Fokus liegt somit maßgeblich auf Verfahren der exponentiellen Glättung sowie ARIMA-Verfahren.

Bei den Prognoseverfahren wird es im Allgemeinen zwischen Verfahren, die einer statistisch fundierten Modelltheorie unterliegen, die neben der Erzeugung von Punktprognosen die Berechnung von statistischen Prognoseintervallen ermöglichen und Verfahren, die heuristisch bzw. algorithmisch Punktprognosen erzeugen.¹¹⁰

7.2 Verfahren der exponentiellen Glättung

Methoden der exponentiellen Glättung basieren auf der Fortschreibung eines beobachteten Bedarfsverlaufes durch gewichtete Mittelwertbildung der Vergangenheitswerte. Es existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Glättungsverfahren zur Prognose der unterschiedlichen Bedarfsverläufe entsprechend der Systematik des Zeitreihen-Komponentenmodells. Dabei werden die Komponenten getrennt voneinander erfasst, anhand von Glättungsparametern gewichtet, einzeln oder gemeinsam, multiplikativ oder additiv verknüpft und zur Bildung der Prognose verwendet. Durch eine Gestaltung der Glättungsparameter wird Einfluss auf die Gewichtung der beobachteten Bedarfswerte im Zeitverlauf genommen.¹¹¹ Die Verfahren der exponentiellen Glättung sind grundsätzlich als einfache algorithmische Prognoseverfahren

¹⁰⁶Vgl. Schulte C.-S.(2005): S.384-393 [84]; Schulte G. (1996): S.121-161 [82]; Hansmann K.-W. (2006): S.264ff [43]

¹⁰⁷Vgl. Tempelmeier H. (2008): S.36ff [91]; Crone S.F. (2010): S.90ff [23]

¹⁰⁸Vgl. DeLurgio S.A. (1998): S.259 [25]; Adam D. (2001): S.516 [2]; Crone S.F. (2010): S.92 [23]

¹⁰⁹Vgl. Pfeifer T. et al. (2006): S.97 [67]

¹¹⁰Vgl. Hyndman R.J. et al. (2008): S.12 [50]

¹¹¹Vgl. Hyndman R.J. et al. (2008): S.12-17 [50]

ohne statistischen modelltheoretischen Hintergrund anzusehen. HYNDMAN hingegen definiert anhand eines Zustandsraummodells eine Modelltheorie, die fünfzehn exponentiellen Glättungsmethoden beinhaltet (s. Tabelle (7.1)), wodurch die Berechnung von statistisch begründeten Prognoseintervallen ermöglicht wird. Die im Rahmen der Modelltheorie berechneten Punktprognosen entsprechen dabei den durch die algorithmische Anwendung der Verfahren der exponentiellen Glättung erzeugten Prognosen. Dieses Prognoseverfahren ermöglicht die automatische Prognose anhand der integrierten Glättungsverfahren und wird auch als ETS-System bezeichnet.¹¹²

7.3 ARIMA-Verfahren

ARIMA-Verfahren beruhen auf der grundsätzlichen Klasse der ARMA-Verfahren. Im Sinne der ARMA-Modelltheorie wird eine Zeitreihe als eine lineare Funktion beobachteter Werte und zufälliger Schwankungen angesehen.¹¹³ Dabei werden autoregressive Funktionsterme (AR) und Moving-Average-Terme (MA) miteinander kombiniert. ARMA-Verfahren setzen ein stationäres Verhalten des Zeitreihenverlaufs voraus und können in ihrer eigentlichen Form lediglich zur Prognose von konstanten Bedarfsverläufen ohne Trend und Saisonalität angewendet werden. Die Forderung eines stationären Verhaltens der untersuchten Zeitreihe, bedingt einen im Zeitverlauf konstanten Mittelwert und somit ein konstantes Niveau, sowie eine im Zeitverlauf konstante Varianz. Die Anwendung von ARMA-Verfahren auf Zeitreihenverläufe mit Trend und Saisonalität erfolgt durch Bildung von Differenzen zur Herstellung eines stationären Verhaltens. Die Anzahl der benötigten Differenzen bis zum Erlangen eines stationären Verhaltens wird durch I-Term der ARIMA-Notifikation ausgedrückt. Anders als die Klasse der exponentiellen Glättung, besteht das ARIMA-Modell nicht aus einer Gruppe von statischen Verfahren, sondern die Modellbildung in Form einbezogener AR- und MA-Terme sowie dem Grad der Differenzierung erfolgt spezifisch entsprechend des untersuchten Zeitreihenverlaufs. Durch diese Art der Modellierung ist im Allgemeinen eine hohe Anpassungsgüte erzielbar.¹¹⁴ ARIMA-Verfahren, die auch als Box-Jenkins Verfahren bekannt sind, erlangen in akademischer Literatur eine große Aufmerksamkeit. Die vorherrschende Annahme in diesem Zusammenhang ist das Box-Jenkins-Verfahren das „beste“ Prognoseverfahren darstellt.¹¹⁵

¹¹²Vgl. Hyndman R.J. et al. (2008): S.17ff [50]

¹¹³Vgl. DeLurgio S.A. (1998): S.269 [25]

¹¹⁴Vgl. DeLurgio S.A. (1998): S.268 [25]

¹¹⁵Vgl. Armstrong J.-S. et al. (1983): S.269 [6]

7.4 Prognosegenauigkeit und Flexibilität

Das Bemühen, die relative Vorteilhaftigkeit von Prognoseverfahren hinsichtlich der Prognosegenauigkeit empirisch darzustellen, hat eine lange Tradition, speziell der Vergleich zwischen der exponentiellen Glättung und ARIMA-Verfahren. Von besonderem Interesse in diesem Zusammenhang sind erst kürzlich erschienenen Arbeiten von Makridakis et al., Assimakopoulos et al., Hyndman et al (2000). und Hyndman et al. (2003).¹¹⁶

Die empirischen Resultate der Vergleichsstudien stehen im Kontrast zur vorherrschenden Annahme, dass anhand komplexerer Verfahren, wie ARIMA, bessere Prognoseergebnisse erzielt werden als mit verhältnismäßig einfachen Methoden.¹¹⁷ Diese Ergebnisse wurden anhand von weiteren Studien bestätigt.¹¹⁸

Die Gründe für dieses Phänomen liegen in der häufig beobachteten Charakteristik von Zeitreihen mit wirtschaftlichem Hintergrund, in der Gestalt von instationärem Verhalten mit unsystematischen Schwankungen, welche nicht durch Differenzen im Rahmen des ARIMA-Verfahrens vollständig beseitigt werden können. Weiter ist diese Art von Zeitreihen häufig von Strukturbrüchen geprägt, bei denen sich komplexere Verfahren tendenziell fehleranfälliger verhalten als einfache Verfahren.¹¹⁹

7.5 Implementierungsaufwand

Grundsätzlich ist die Anwendung von exponentiellen Glättungs- und ARIMA-Verfahren durch Nutzung des quelloffenen Statistikprogramms *R* und den darin implementierten Prognosefunktionen ohne erheblichen Implementierungsaufwand möglich. Für beide Verfahren existieren ebenfalls automatisierte Verfahren.

Methoden der exponentiellen Glättung sind weit in der wissenschaftlichen Literatur im Zusammenhang mit der Bedarfsprognose verbreitet. Die Verfahren basieren auf relativ simplen Algorithmen, wobei die algorithmische Vorgehensweise verschiedener Verfahren innerhalb der Klasse der Glättungsmethoden grundsätzlich derselben Systematik folgt. Die Modellauswahl ist durch iterative Ausführung der Methoden der Testzeitreihen, ohne komplexe statistische Prüfverfahren möglich. Die verschiedenen Verfahren werden unabhängig voneinander implementiert, so dass die Gefahr verfahrensübergreifender Fehler reduziert wird. Durch die relativ einfache Durchführbarkeit und die weite Verbreitung der Verfahren in der Literatur wird die Validierung eines solchen Systems erheblich erleichtert.

¹¹⁶Vgl. Makridakis S. et al. (2000): S.453ff [59]; Assimakopoulos V. et al. (2000): S.521-530 [7]; Hyndman R.-J. et al. (2000): S.16ff [48]; Hyndman R.-J. et al. (2003): S.287-290 [49]

¹¹⁷Vgl. Clemen T. (2001): S.549 [19]

¹¹⁸Vgl. Betz G. (2004): S.38 [12]

¹¹⁹Vgl. Clemen T. (2001): S.551 [19]

7.6 Excel-Tool zur Erstellung automatischer Prognosen anhand exponentieller Glättungsmethoden

Nachfolgend wird ein Exceltool zur Erstellung einer Textdatei beschrieben. Die Struktur dieser Datei ist wie folgt:

- <Anzahl der Kunden >
- <Anzahl verfügbarer Lieferantendepots >
- <Anzahl der Perioden>
- <Depotkoordinaten>
- <Kundenkoordinaten>
- <Fahrzeugkapazität>
- <Depotkapazität>
- <Kundenbedarfszeitreihen>
- <Eröffnungskosten pro Depot>
- < 0 > (Kosten = Ganzzahl)

Es wird unterschieden zwischen Informationen, die der Anwender direkt als Zahlenwert an das Exceltool übergibt, und Informationen, die indirekt durch das Tool stochastisch und/oder anhand bestimmter Methoden erzeugt werden. Zu den letzteren gehören die Depotkoordinaten, die Kundenkoordinaten sowie die Kundenbedarfszeitreihen. Im weiteren Verlauf werden diese Methoden als auch die Benutzung des Exceltools beschrieben. Zuletzt wird die Programmstruktur des in **VBA** (*Visual Basic for Applications*) programmierten Tools dargelegt.

7.7 Methoden zur Informationserstellung

Die Generierung der Kunden- und Depotkoordinaten erfolgt anhand einer Gleichverteilung innerhalb bestimmter Grenzen. Die Generierung der Kundenbedarfszeitreihen erfolgt durch Methoden, die im weiteren Verlauf dieses Kapitel beschrieben werden.

7.7.1 Kundenbedarfszeitreihen

Die Kundenbedarfszeitreihen sollen folgenden Vorgaben entsprechen:

- Berücksichtigung von Trends und saisonalen Effekten,
- Frei von Nullbedarfsmengen, Ausreißern und Strukturveränderungen,
- Die Kundenbedarfe liegen ganzzahlig in Form von Monatsdaten vor.

Zeitreihen werden als eine Überlagerung von einer oder mehrerer regelmäßiger und unregelmäßiger Komponenten aufgefasst. Die regelmäßigen Komponenten beinhalten das mittlere Niveau der Zeitreihe l_t , die saisonale Komponenten s_t , die Trendkomponente t_t sowie die irreguläre Komponente e_t . Die Komponenten können additiv, multiplikativ sowie gemischt miteinander verknüpft sein. Aus dieser Kombination bilden sich grundstrukturelle Bedarfsverläufe mit stationärem, trendbehaftetem, saisonalem und trend-saisonaalem Verlauf.¹²⁰

$$Y_t = l_t + s_t + t_t + e_t \tag{7.1}$$

$$Y_t = l_t * s_t * t_t * e_t \tag{7.2}$$

Die Modellierung der Kundendaten erfolgt für einen allgemeinen Fall, ohne die Berücksichtigung spezifischer Bedarfsdaten und -verteilungen eines bestimmten Anwendungsfalles. Daher werden vereinfacht lineare Systemzusammenhänge unterstellt. Dies gilt für den Verlauf der einzelnen Komponenten als auch für deren Kombination. Bei regelmäßigem Bedarfsverlauf wird häufig davon ausgegangen, dass die irreguläre oder Fehlerkomponente e_t einer Normalverteilung mit dem Erwartungswert Null unterliegt, dementsprechend wird dies beim Erstellen der Zeitreihen berücksichtigt.¹²¹ Als Strukturvorlage der Bedarfsverläufe wird die von GARDNER und HYNDMAN erweiterte Klassifikation exponentieller Glättungsmethoden nach PEGEL verwendet.¹²²

Trend	Saisonalität		
	K (keine)	A (Additive)	M (Multiplikative)
K (keiner)	K, K	K, A	K, M
A (Additiver)	A, K	A, A	A, M
A _d (Additiver gedämpfter)	A _d , K	A _d , A	A _d , M
M (Multiplikativer)	M, K	M, A	M, M
M _d (Multiplikativer gedämpfter)	M _d , K	M _d , A	M _d , M

Tabelle 7.1: Zeitreihenklassifizierung in Anlehnung an Hyndman¹²³

Die dargestellten Klassen beschreiben fünfzehn Bedarfsverläufe (s. Tabelle (7.2)), durch die Kombination von Saison- und Trendkomponenten, sowie der Erweiterung von gedämpften Trendverläufen. Die Modellierung der Bedarfszeitreihen erfolgt nach den dargestellten fünfzehn Bedarfsmustern. Durch die anfänglich formulierte Forderung nach regelmäßi-

¹²⁰Vgl. Crone S.F. (2010): S.104-105 [23]

¹²¹Vgl. Tempelmeier H. (2005): S.63 [90]; Herpes S. (2009): S.31 [45]

¹²²Vgl. Hyndman R.-J. et al. (2008): S.12 [50]

¹²³Ebenda

gen Bedarfszeitreihen werden Zeitreihenkomponente konstant im Zeitverlauf gestaltet, um Strukturbrüche zu vermeiden. Ferner wird auf eine Modellierung von Nullbedarfsmengen und Ausreißern verzichtet.

7.7.2 Generierung von Zeitreihen nach der erweiterten Pegelklassifikation

Für die dargestellten Bedarfsverläufe werden von HYNDMAN Prognosefunktionen auf Grundlage der exponentiellen Glättung aufgezeigt.¹²⁵ Die Klasse KK beschreibt eine Zeitreihe ohne Trend und Saisonalität. Die Zeitreihe schwankt folglich um den konstanten Achsenabschnitt l_t um den Wert der Fehlerkomponente e_t .

$$Y_t = l_t + e_t \quad (7.3)$$

Durch die Definition des gewünschten Achsenabschnitts l_t , der sich im Zeitverlauf konstant verhält und der stochastischen Generierung normalverteilter Werte für e_t für jede Periode t der Bedarfszeitreihe, wird der Bedarfsverlauf erzeugt. Die Prognosefunktion für das KK-Zeitreihenmodell entspricht der exponentiellen Glättung erster Ordnung und lautet nach der HYNDMAN-Klassifizierung:

$$l_t = \alpha y_t + (1 - \alpha)l_{t-1} \quad (7.4)$$

Wobei l_t dem in Periode t geschätzten Niveau der Periode $t + 1$ entspricht. Es gilt:

$$\hat{y}_{(t+h|t)} = l_t = \hat{y}_{t+1} \quad (7.5)$$

Somit gilt für \hat{y}_t :

$$\hat{y}_t = \alpha y_{t-1} + (1 - \alpha)l_{t-2} \quad (7.6)$$

Der Prognosefehler e_t ergibt sich aus der Differenz zwischen dem tatsächlichem Wert der Zeitreihe y_t und der Prognose \hat{y}_t .

$$e_t = y_t - \hat{y}_t \quad (7.7)$$

¹²⁴Vgl. Hyndman R.-J. et al. (2008): S.18 [50] (s. nächste Seite)

¹²⁵Ebenda

¹²⁶Ebenda

¹²⁷Vgl. Hyndman R.-J. et al. (2008): S.14 [50]

		Saisonalität	
Trend	K	A	M
K	$l_t = \alpha y_t + (1 - \alpha)l_{t-1}$ $\hat{y}_{t+h t} = l_t$	$l_t = \alpha(y_t - s_{t-m}) + (1 - \alpha)l_{t-1}$ $s_t = \gamma(y_t - l_{t-1}) + (1 - \gamma)s_{t-m}$ $\hat{y}_{t+h t} = l_t + s_{t-m+h_m^+}$	$l_t = \alpha(y_t/s_{t-m}) + (1 - \alpha)l_{t-1}$ $s_t = \gamma(y_t/l_{t-1}) + (1 - \gamma)s_{t-m}$ $\hat{y}_{t+h t} = l_t s_{t-m+h_m^+}$
A	$l_t = \alpha y_t + (1 - \alpha)(l_{t-1} + b_{t-1})$ $b_t = \beta^*(l_t - l_{t-1}) + (1 - \beta^*)b_{t-1}$ $\hat{y}_{t+h t} = l_t + hb_t$	$l_t = \alpha(y_t - s_{t-m}) + (1 - \alpha)(l_{t-1} + b_{t-1})$ $b_t = \beta^*(l_t - l_{t-1}) + (1 - \beta^*)b_{t-1}$ $s_t = \gamma(y_t - l_{t-1} - b_{t-1}) + (1 - \gamma)s_{t-m}$ $\hat{y}_{t+h t} = l_t + hb_t + s_{t-m+h_m^+}$	$l_t = \alpha(y_t/s_{t-m}) + (1 - \alpha)(l_{t-1} + b_{t-1})$ $b_t = \beta^*(l_t - l_{t-1}) + (1 - \beta^*)b_{t-1}$ $s_t = \gamma(y_t/(l_{t-1} + b_{t-1})) + (1 - \gamma)s_{t-m}$ $\hat{y}_{t+h t} = (l_t + hb_t)s_{t-m+h_m^+}$
A _d	$l_t = \alpha y_t + (1 - \alpha)(l_{t-1} + \varphi b_{t-1})$ $b_t = \beta^*(l_t - l_{t-1}) + (1 - \beta^*)\varphi b_{t-1}$ $\hat{y}_{t+h t} = l_t + \varphi_h b_t$	$l_t = \alpha(y_t - s_{t-m}) + (1 - \alpha)(l_{t-1} + \varphi b_{t-1})$ $b_t = \beta^*(l_t - l_{t-1}) + (1 - \beta^*)\varphi b_{t-1}$ $s_t = \gamma(y_t - l_{t-1} - \varphi b_{t-1}) + (1 - \gamma)s_{t-m}$ $\hat{y}_{t+h t} = l_t + \varphi_h b_t + s_{t-m+h_m^+}$	$l_t = \alpha(y_t/s_{t-m}) + (1 - \alpha)(l_{t-1} + \varphi b_{t-1})$ $b_t = \beta^*(l_t - l_{t-1}) + (1 - \beta^*)\varphi b_{t-1}$ $s_t = \gamma(y_t/(l_{t-1} + \varphi b_{t-1})) + (1 - \gamma)s_{t-m}$ $\hat{y}_{t+h t} = (l_t + \varphi_h b_t)s_{t-m+h_m^+}$
M	$l_t = \alpha y_t + (1 - \alpha)l_{t-1}b_{t-1}$ $b_t = \beta^*(l_t/l_{t-1}) + (1 - \beta^*)b_{t-1}$ $\hat{y}_{t+h t} = l_t b_t^h$	$l_t = \alpha(y_t - s_{t-m}) + (1 - \alpha)l_{t-1}b_{t-1}$ $b_t = \beta^*(l_t/l_{t-1}) + (1 - \beta^*)b_{t-1}$ $s_t = \gamma(y_t - l_{t-1}b_{t-1}) + (1 - \gamma)s_{t-m}$ $\hat{y}_{t+h t} = l_t b_t^h + s_{t-m+h_m^+}$	$l_t = \alpha(y_t/s_{t-m}) + (1 - \alpha)l_{t-1}b_{t-1}$ $b_t = \beta^*(l_t/l_{t-1}) + (1 - \beta^*)b_{t-1}$ $s_t = \gamma(y_t/(l_{t-1}b_{t-1})) + (1 - \gamma)s_{t-m}$ $\hat{y}_{t+h t} = l_t b_t^h s_{t-m+h_m^+}$
M _d	$l_t = \alpha y_t + (1 - \alpha)l_{t-1}b_{t-1}^\varphi$ $b_t = \beta^*(l_t/l_{t-1}) + (1 - \beta^*)b_{t-1}^\varphi$ $\hat{y}_{t+h t} = l_t b_t^{\varphi_h}$	$l_t = \alpha(y_t - s_{t-m}) + (1 - \alpha)l_{t-1}b_{t-1}^\varphi$ $b_t = \beta^*(l_t/l_{t-1}) + (1 - \beta^*)b_{t-1}^\varphi$ $s_t = \gamma(y_t - l_{t-1}b_{t-1}^\varphi) + (1 - \gamma)s_{t-m}$ $\hat{y}_{t+h t} = l_t b_t^{\varphi_h} + s_{t-m+h_m^+}$	$l_t = \alpha(y_t/s_{t-m}) + (1 - \alpha)l_{t-1}b_{t-1}^\varphi$ $b_t = \beta^*(l_t/l_{t-1}) + (1 - \beta^*)b_{t-1}^\varphi$ $s_t = \gamma(y_t/(l_{t-1}b_{t-1}^\varphi)) + (1 - \gamma)s_{t-m}$ $\hat{y}_{t+h t} = l_t b_t^{\varphi_h} s_{t-m+h_m^+}$

wobei l_t – mittleres Niveau der Zeitreihe zum Zeitpunkt t , b_t – Steigung zum Zeitpunkt t , s_t – saisonale Komponente zum Zeitpunkt t und m Anzahl der Saisonalitätsperioden im Jahr; α, β^*, γ und φ sind Konstanten, $\varphi_h = \varphi + \varphi^2 + \dots + \varphi^h$ und $h_m^+ = [(h - 1) \bmod m] + 1$.

Tabelle 7.2: Prognosefunktionen der Modellklassen¹²⁴(Fußnote vorherige Seite)

Durch Umformung von Formel (7.7) und dem Einsetzen von Formel (7.6) in Formel (7.7) ergibt sich:

$$y_t = (\alpha y_t + (1 - \alpha)l_{t-2}) + e_t \tag{7.8}$$

Für $\alpha = 0$ gilt:

$$y_t = l_{t-2} + e_t \tag{7.9}$$

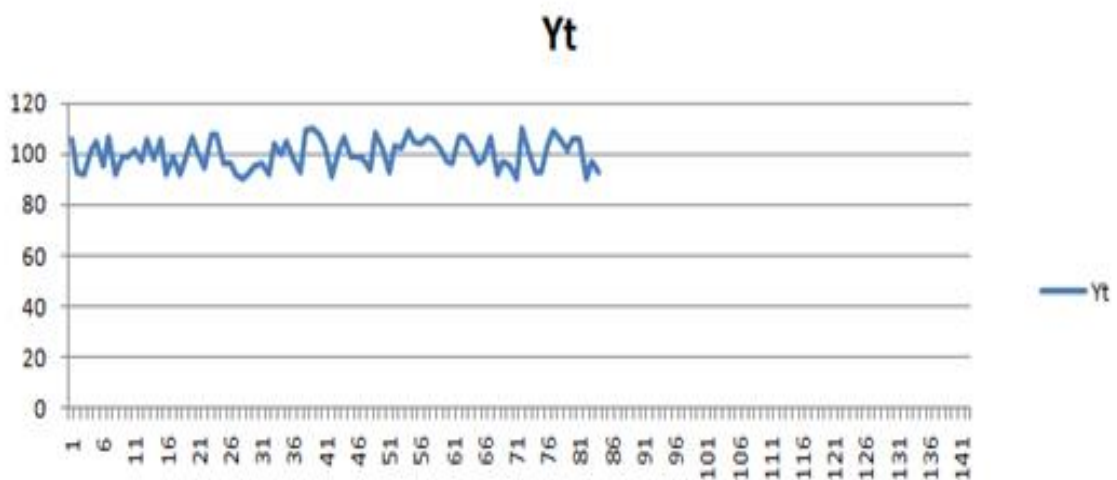


Abbildung 7.1: KK-Modell ($l_t = 100, \alpha = 0$) (in Anlehnung an Hyndman)

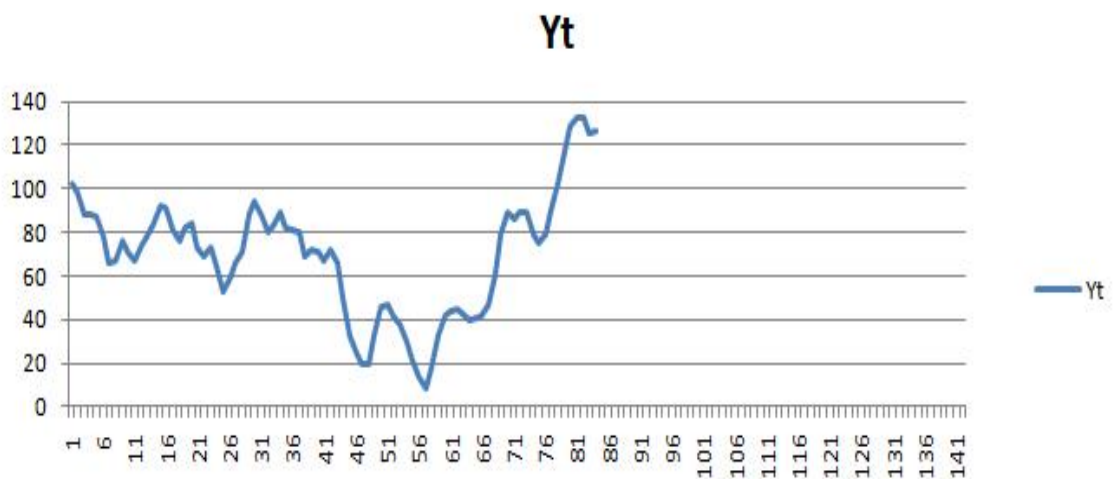


Abbildung 7.2: KK-Modell ($l_t = 100, \alpha = 2$) (in Anlehnung an Hyndman)

Durch die Gestaltung der Glättungsparameter lassen sich Bedarfsverläufe unter Verwendung der umgeformten Prognoseformeln erstellen. Wählt man die Glättungsfaktoren größer Null wächst der Einfluss der vorhergegangenen Fehler auf den aktuellen Zeitreihenverlauf. Bei einer Wahl von großen Glättungsfaktoren wird die Zeitreihe zum Random Walk.¹²⁸

Dieser Zusammenhang gilt gleichermaßen für die dargestellten fünfzehn Prognosefunktionen. Durch die Wahl großer Glättungsfaktoren ist es möglich, den Einfluss des Fehlers auf den weiteren Verlauf der Zeitreihe zu beeinflussen. Die durch das Exceltool erstellten Zeitreihen werden daher unter Verwendung der dargestellten Prognosefunktionen erstellt.

7.7.3 Zeitreihenmodelle und Glättungsparameter

Die Prognosefunktionen enthalten Glättungsparameter und Zeitreihenparameter. Die als Benutzereingabe erwarteten Zeitreihenparameter l_t , b_t , s_t dienen als Startparameter der Bedarfszeitreihen. l_t beschreibt den Achsenabschnitt der Startperiode, b_t die konstante Steigung im Zeitreihenverlauf und s_t mit $t = [1, 12]$ die Saisonindizes der jeweiligen Bedarfsperiode. Ferner ist für jede Periode der zu erstellenden Bedarfszeitreihe die normalverteilte Fehlerkomponente e_t stochastisch zu erzeugen. Hierzu ist die Eingabe des Mittelwerts und der Standardabweichung notwendig. Die Begrenzung der Schwankungsbreite um den Mittelwert ist anhand zusätzlicher Eingaben möglich.

Fehler (Normalverteilt)	
Mittelwert:	0
Stw:	19,5569026
Extr. Min:	-10
Extr. Max:	10

Abbildung 7.3: Eingabe der Fehlerkomponente (Eigene Darstellung)

Der Eingabebereich der Glättungsparameter ist im Rahmen der Erstellung der Bedarfszeitreihen modellunabhängig, es gilt sowohl für die additive als auch die multiplikative Verknüpfung der gleiche Eingabebereich. Nach Eingabe der notwendigen Parameter wird der Fehler für jede Periode anhand des Box-Mueller Verfahrens anhand zwei gleichverteilter Zufallszahlen (G_1, G_2) erzeugt.

$$Z_{norm.} = \sigma \sqrt{-2 \ln G_1} \sin(2\pi G_2) \quad ^{129} \quad (7.10)$$

¹²⁸Vgl. Pearson K. (1905): S.294 [66]

¹²⁹Vgl. Kost B. (2003): S.91 [53]

Glättungsparameter

Der Glättungsparameter α wird zur Glättung des Achsenabschnitts der Bedarfszeitreihe l_t verwendet. Für $\alpha = 0$ ist das Niveau der Reihe konstant im Zeitverlauf. Wie bereits erwähnt, wächst, je größer α gewählt wird, der Einfluss der Prognosefehler vergangener Perioden auf das aktuelle Niveau der Bedarfszeitreihe. Diese Beziehung gilt gleichermaßen für β bei der Gestaltung des Trends und für γ bei der Gestaltung der Saisonfaktoren.

Der Glättungsfaktor Φ wird zur Modellierung eines gedämpften Trends verwendet. Mit $\Phi = 1$ bleibt der Trend ungedämpft und der Bedarfsverlauf entspricht dem jeweiligen Zeitreihenmodell ohne Trend. Das A_d -Modell wird daher mit $\Phi = 1$ zum A -Modell. Mit $\Phi = 0$ wird die Trendkomponente vollständig aus dem Bedarfsverlauf des Modells eliminiert.

Glättungsparameter	
Alpha (Achsenabschnitt)	2
Beta (Steigung)	0
Gamma (Saisonfaktor)	0
Phi (Dämpfungsfaktor)	0,99

Abbildung 7.4: Eingabe der Glättungsparameter im Tabellenblatt „Zeitreihenerstellung“ (Eigene Darstellung)

Zeitreihenparameter

Die als Startwerte dienenden Zeitreihenparameter müssen entsprechend der jeweiligen Verknüpfung der Zeitreihenkomponenten vom Anwender getrennt eingegeben werden. Im Zusammenhang der Modelle mit additivem Trend oder Saisonkomponenten entsprechen Trendparameter t_t und Saisonfaktoren s_t , mit $t = [1, 12]$, absoluten Werten, die im additiven Systemzusammenhang miteinander addiert werden. Im Falle eines multiplikativen Trends oder einer multiplikativ verknüpften Saisonkomponente entsprechen t_t und s_t nicht den absoluten Werten, sondern einem Faktor, der im multiplikativen Systemzusammenhang multipliziert wird. Dies ist bei der Wahl der Werte entsprechend zu berücksichtigen.

Die Saisonkomponenten s_t beschreiben gleichmäßige Schwankungen, die sich innerhalb der Saisonperiode untereinander ausgleichen¹³⁰. Somit gilt bei additiver Verknüpfung $\sum_{t=1}^{12} s_t = 0$ sowie bei multiplikativer Verknüpfung $\sum_{t=1}^{12} s_t = 12$. Wird dies bei der Eingabe vom Anwender ignoriert, erfolgt eine programmseitige Normierung der Saisonfaktoren. Für

¹³⁰Vgl. Zwerenz K. (2006): S.255 [100]

die Normierung der multiplikativen Saisonfaktoren gilt¹³¹:

$$s_t = \frac{s_{troh}}{s_{\emptyset}} \quad \text{mit} \quad s_{\emptyset} = \frac{\sum_{t=1}^{12} s_{troh}}{12} \quad (7.11)$$

Und für die additive Normierung der Saisonfaktoren gilt¹³²:

$$s_t = s_{troh} - s_{\emptyset} \quad \text{mit} \quad s_{\emptyset} = \frac{\sum_{t=1}^{12} s_{troh}}{12} \quad (7.12)$$

7.8 Erstellen einer Instanz

Nachfolgend wird das Vorgehen bei der Erstellung einer Instanzdatei schrittweise beschrieben. Das Vorgehen unterscheidet sich nach der Art der Erstellung der Kundeninformationen. Diese, bestehend aus Kundenbedarfszeitreihen und Kundenstandortkoordinaten, können sowohl manuell als auch automatisch erzeugt werden.

Vor dem Erstellen der Kundeninformationen erfolgt die Eingabe der Grundinformationen der Instanz. Dazu wechselt der Anwender ins Tabellenblatt „Instanz“ und gibt die Informationen zur Periodenlänge, Depotanzahl und –kapazität, Fahrzeugkapazität, Öffnungskosten und Routeneröffnungskosten an. Ebenso werden die Art des Zeitreihenmodells definiert und die Anzahl der zu erstellenden Kunden. Für die Parameter der Zeitreihenmodelle werden Min- und Maxgrenzen eingegeben, innerhalb derer für jeden Kunden einzeln die Werte gleichverteilt generiert werden. Die zu definierenden Zeitreihenparameter folgen der im vorherigen Kapitel aufgezeigten Struktur.

Der Bezeichner *Instanz#* beschreibt eine Instanz anhand einer Nummer, für jede Nummer wird eine Instanz entsprechend der in der jeweiligen Zeile definierten Informationen generiert. Die Nummern müssen fortlaufend gestaltet sein. Werden zwei fortlaufende Zeilen mit der gleichen Instanznummer versehen, werden die Kundeninformationen (Anzahl Kunden, Art der Zeitreihe, Zeitreihenparameter) der folgenden Zeile in die vorherige Instanz integriert, um Kundencluster mit verschiedenen Standortmethoden erstellen zu können. Die Depotinformationen werden von der obersten Zeile entnommen und gelten für alle aufeinanderfolgenden Zeilen mit derselben Instanznummer. Es können beliebig viele Zeilen anhand der Instanznummer zusammengefasst werden.

Letztendlich wird für alle Kunden die gültige Standortmethode eingegeben. Diese muss zuvor definiert werden. Zur Festlegung einer Standortmethode wird ins Tabellenblatt „Standortkoordinaten“ gewechselt, um den Bereich zu definieren, in dem die Depotkoordinaten

¹³¹Vgl. Eckey H.F. et al. (2008): S.257-258 [33]

¹³²Vgl. Eckey H.F. et al. (2008): S.254 [33]

stochastisch erstellt werden. In der dort vorliegenden Tabellenübersicht ist die Zelle der Spalte mit der Beschriftung „Standortmethoden“, in der sich die Zeile mit der Beschriftung „Depots“ befindet, der entsprechende Eingabebereich. Der Anwender gibt in dieser Zeile sowohl die Lage der Ausgangskordinaten (X, Y) als auch obere und untere Grenzen der Koordinaten an. Die Generierung der Depotkoordinaten erfolgt bei der späteren Erstellung der Instanz automatisch im definierten Bereich:

$$X = X_{\text{Ausgangspunkt}} + Z_{\text{Gleichverteilt}}[\text{Untere Grenze } X, \text{Obere Grenze } X] \quad (7.13)$$

$$Y = Y_{\text{Ausgangspunkt}} + Z_{\text{Gleichverteilt}}[\text{Untere Grenze } Y, \text{Obere Grenze } Y] \quad (7.14)$$

Die Methoden „Frei“ und „Depots“ sind statisch und sind nicht vom User zu ändern. Dies gilt lediglich für die Bezeichner. Die Werte der Grenzen sind frei definierbar.

7.9 Programm zum Erstellen von synthetischen Zeitreihen

Dieses Programm orientiert sich am Makro „Zeitreihenerstellen“ für Microsoft Excel. Dieses Makro wurde im Rahmen der Zeitreihenanalyse vorgestellt und diente meistens für automatische Prognose der Bedarfsmengen von Kunden. Das neue Programm hat alle Funktionalitäten des Makros, hat aber gewisse Unterschiede, die im Weiteren beschrieben werden.

7.9.1 Verwendete Programmiersprache und Bibliotheken

Im Gegensatz zum ursprünglichen Makro, das auf *VBA* geschrieben wurde, ist das neue Programm auf *C++* geschrieben. Die Gründe für das Wechseln waren die erwartete Verbesserung der Berechnungsgeschwindigkeit und der Wunsch nach einer völlig automatischen Erstellung von Instanzen.

Genau wie Makro davor wird *R*-Bibliothek für das statische Rechnen benutzt. Außerdem wird auch *boost*-Bibliothek für *C++* benutzt.

Einstellung von R-Bibliothek

Software

- *R* (es wurde Version 2.15.3 benutzt)
- *Rtools* (mit gcc 4.6.3)

- *RExcel* (für Microsoft Office Excel)
- Zusätzlich zum RExcel braucht man *DCOM*, *rcom*

Packete

- *RInside* (es wird dann auch Packet *Rcpp* installiert)
- *Expsmooth*, *forecast*, *tseries*

Installation von R

Man benutzt die standarten Installer von *R* und *Rtools*. Gewünschtes Installationsverzeichnis: *C* : \R. Alle zusätzlichen Pakete (*Expsmooth*, *forecast*, *tseries*) installiert man durch R-Umgebung.

Installation von RExcel

Siehe http://homepage.univie.ac.at/erich.neuwirth/php/rcomwiki/doku.php?id=wiki:how_to_install

Man muss *R* bereits installiert haben. Wenn bei der Installation SDI Stil für R-Umgebung nicht gewählt wurde, kann man es in Datei *Rconsole* (Standardverzeichnis ... \R\R – ... \etc) ändern, indem man „MDI = no“ durch „MDI = yes“ ersetzt. Außerdem bei Installation muss man R sagen, sein Registrierungseintrag zu schreiben.

Installationsschritte:

- Man lädt statconn *DCOM Server* herunter und installiert ihn
- Man startet *R* als Administrator und führt folgende Befehle nacheinander aus:

```
Install.packages(c("rscproxy", "rcom"), repos = "http://rcom.univie.ac.at/download", lib = .Library)library(rcom)comRegisterRegistry()
```

Das installiert *rcom*
- Man installiert *RExcel*

Boost - Bibliothek

Software

- *Rtools*
- *Boost – Bibliothek* (Gewünschtes Installationsverzeichnis: *C* : \boost)

Installation

Entpacke die ZIP-Datei. In dem Verzeichnis *boost_Versionsnummer* starte bat-Datei *bootstrap*. Als Ergebnis sollten zwei exe-Dateien erstellt werden: *bjam.exe* und *b2.exe*. Mit Hilfe von *bjam.exe* bildet man Bibliotheken von boost:

- **x64**

```
bjam --without-python --without-mpi --without-j12toolset = gcc --libdir = "C :  
\boost\new\lib\x64" architecture = x86address-model = 64link = staticvariant =  
release --build-type = complete install
```

- **x86**

```
bjam --without-python --without-mpi --without-j12toolset = gcc --libdir = "C :  
\boost\new\lib\x86" architecture = x86address-model = 32link = staticvariant =  
release --build-type = complete install
```

Bemerkung

- die Bibliotheken werden mit *gcc* von Rtools gebildet
- "C : \boost\new\lib\" der Zielordner für Bibliotheken.
- "C : \boost\include" enthält die Daten aus "C : \boost\boostVersionsnummer\boost"

7.9.2 Unterschied zwischen dem Makro und neuem Programm

Ein wesentlicher Unterschied zwischen Makro und *Cpp*-Programm liegt im Aufruf von *R*-Funktion *ets* aus *forecast*-Packet. Diese Funktion gibt das Exponential-Smoothing-Modell, das auf eingegebene Zeitreihe angepasst wurde. Im Makro wird diese Funktion mit der Eigenschaft *additive.only = TRUE* aufgerufen, was zu dem schlechten Forecast bei der Anwesenheit der saisonalen Schwankungen in den Kundennachfragen führt. Um dieses Problem zu beseitigen, wird die Funktion *ets* in *Cpp*-Programm ohne diese Eigenschaft aufgerufen.

7.10 Beginnen der Arbeit

Für das Starten braucht man ein neues Verzeichnis, wohin man *Zeitreihenerstellen.exe* kopiert. Zusätzlich braucht man einen Ordner *kk*, woher die Eingabedateien gelesen werden. Für die Dateien, für die die Erstellung von Instanzen fehlgeschlagen ist, wird Ordner *ERROR* im Verzeichnis *kk* erstellt und fehlerhafte Dateien werden dorthin kopiert.

7.10.1 Eingabedateien

Die Eingabedateien werden im Format *.xml* gespeichert. Dabei haben sie eine feste Struktur:

```
<?xml version="1.0"?>
<Instanzen>
  <Instanz Id="1">
    ...
  </Instanz>
  <Instanz Id="2">
    ...
  </Instanz>
  ...
  <Instanz Id="n">
    ...
  </Instanz>
</Instanzen>
```

Das Hauptelement heißt *Instanzen* und besteht aus der beliebigen Anzahl von Elementen *Instanz*. Wir betrachten ausführlicher die Struktur von diesen Unterelementen:

ID:

Die Nummer der Instanz.

Kundenteil:

Es wird hier nur Anzahl der Kunden in der zu generierenden Instanz angegeben.

Depotteil:

Standortmethode: siehe Standortteil

Attribut *KapazitätGleich* kann die Werte *true* (falls alle Depots gleiche Kapazität haben sollen) oder *false* (in diesem Fall werden Depots verschiedene Kapazitäten haben: Für $\frac{2}{5}$ aller Depots füllt $\frac{1}{4}$ aller Nachfragen. Der Rest wird gleichmäßig auf die restlichen $\frac{3}{5}$ verteilt).

Element *Öffnungskosten* bestimmt die unteren und oberen Grenzen für die Fixkosten eines Depots.

Fahrzeugteil

Für jedes Fahrzeug werden die Kapazität und die Kosten bestimmt. Es kann auch die Anzahl der zu benutzenden Fahrzeuge angegeben werden, es war aber für die betrachteten Probleme nicht wichtig. Die Anzahl der Fahrzeuge ist in unserem Fall unbegrenzt.


```

- <Instanz Id="1">
  <Kunden Anzahl="20"/>
  - <Depots Anzahl="5">
    <StandortMethode Methode="depots"/>
    <KapazitaetGleich gleich="false"/>
    <Oeffnungskosten Max="15000" Min="5000"/>
  </Depots>
  <Fahrzeuge Anzahl="" Kosten="1000" Kapazitaet="70"/>
  - <Parameter Cluster="3">
    <Zeitreihen Model="KA"/>
    <alpha Max="4.0" Min="4.0"/>
    <beta Max="2.0" Min="2.0"/>
    <gamma Max="10.0" Min="10.0"/>
    <phi Max="0.5" Min="0.5"/>
    <At Max="20" Min="20"/>
    <Bt Max="0.2" Min="0.2"/>
    - <Seasons>
      <S Id="1" Max="2" Min="2"/>
      <S Id="2" Max="2" Min="2"/>
      <S Id="3" Max="2" Min="2"/>
      <S Id="4" Max="4" Min="4"/>
      <S Id="5" Max="8" Min="8"/>
      <S Id="6" Max="12" Min="12"/>
      <S Id="7" Max="12" Min="12"/>
      <S Id="8" Max="6" Min="6"/>
      <S Id="9" Max="2" Min="2"/>
      <S Id="10" Max="1" Min="1"/>
      <S Id="11" Max="1" Min="1"/>
      <S Id="12" Max="1" Min="1"/>
    </Seasons>
    - <NormalDistrKomp>
      <Mean Max="0.1" Min="0.1"/>
      <StDeviation Max="0.1" Min="0.1"/>
    </NormalDistrKomp>
    <LB Max="-100" Min="-100"/>
    <UB Max="100" Min="100"/>
  </Parameter>
  - <Standort>
    <depots Oy="50" Uy="1" StartY="0" Ox="50" Ux="1" StartX="0"/>
    <frei Oy="50" Uy="1" StartY="0" Ox="50" Ux="1" StartX="0"/>
    <A Oy="11" Uy="-11" StartY="12" Ox="11" Ux="-11" StartX="12"/>
    <B Oy="11" Uy="-11" StartY="12" Ox="11" Ux="-11" StartX="37"/>
    <C Oy="11" Uy="-11" StartY="37" Ox="11" Ux="-11" StartX="12"/>
  </Standort>
</Instanz>

```

Abbildung 7.5: Struktur einer Instanz in XML-Datei (Eigene Darstellung)

Parameterteil

Hier werden die für die Prognose von Kunden nötigen Parameter angegeben.

Es werden drei *Cluster*-Typen betrachtet: *Cluster* = "2" oder *Cluster* = "3" bedeutet, dass alle Kunden entsprechend in zwei oder drei Standorten platziert werden. Dabei die 1. Gruppe (Cluster) hat den Standort „A“, die 2. den Standort „B“ und die 3. den Standort „C“ (siehe Standortteil weiter). *Cluster* = "0" bedeutet das alle Kunden verstreut an einem

Standort platziert werden. Der Standort von Kunden ist in diesem Fall gleich dem Standort von den Depots.

Es wird zwischen 15 Zeitreihenmodellen unterschieden: KK, AK, AdK, MK, MdK, KA, AA, AdA, MA, MdA, KM, AM, AdM, MM, MdM:

Abkürzung	Bezeichnung
KK	Kein Trend, keine Saisonalität
AK	Additiver Trend, keine Saisonalität
AdK	Additiver gedämpfter Trend, keine Saisonalität
MK	Multiplikativer Trend, keine Saisonalität
MdK	Multiplikativer gedämpfter Trend, keine Saisonalität
KA	Kein Trend, additive Saisonalität
AA	Additiver Trend, additive Saisonalität
AdA	Additiver gedämpfter Trend, additive Saisonalität
MA	Multiplikativer Trend, additive Saisonalität
MdA	Multiplikativer gedämpfter Trend, additive Saisonalität
KM	Kein Trend, multiplikative Saisonalität
AM	Additiver Trend, multiplikative Saisonalität
AdM	Additiver gedämpfter Trend, multiplikative Saisonalität
MM	Multiplikativer Trend, multiplikative Saisonalität
MdM	Multiplikativer gedämpfter Trend, multiplikative Saisonalität

Tabelle 7.3: Zeitreihenmodelle (in Anlehnung an Hyndman)

Für die Parameter α , β , γ , ϕ , A_t , B_t werden jeweils die unteren und oberen Schranken angegeben (s. Depotsteil).

Im Fall einer saisonalitätsabhängigen Nachfrageprognose wird die Saisoninformation benutzt. Für jede Saison werden die minimal und maximal mögliche Werte für die Saisonalitätsparameter angegeben.

Das Element *NormalDistrKomp* bestimmt die Parameter der Normalverteilung.

Standortsteil

Es werden fünf verschiedene Standorte betrachtet: „depots“, „frei“, „A“, „B“ und „C“. Für jeden Standort werden die Koordinaten vom Zentrum ($StartX$, $StartY$) und dem erlaubten Abstand vom Zentrum in alle vier Richtungen angegeben. Somit wird der viereckige Bereich des Standortes bestimmt.

7.10.2 Generierte Instanzen

Folglich wird das Format von den Ausgangsdateien beschrieben. Als Basis dafür wurde das Format der Instanzen von Prodhon¹³³ genommen.

Für jede Instanz in xml-Datei werden drei Ausgangsdateien mit den Namen in der Form: *Forecast|Realdata|SafetyCopy-Clustertyp(c0|c2|c3)-Zeitreihenmodell-Anzahl von Kunden-Anzahl von Depots-Fahrzeugkapazität-Fahrzeugfixkosten-InstanzID.txt* Jede einzelne Datei hat folgende Struktur:

```
<Anzahl der Kunden>
leere Zeile
<Anzahl von Depots>
leere Zeile
<Anzahl von den betrachteten Perioden = 24>
leere Zeile
<Koordinaten von Depots... >
leere Zeile
<Koordinaten von Kunden... >
leere Zeile
<Fahrzeugkapazität >
leere Zeile
<Kapazität von Depots... >
leere Zeile
<Nachfrage von Kunden in allen Perioden... >
leere Zeile
<Kosten von Depots... >
leere Zeile
<Fahrzeugsfixkosten >
leere Zeile
<0 als EOF>
```

Die Inhalte aller Dateien bis auf Nachfrage von Kunden in allen Perioden sind gleich. Die Datei mit dem Namen *SafetyCopy* enthält die „Geschichte“ der Nachfragen von Kunden in den letzten zwei Jahren (d.h. 24 Perioden) und die „echten“ (im Gegensatz zu den prognostizierten) Nachfragen von Kunden in den kommenden zwei Jahren (noch 24 Perioden). In der Datei mit dem Namen *Forecast* werden die mit Exponential Smoothing prognostizierten Nachfragen gespeichert. Und in der Datei mit dem Namen *Realdata* werden die Nachfragen gespeichert, die mit Vorperiode-Methode (Nachfrage aus der letzten Periode bekannt¹³⁴) vorhergesagt wurden. Die Instanzen werden je nach Problemstellung neu generiert.

¹³³Caroline Prodon: <http://prodhonc.free.fr/homepage>, Zugriff am 24.11.2014 [107]

¹³⁴Näheres Kapitel 14

Kapitel 8

Optimierungstool AdL(e)R[©]

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Tool **AdL(e)R[©]** – **Advanced Location Routing** – arbeitet mit heuristischen Lösungsverfahren zur Lösung von Optimierungsproblemen. Dieses nutzt die genetischen Algorithmen für statische und dynamische Problemstellungen. Die Programmierung erfolgte in der Programmiersprache *C++*. Als Input für die Software gelten die zuvor erstellten Instanzen.

Fahrzeuge sollen Kunden mit Waren von Depots beliefern. Die Instanzen enthalten eine bestimmte Anzahl an möglichen Depots und die Software muss entscheiden, welche und wie viele Depots eröffnet werden. Des Weiteren muss die Software die Anzahl der Touren, die Zuordnung zu den jeweiligen Depots und die optimale Route berechnen.

Folgende Parameter können eingestellt und verändert werden:

- Anzahl, Koordinaten und Nachfrage der Kunden
- Anzahl, Koordinaten, Kapazität und Fixkosten der einzelnen Depots
- Kapazität und Fixkosten der Fahrzeuge

Im folgenden Abschnitt wird anfangs ein allgemeiner Exkurs in das Thema Metaheuristiken geben. Anschließend werden Verfahren und Heuristiken erläutert, mit denen das Optimierungstool **AdL(e)R[©]** funktioniert.

8.1 Metaheuristiken

Viele Probleme der kombinatorischen Optimierung lassen sich als ganzzahlige oder binäre mathematische Modelle formulieren. Davon gehören die meisten zu den NP-schweren Problemen. Reale Größenordnungen dieser NP-schweren Probleme, d.h. mit einer großen Zahl an Entscheidungsvariablen, lassen sich häufig aufgrund ihrer Komplexität nicht mit einem vertretbaren Rechenaufwand optimal lösen.¹³⁵

¹³⁵Vgl. Domschke W. et al. (2005): S.126 [30]

Es sind effiziente heuristische Verfahren nötig, um in akzeptabler Zeit möglichst gute zulässige Lösungen für große Optimierungsprobleme zu finden. Diese heuristischen Verfahren garantieren zwar nicht das Auffinden einer optimalen Lösung, leistungsfähige Heuristiken können aber eine gute Schranke für den Zielfunktionswert liefern.

Es gibt Heuristiken, die nach bestimmten Metastrategien vorgehen. Diese, sogenannten *Metaheuristiken*, zeichnen sich dadurch aus, dass sie universell einsetzbar sind und eine vorübergehende Verschlechterung der Lösung zulassen, wodurch sie lokale Optima verlassen können, um bessere lokale- oder sogar das globale Optimum zu finden.

Metaheuristiken lassen sich allgemein in zwei Gruppen klassifizieren. Zu unterscheiden sind *evolutionäre Verfahren*, zu denen die *Genetischen Algorithmen* gehören und *nicht-evolutionäre Verfahren* wie z.B. die Ameisenalgorithmen, Simulated Annealing, Tabu Search u.v.m. (vgl. Abbildung (8.1)).

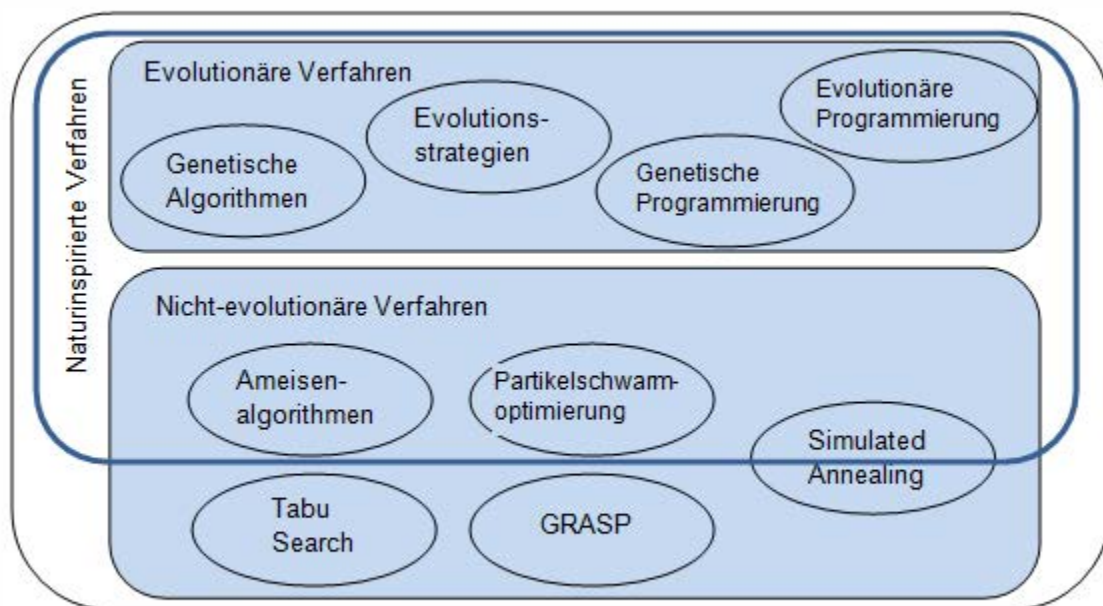


Abbildung 8.1: Klassifizierung Metaheuristiken (Eigene Darstellung)

8.2 Genetischer Algorithmus

Genetische Algorithmen zählen zu den Metaheuristiken und wurden 1975 von einem Forschungsteam um John Holland entwickelt. Holland leitete aus den in der Biologie stattfindenden Prozessen ein Modell für die Anwendung als Problemlösungsstrategie ab. Das Ziel war, zum einen die ausführliche Erläuterung dieses anpassungsfähigen Prozesses in

der Natur zu beschreiben und zum anderen die Erstellung einer konstruktiven Software-Lösung, die diese Mechanismen zur Lösung von realen Problemstellungen auch außerhalb der Biologie umsetzt, zu ermöglichen. Beide Ziele führten in der Folge zu beeindruckenden Entdeckungen sowohl in der Natur als auch in den künstlichen Modell-Systemen¹³⁶.

Der *Genetische Algorithmus* (GA) ist eine der meist angewendeten und höchst erfolgreichen Metaheuristiken für kombinatorische Optimierungsprobleme. Der genetische Algorithmus ahmt den Evolutionsprozess der Natur nach. Der Erfolg der natürlichen Selektion, die Herkunft der Spezies zu erklären reicht nicht aus, um den Erfolg des GAs beim Lösen von Optimierungsproblemen zu erklären. Weshalb und wie der GA genau funktioniert, wird noch immer stark diskutiert¹³⁷.

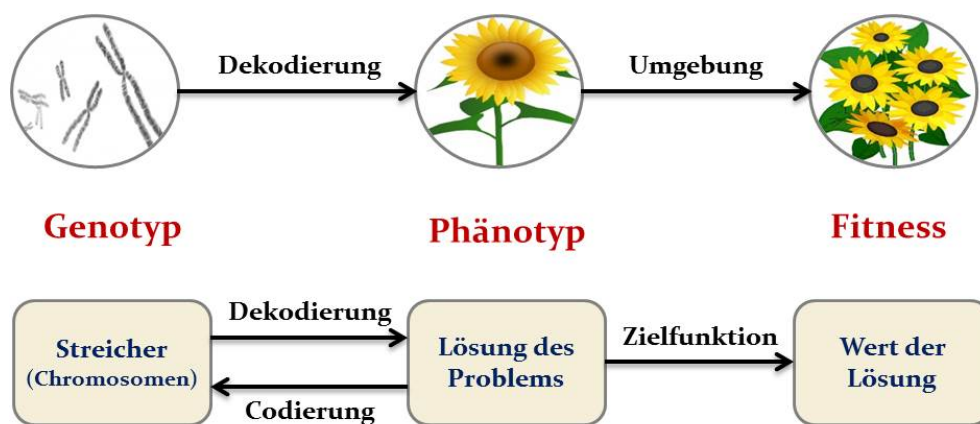


Abbildung 8.2: Genotyp, Phänotyp und Fitness in der Natur und im GA¹³⁸

Der Genetische Algorithmus verwendet ein Vokabular, das aus der natürlichen Vererbungslehre entnommen wurde. Jeder GA basiert auf einer Population von n Individuen, die mittels Selektion, Rekombination und Mutation im ersten Schritt zufällig erstellt werden und die Anfangspopulation bilden. Dabei stellen die Individuen die Lösungen des jeweiligen Optimierungsproblems dar. Diese Lösungen liegen in einer speziellen Kodierung vor. Eine solche Kodierung wird als *Chromosom* bezeichnet und ist binär¹³⁹. Chromosomen fungieren als ein Bauplan und legen die Eigenschaften des Organismus fest. Ein Chromosom beinhaltet verschiedene Gene. Es ist sicher anzunehmen, dass jedes Gen für eine Eigenschaft / Merkmal verantwortlich ist, in der Realität können mehrere Gene eine Eigenschaft festlegen. Die Position des Gens in einem Chromosom wird als *Genort* bezeichnet und legt fest, welche Eigenschaft durch dieses Gen beeinflusst wird. Verschiedene mögliche Ausprägungen eines Gens werden *Allele* des Gens genannt. Ein Gen mit dem Genort Augenfarbe wird die Augenfarbe des künftigen Individuums festlegen und dürfte die Allele bernsteinfarben,

¹³⁶Vgl. Goldberg D.E. (1989): S.1 [39]; Holland J.H. (1975) [47]

¹³⁷Vgl. Reeves C. (2010): S.109-111 [75]

¹³⁸Vgl. Falkenauer E. (1998): S.1ff [35]

¹³⁹Vgl. Schipior D. (2013): S.32 [79]

braun, blau, grau, grün und nussbraun haben. Die vollständige Menge an Chromosomen wird *Genotyp* genannt. Der Genotyp wird in den *Phänotyp* dekodiert, um die physischen Charakteristika eines Organismus aufzubauen. Der Phänotyp eines Organismus bestimmt seine Fähigkeit zu überleben und seine Fähigkeit Nachkommen in der Umwelt zu produzieren, vgl. Abbildung (8.2). Die meisten Organismen, die sich geschlechtlich fortpflanzen, haben Chromosomenpaare. Einzelne Chromosomen, die von zwei Eltern kommen, werden neu kombiniert, um Chromosomenpaare für die Nachkommen zu bilden. Nach der Neukombination können kleine zufällige Änderungen an den Chromosomen der Nachfolger durch Mutation vorgenommen werden.

Genetische Algorithmen sind populationsbasierte Suchalgorithmen, da sie nicht mit einer einzelnen Lösung arbeiten, wie Metaheuristiken, die auf lokaler Suche basieren, sondern mit einer Population von Lösungen. Dabei untersuchen sie verschiedene Lösungsbereiche des Lösungsraums parallel. Die Anfangspopulation der Lösungen wird, wie oben beschrieben, normalerweise zufällig gewählt. Sie mit guten Lösungen zu versehen kann schneller bessere Lösungen erzeugen, andererseits kann sich aber die Wahrscheinlichkeit einer frühzeitigen Annäherung erhöhen, dass sich der Algorithmus eher einem lokalen Optimum annähert als einer global optimalen Lösung. Es ist ebenfalls wichtig, eine Entscheidung über die Populationsgröße zu treffen, ist sie zu groß verschwendet der GA möglicherweise Zeit, ist sie zu klein kann der GA eventuell nicht alle möglichen Lösungen im Suchraum untersuchen. Abbruchbedingungen für den GA können die Gesamtzahl an Iterationen sein, die Anzahl folgender Iterationen ohne Verbesserung der Lösung bzw. die Dauer des Algorithmus in Sekunden.

Als nächster Schritt erfolgt die Bevorzugung besserer Individuen im GA durch den sog. *Selektionsdruck*. Dabei bewertet er alle individuellen *Fitnesswerte* und wählt die Eltern mit einer Wahrscheinlichkeit proportional zu ihren Fitnesswerten aus. Diese Individuen werden als Eltern bezeichnet, da sie ihre Gene, d.h. ihre Lösungseigenschaften, an die nachfolgenden Generationen weitergeben¹⁴⁰.

Anschließend folgt die Rekombination dieser Elternindividuen und es entstehen pro Elternpaar jeweils zwei Kinderindividuen, so dass die neue Population wieder aus n Individuen besteht. Der *Crossover - Operator* (Rekombinationsoperator) ist das Unterscheidungsmerkmal der Genetischen Algorithmen. Er erlaubt es, den Genetischen Algorithmen verschiedene Bereiche des Suchraums zu untersuchen. Nachfolgend vollziehen *Mutationsoperatoren* kleine Veränderungen, die die Unterschiedlichkeit zwischen den Kindern sicherstellen soll. Die Wahrscheinlichkeit des Crossovers wird generell höher gesetzt als die Wahrscheinlichkeit der Mutation, um die Eltern nicht zu verändern. Allerdings sollten die Wahrscheinlichkeiten dynamisch sein, z.B. mit einer hohen Crossover - Wahrscheinlichkeit

¹⁴⁰Vgl. Schipior D. (2013), S.33 [79]

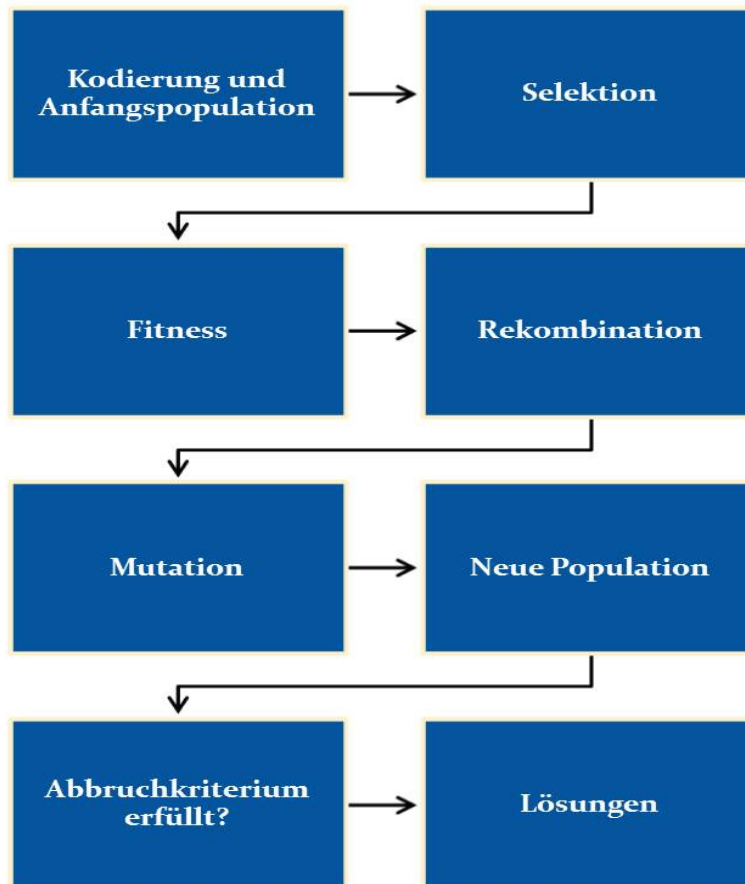


Abbildung 8.3: Schematischer Ablauf des Genetischen Algorithmus (Eigene Darstellung)

und einer niedrigen Mutations - Wahrscheinlichkeit zu beginnen und später die Crossover - Wahrscheinlichkeit zu verringern und die Mutations - Wahrscheinlichkeit zu erhöhen.

In Abbildung (8.3) ist die generelle Vorgehensweise im Rahmen des Genetischen Algorithmus dargestellt. Dieses Schema kann auf konkret zu betrachtendes Optimierungsproblem vielseitig spezifiziert werden.

8.3 Gruppenorientiertes genetisches Kodieren (GGA)

Es existieren verschiedene erfolgreiche Kodierungen für das VRP (Vehicle-Routing Problem). Wenn es aber um das LRP (Location-Routing Problem) geht, ist es nicht offensichtlich, die richtige genetische Darstellung zu finden, da das LRP nicht nur aus dem Subproblem der Routenplanung für die Kundennachfrage besteht, sondern auch aus dem Subproblem des Gruppierens der Kundennachfrage und des Zuordnens auf die Fahrzeuge und Depots.

¹⁴¹Vgl. Pankratz G. (2005): S.30 [64]

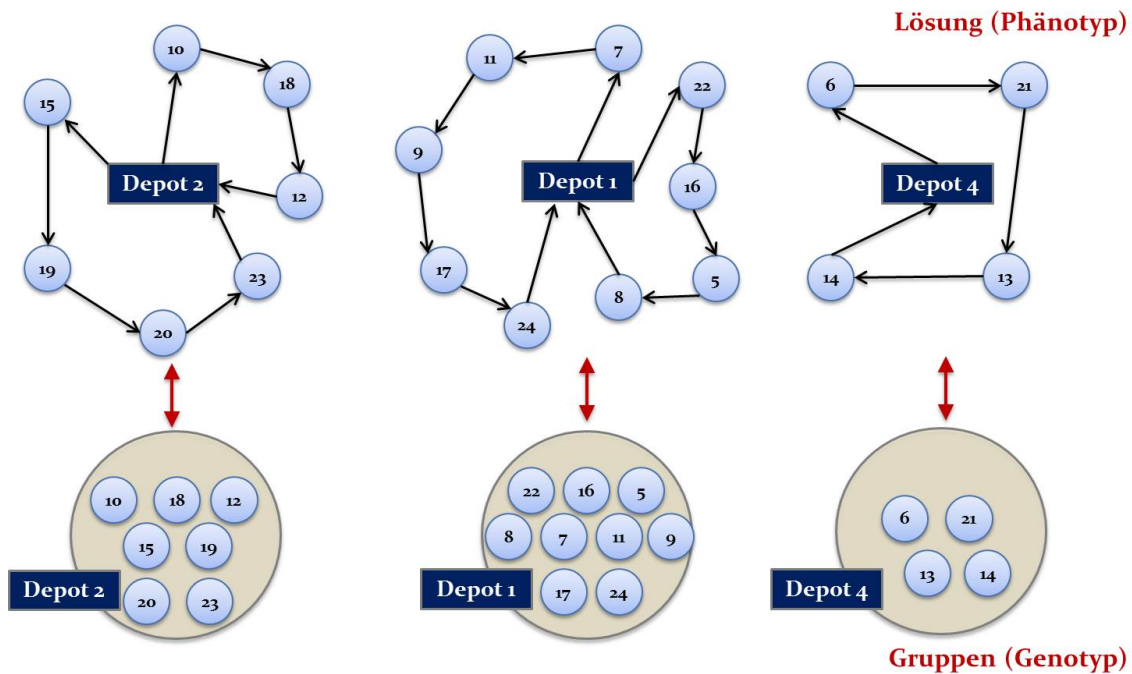


Abbildung 8.4: Gruppenorientiertes Kodieren - in Anlehnung an Pankratz (2005)¹⁴¹

Der Genotyp des GGA (grouping genetic algorithm) für das LRP beinhaltet Gene, die das Depot und die Kunden, die von diesem Depot bedient werden, repräsentieren. Die genetischen Operatoren arbeiten dann am Genotyp, so dass der GGA versucht, den Gruppierungsaspekt des Problems zu verbessern. Die Beziehung von Genotyp und Phänotyp wird in Abbildung (8.4) aufgezeigt. Die Routinginformation wird durch Dekodieren des Genotyps in den Phänotyp gewonnen, tatsächlich ist die Routenplanung der Nachfragen bereits in der gleichen Datenstruktur vorhanden, wird aber vor den Crossover- und Mutations - Operatoren versteckt.

8.4 Genetische Operatoren

Die Eltern werden nach dem binären Tournament - Selection - Algorithmus ausgewählt, um die strenge Auswahl nach Fitnesswerten zu umgehen.¹⁴² Aus zwei zufällig gewählten Lösungen wird das Individuum mit besserem Zielfunktionswert als Elternteil gewählt.

Crossover - Operatoren im GGA, vgl. Abbildung (8.5), definieren zunächst zufällig einen Kreuzungsbereich bei jedem Elternteil, indem sie zufällig zwei Punkte in jedem Elternteil

¹⁴²Die Alternative zur strengen Auswahl nach Fitnesswerten ist die sog. Tournament Auswahl, in der ein Satz von Chromosomen ausgewählt und verglichen wird, wobei die beste Auswahl die Elternschaft bedeutet - Vgl. Reeves C. (2010): S.123 [75]

¹⁴³Vgl. Pankratz G. (2005): S.31 [64]

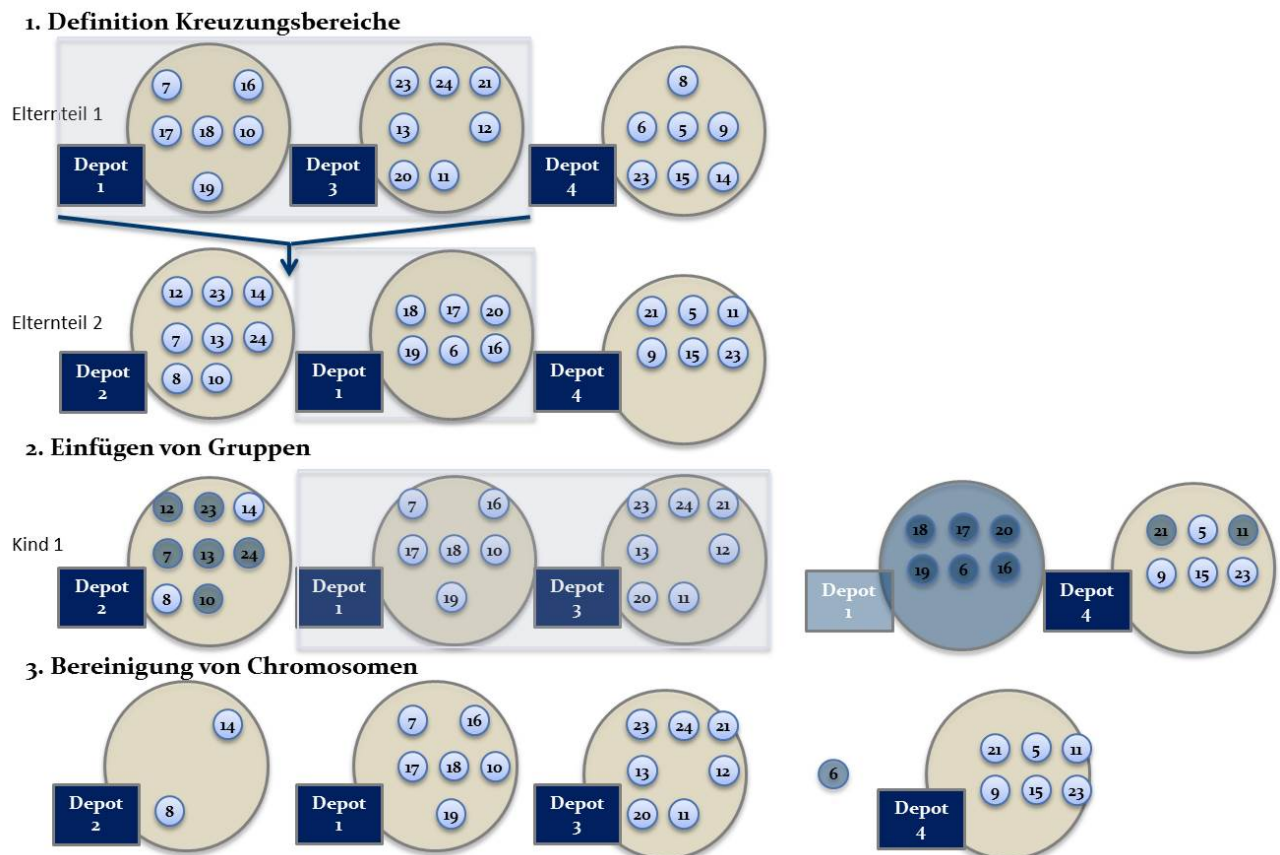


Abbildung 8.5: Der gruppenorientierte Crossover - Operator - in Anlehnung an Pankratz (2005)¹⁴³

auswählen (der sog. Two-Point Crossover¹⁴⁴). Anschließend werden die Gruppen im Kreuzungsbereich des zweiten Elternteils vor den Kreuzungsbereich des ersten Elternteils gesetzt, so wird das erste Kind erstellt. Sind die gleichen Kundennachfragen in den neuen Gruppen auch in den alten Gruppen des ersten Kindes vorhanden, so werden diese sich widersprechenden Nachfragen aus den alten Gruppen entfernt. Hat eine der neuen Gruppen die gleiche Gruppennummer, wie eine der alten Gruppen, werden die alten Gruppen aufgelöst und ihre Nachfragen gelten als unbestimmt. Unbestimmte Nachfragen werden durch die Einfüge - Heuristik (s.u.) neu zugewiesen, was zum Öffnen einer neuen Gruppe führen kann. Der gleiche Prozess wird für das zweite Kind wiederholt.

Der Mutations-Operator¹⁴⁵ wählt zunächst zufällig ein Individuum und dann eine zufällige Gruppe aus, die zu entfernen ist. Danach werden alle entfernten Nachfragen durch die Einfüge- Heuristik eingebracht. Ziel des Mutations - Operators ist es, die Zahl der Fahrzeuge zu minimieren.

¹⁴⁴Vgl. Reeves C. (2010): S.124 [75]

¹⁴⁵Vgl. Reeves C. (2010): S.126-127 [75]; Schipior D. (2013): S.33 [79]; Grünert T. et al. (2005): S.231 [40]

8.5 Einfüge - Heuristik

Einfüge - Heuristiken¹⁴⁶ (Insertion Heuristic) werden im GGA umfangreich genutzt, um Lösungen wiederherzustellen, mit anderen Worten, nach Crossover und Mutation werden verschiedene Kunden wahrscheinlich keiner Tour hinzugefügt sein, also werden sie einer Tour unter Verwendung der eingebauten Einfüge - Heuristik hinzugefügt. Scheitert die Einfüge - Heuristik daran, alle noch keiner Tour hinzugefügte Kundennachfragen einer Tour hinzuzufügen, wird dann ein neues Fahrzeug zugewiesen und eine neue Tour eröffnet. Die Regret-m Variante der regretbasierten parallelen Einfüge - Heuristik (s. weiter unten Regret - Heuristik) kann, trotz der Tatsache, dass sie die rechenintensivste Regret - Heuristik verwendet, die Wahrscheinlichkeit des Einfügens aller nicht einer Tour hinzugefügten Kunden ohne Eröffnung einer neuen Tour erhöhen. Die beschriebene Konstruktionsheuristik wird verwendet, um Anfangslösungen zu erzeugen, der einzige Unterschied dabei ist, dass zufällig gewählte Platzierungen im GGA verwendet werden, um die Anfangspopulation verschiedener Lösungen zu erzeugen. Die Details der Konstruktions- und Regret-m - Heuristik werden im nächsten Abschnitt erläutert.

8.6 Konstruktions- und Einfüge- Heuristiken

8.6.1 Konstruktionsheuristiken

*Konstruktionsheuristiken*¹⁴⁷ werden gebraucht, um eine Anfangslösung für das Optimierungsproblem zu erzeugen. Die Heuristik läuft solange bis jede Kundennachfrage einer Tour zugeordnet wurde. Sie initialisiert eine Tour mit dem Depot und dem Anfangskunden. Alle Kunden, die noch keiner Tour zugeordnet wurden, werden aufsteigend gemäß ihrer Platzierungskosten sortiert. Der Anfangskunde ist derjenige mit den geringsten Platzierungskosten. Für alle noch keiner Route zugeordneten Kunden werden ihre zugehörigen besten zulässigen Einfügeplätze in der aktuellen Tour unter Verwendung der jeweiligen Platzierungskosten (nach einer Neuberechnung) berechnet. Die Liste der noch keiner Tour zugeordneten Kunden und ihrer zugehörigen besten Orte in der aktuellen Tour wird gemäß ihrer Auswahl aufsteigend nach Kosten sortiert. Anschließend wird die Nachfrage mit den geringsten Auswahlkosten an ihren besten Orten eingefügt. Dieser Prozess der Findung der geringsten Kostenorten und den Kunden mit den geringsten Kosten wird solange fortgesetzt bis die Liste der noch keiner Tour zugeordneten Kunden und ihrer zugehörigen besten zulässigen Orte leer ist, dann ist entweder eine neue Tour erzeugt worden und der

¹⁴⁶Vgl. Ropke S. et al. (2006): S.460 [77]

¹⁴⁷Vgl. <http://www.orklaert.de/konstruktionsheuristiken.php> [104]

Prozess des Hinzufügens von Kunden wird, wie zuvor, fortgesetzt oder alle Kunden sind einer Tour zugeordnet und die Heuristik ist beendet.

8.6.2 Einfüge - Heuristiken

Die Konstruktionsheuristik, die im vorangegangenen Abschnitt beschrieben wurde, ist eine *sequentielle Einfüge - Heuristik*¹⁴⁸. Dabei werden die Nachfragen und ihre besten zulässigen Einfügeorte in der aktuellen Tour gesucht. Sollte es in der aktuellen Tour keinen Platz für die Nachfrage geben, wird eine neue Tour eröffnet. Kurz gesagt, Touren werden eine nach der anderen eröffnet, wenn es Nachfragen gibt, die noch keiner Tour zugeordnet wurden. In *parallelen Einfüge - Heuristiken*¹⁴⁹ werden verschiedene Touren gleichzeitig eröffnet und wenn der beste zulässige Einfügeort beurteilt wird, dann werden alle möglichen Positionen in allen Touren gesucht. Im GGA ist es nicht notwendig, die Anzahl der zu eröffnenden Touren in den parallelen Einfüge - Heuristiken festzulegen, da das sequenzielle Einfügen in der Konstruktionsphase verwendet wird. Das parallele Einfügen in der Wiedereinfügephase wird verwendet, um entfernte Nachfragen in teilweise konstruierte Touren wieder einzufügen.

Ropke und Pisinger¹⁵⁰ glauben, dass es sinnvoll wäre, in der Einfüge - Heuristik einen zusätzlichen Faktor namens „Rauschen“ (Noise) einzuführen. Er vermeidet, dass die Heuristik eine lokale Lösung findet, indem auch schlechtere Lösungen zugelassen werden, um eine mögliche Konvergenz zu vermeiden¹⁵¹. Dies wird durch die Addition von Rauschen zur Zielfunktion erreicht. Bei der Berechnung von Kosten C nach jedem Einfügen addieren wir dazu eine zufällige Zahl (Noise) im Intervall $[-maxN, maxN]$ und rechnen die Einfügekosten neu: $C' = \max\{0, C + noise\}$. Je nach eingesetzter Instanz wird noise mit dem Faktor η multipliziert¹⁵², um den Rauschenanteil zu bestimmen. In diesem Fall wird das Rauschen folgendermaßen berechnet: $maxN = \eta * \max_{i,j \in V} \{d_{i,j}\}$, wobei $d_{i,j}$ die maximale Entfernung zwischen den Knoten i und j darstellt.

8.6.3 Basic Greedy - Heuristik

Die Basic - Greedy - Heuristik ähnelt der Konstruktionsheuristik sehr, einziger Unterschied, sie bearbeitet alle Touren gleichzeitig anstatt nur einer Tour¹⁵³. In jeder Iteration wird eine Nachfrage eingefügt. Zunächst werden alle Nachfragen, die noch keiner Tour zugeordnet

¹⁴⁸Vgl. Ropke S. et al. (2006): S.460 [77]

¹⁴⁹Ebenda

¹⁵⁰Vgl. Ropke S. et al. (2006): S.463 [77]

¹⁵¹Vgl. Schöneburg E. et al. (1994): S.202 [81]

¹⁵²Vgl. Ropke S. et al. (2006): S.463 [77]

¹⁵³Vgl. Ropke S. et al. (2006): S.460 [77]

wurden, ihrem besten zulässigen Einfügeort, der über alle Touren gefunden wurde, zugeordnet (der Ort, der die Kosten der Lösung am geringsten ansteigen lässt), dann wird die Nachfrage mit den niedrigsten Kosten ihrem besten zulässigen Einfügeort hinzugefügt. Der Algorithmus wird fortgesetzt bis es keine Nachfragen mehr gibt, die noch keiner Tour zugeordnet wurden oder es keinen zulässigen Einfügeort mehr gibt für Nachfragen, die noch keiner Tour zugeordnet wurden. Es ist nicht erlaubt, neue Touren für nicht verplante Nachfragen zu eröffnen, da ein Ziel des GGA ist, die Anzahl der benötigten Fahrzeuge zu minimieren.

Nur die Einfügekosten für die Tour, der die Nachfrage hinzugefügt wurde, müssen in der nächsten Iteration neu berechnet werden, da alle anderen Touren intakt geblieben sind. Die Basic - Greedy - Heuristik verschiebt das Einfügen von Nachfragen mit höheren Kosten in die letzten Iterationen, da es dort weniger zulässige Einfügeorte gibt, was es noch schwieriger macht, sie einzufügen.

Formal kann dies mit der folgenden Gleichung beschrieben werden

$$\min_{i \in U} \{ \min_{k \in K} \{ \Delta f_{i,k} \} \}, \quad (8.1)$$

wobei U die Menge der noch nicht eingeplanten Nachfragen ist und K die Menge der Touren. $\Delta f_{i,k}$ ist die Veränderung des Zielfunktionswertes beim Einfügen von Nachfrage i in Tour k an die Position, die den Zielfunktionswert am meisten ansteigen lässt. Ist es unzulässig die Nachfrage i in Tour k einzufügen, dann ist $\Delta f_{i,k} = \infty$.

8.6.4 Regret - Heuristik

Regret-Heuristik versucht, die Ergebnisse der Basic Greedy Heuristik zu verbessern¹⁵⁴. In jeder Iteration wird eine Nachfrage eingefügt. Zunächst alle noch keiner Tour zugeordnete Nachfragen - an ihre beste zulässige Einfügeposition und anschließend werden alle besten zulässigen Einfügepositionen in allen Touren gefunden. Im nächsten Schritt wird die Nachfrage mit der höchsten Kostendifferenz von ihrer zweitbesten zulässigen Einfügeposition zu ihrer besten zulässigen Einfügeposition an ihre beste zulässige Einfügeposition eingefügt. Mit anderen Worten, sie wird an die Position eingefügt, die das höchste Bedauern auslöst, wenn sie dort nicht eingefügt wird. Der Algorithmus wird fortgesetzt bis es keine Nachfragen mehr gibt, die noch keiner Tour zugeordnet wurden oder es keinen zulässigen Einfügeort mehr für Nachfragen gibt, die noch keiner Tour zugeordnet wurden. Dies wird *Regret - 2 - Heuristik* genannt, die *Regret - 3 - Heuristik* nimmt das Maximum der Differenz zwischen der drittbesten und der besten Position, die *Regret-m-Heuristik* nimmt das Maximum der

¹⁵⁴Vgl. Ropke S. et al. (2006): S.461 [77]

Differenz zwischen der m -besten und der besten Position. Die Regret - k - Heuristik kann formal durch die folgende Gleichung beschrieben werden.

$$\max_{i \in U} \left\{ \sum_{j=1}^k (\Delta f_{i,x_{ij}} - \Delta f_{i,x_{i1}}) \right\}, \quad (8.2)$$

wobei U die Menge der noch nicht eingeplanten Nachfragen ist. $\Delta f_{i,x_{ij}}$ sind die Kosten für das Einfügen von Nachfrage i an ihre j -beste Position.

Kapitel 9

Vergleich sukzessive Standortplanung (LAP) und Tourenplanung (VRP) mit kombinierter Standort-Tourenplanung (LRP)

Bevor wir die dynamischen LRP-Modelle näher untersuchen, wird in diesem Abschnitt der Vergleich einer kombinierten mit einer sukzessiven Standort- und Tourenplanung angestellt. Für den Vergleich wird **AdL(e)R**[©] Optimierungstool zur Anwendung kommen.

9.1 Restriktionen und Regeln

Die Kapazität der Depots soll so gewählt werden, dass nicht alle Depots eröffnet werden müssen, sondern in der Regel zwischen zwei und vier Standorte. Müssen alle Depots eröffnet werden, findet keine Standortoptimierung statt. Die Nachfrage der Kunden muss stets kleiner als die Kapazität der Fahrzeuge und Depots sein, da ein Kunde nicht von mehreren Fahrzeugen oder Depots beliefert werden kann. Es wird nur der statische Fall, also die Nachfrage einer Periode, betrachtet. Bei den Fahrten handelt es sich um geschlossene Touren, da jedes Fahrzeug zum Depot zurückkehren muss¹⁵⁵. Das Fahrzeug darf nicht, wie bei einer offenen Tour, ein beliebiges Depot für die Rückfahrt wählen¹⁵⁶. Es können nur die Fixkosten der Fahrzeuge verändert werden. Die variablen Kosten werden in der Software mit der Multiplikation der euklidischen Distanz mit $100 GE$ berechnet. Es steht eine homogene und unbegrenzte Fahrzeugflotte zur Verfügung. Es handelt sich um eine homogene Fahrzeugflotte, da alle Fahrzeuge die gleiche Kapazität haben und dieselben Fixkosten ver-

¹⁵⁵Vgl. Duhamel C. et al. (2010): S.1913 [32]

¹⁵⁶Vgl. Vahrenkamp R. et al. (2007): S.444 [94]

ursachen. Die Anzahl der benötigten Fahrzeuge berechnet die Software. Die Gesamtkosten setzen sich demnach wie folgt zusammen:

$$Kosten(Gesamt) = \sum Fixkosten(Depot) + Kosten(Touren) \quad (9.1)$$

$$Kosten(Touren) = AnzahlFahrzeuge * Fixkosten(Fahrzeug) + \sum VariableKosten(Fahrt) \quad (9.2)$$

$$VariableKosten(Fahrt) = EuklidischeDistanz * 100 \quad (9.3)$$

9.2 Parameter

AdL(e)R[©] bietet diverse Möglichkeiten den Algorithmus einzustellen (s. Kapitel 14). In diesem Abschnitt werden folgende Parameter für die Analyse variiert:

- MaxNumberOfIndividuals 500
- MaxNumberOfIndividualsWithoutImprovement 250
- NumberOfRuns 10

MaxNumberOfIndividuals

definiert die maximale Anzahl der Individuen. Der Algorithmus wird unterbrochen, sobald 500 Lösungen berechnet wurden und das Ergebnis wird abgespeichert.

MaxNumberOfIndividualsWithoutImprovement

definiert das zweite Abbruchkriterium. Wurden in den letzten 250 Berechnungen keine Verbesserungen erzielt, wird der Algorithmus ebenfalls beendet, da in dieser Berechnung wahrscheinlich keine bessere Lösung gefunden werden kann.

NumberOfRuns

legt die Anzahl der Wiederholungen, die die Software durchläuft, fest.

Je höher der jeweilige Parameter ist, desto besser wird statistisch gesehen das Ergebnis, allerdings dabei wird mehr Zeit benötigt. Demnach müssen zunächst Parametereinstellungen ermittelt werden, welche bereits nach wenig Rechenzeit eine Tendenz aufweisen. Abweichende Instanzen können anschließend intensiver berechnet werden.

9.3 Sukzessive vs. Kombinierte Planung

Der potentielle Standort wird im sukzessiven Verfahren ermittelt, indem die Kosten berechnet werden, die entstehen, wenn jedes Fahrzeug nur einen Kunden beliefert. Dies wird in der Literatur als *Full Truck Load (FTL)* bezeichnet, da ein Fahrzeug eine einzige Ladung ohne Umschlag vom Versender zum Empfänger transportiert¹⁵⁷. Der einzige Unterschied ist, dass die Kapazität des Fahrzeuges in den meisten Fällen nicht ausgelastet ist, da Teilladungen hier als Komplettladung betrachtet werden. Das sukzessive Verfahren wählt nun die Standorte, die beim FTL die geringsten Gesamtkosten verursachen. Der beste Standort wird ausgewählt, die ursprünglich berechneten Komplettladungen auf mehrere Teilladungen aufgeteilt und mit Hilfe der Routen- und Tourenplanung **FLP+VRP** berechnet. Die Standorte dürfen nicht mehr verändert werden. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird, aufgrund der Nomenklatur der Software, für die Standortplanung im sukzessiven Verfahren die Bezeichnung FLP verwendet.

Der Standort im kombinierten Verfahren wird mit Hilfe des **LRP** Algorithmus berechnet, welcher Standort- und Tourenplanung simultan betrachtet¹⁵⁸. Auch hier werden die Standorte mit den geringsten Gesamtkosten ausgewählt. Anschließend wird der gleiche **VRP** Algorithmus wie beim sukzessiven Verfahren durchlaufen. Dieses kombinierte Verfahren hat den Vorteil, dass eventuelle Einsparungen durch Routen- und Tourenplanungen vorzeitig erkannt und berücksichtigt werden können.

Nach den Berechnungen fasst die Software die Ergebnisse der Algorithmen in vier Excel - Tabellen zusammen. Diese enthalten jeweils Informationen über die Gesamtkosten (Depotkosten und Tourenkosten), über die Anzahl der Depots und Fahrzeuge und über die Länge der Berechnungsdauer des jeweiligen Algorithmus.

Sukzessive Vorgehen: **FLP+VRP**
Kombinierte Vorgehen: **LRP/VRP**

9.4 Erstellen von Instanzen

9.4.1 Excel-Tool zur Erstellung von Instanzen

Die Instanzen werden mit Hilfe des im Kapitel 7 bereits vorgestellten Excel-Tools generiert. In der Eingabemaske (Siehe Anhang A.1) können den Variablen verschiedene Werte zugewiesen werden. Mit Hilfe der Funktion „ZUFALLSBEREICH“ werden die Koordinaten der

¹⁵⁷Vgl. Vahrenkamp R. et al. (2007): S.275 [93]

¹⁵⁸Vgl. Min H. et al. (1998): S.1 [61]

Instanzen erstellt. Im Normalfall werden Depots und Kunden auf der X - und Y -Achse zufällig im Bereich 1 bis 50 verteilt. Allerdings besteht auch die Möglichkeit, die Depots und/oder Kunden zentral, dezentral oder auf bis zu vier Clustern zu verteilen. Die Anordnung der Kunden und Depots wird im gleichen Tabellenblatt visualisiert dargestellt. Die weiteren Einstellungsmöglichkeiten sind Kapazitäten von Fahrzeugen und Depots, Fixkosten der Fahrzeuge und Depots und der Bedarf der Kunden. Die Kapazität und Kosten der Depots und die Nachfrage der Kunden können in einem Intervall eingegeben werden, in dem die Werte zufällig verteilt sind. Fahrzeugkapazität und die fixen Fahrzeugkosten hingegen sind konstante Werte, da von einer homogenen Fahrzeugflotte ausgegangen wird. Es besteht die Möglichkeit, Instanzen zu erstellen mit 50, 100 und 200 Kunden und 5, 10, 20 und 40 Depots.

Mit den Makros „Koordinaten zurücksetzen“ und „Variablen zurücksetzen“ können die Ausgangswerte, welche sich an den Prodhon-Instanzen (s.9.4.2) orientieren, eingestellt werden. Mit der Makroprogrammierung „Exportieren“ werden die verschiedenen Instanzen mit folgender Nomenklatur als Textdokument (.txt Datei) gespeichert: „coord“ + „pp“ + „Instanz Nr.“ + „.dat“. Die Bezeichnung „coord“ und die Endung „.dat“, welche die Datei als DAT-Datei abspeichert, sind notwendig, damit **AdL(e)R**[©] die Instanz erkennt und berechnen kann. Die Initialen „pp“ dienen der Unterscheidung von den Prodhon-Instanzen. Anschließend werden diese in den jeweiligen nonperiodic Ordner exportiert, in den die Instanzen eingespeist werden.

9.4.2 Initial-Instanzen

Für die nachfolgenden Auswertungen werden sowohl für die sukzessive Betrachtung von Standort- und Tourenplanung als auch für das kombinierte Standort-Touren-Problem Instanzen verwendet, die von Prins, Prodhon und Wolfer Calvo entwickelt wurden, um Ergebnisse einer lokalen Suche zu bestimmen. Die Instanzen sind frei zugänglich und können auf der Webseite von Caroline Prodhon¹⁵⁹ heruntergeladen werden. Das Set zählt mit bis zu 200 Kunden und Kapazitätsbeschränkungen für Touren und Depots zu den größten Instanzen in der Literatur. Es wurde entwickelt, um einen Vergleich von Metaheuristiken für das LRP zu ermöglichen.

Der Name der Instanz enthält die Anzahl der Kunden n und die Anzahl der möglichen Depots m . Die anschließende Nummer gibt die Anzahl der Klassen wieder. Der abschließende Buchstabe a oder b steht für eine Fahrzeugkapazität von 70 oder 150 Mengeneinheiten. Die zwei Instanzen mit 50 Kunden und dem Kürzel „BIS“ am Ende unterscheiden sich durch stark voneinander abweichende Cluster. c_{ij} gibt die durch die Multiplikation der

¹⁵⁹<http://prodhonc.free.fr/homepage> [107]

euklidischen Distanz mit 100 und auf eine ganze Zahl gerundeten Transportkosten an. Die Kosten pro Transportstrecke liegen bei konstant 1000 GE. Die Koordinaten der Kunden wurden zufällig in der ebenen Fläche bestimmt. Die Parameter für Nachfrage, Depotkapazitäten und Fixkosten wurden danach so bestimmt, dass immer zwei oder drei Depots geöffnet werden.¹⁶⁰

Eine detaillierte Übersicht über einige beispielhafte Prodhon-Instanzen ist in Anhang A2 zu finden. Eine erste grobe Unterteilung lässt sich wie folgt nach Tabelle (9.1) durchführen.

Prodhon - Instanzen	Anzahl Kunden	Anzahl Depots	Fahrzeugkapazität
coord20-5-1; coord20-5-2	20	5	70
coord20-5-1b; coord20-5-2b	20	5	150
coord50-5-1; coord50-5-2; coord50-5-3	50	5	70
coord50-5-1b; coord50-5-2b; coord50-5-3b	50	5	150
coord50-5-2BIS; coord50-5-2bBIS	50	5	70/150
coord100-5-1; coord100-5-2; coord100-5-3	100	5	70
coord100-5-1b; coord100-5-2b; coord100-5-3b	100	5	150
coord100-10-1; coord100-10-2; coord100-10-3	100	10	70
coord100-10-1b; coord100-10-2b; coord100-10-3b	100	10	150
coord200-10-1; coord200-10-2; coord200-10-3	200	10	70
coord200-10-1b; coord200-10-2b; coord200-10-3b	200	10	150

Tabelle 9.1: Namensunterteilung der Instanzen von Caroline Prodhon

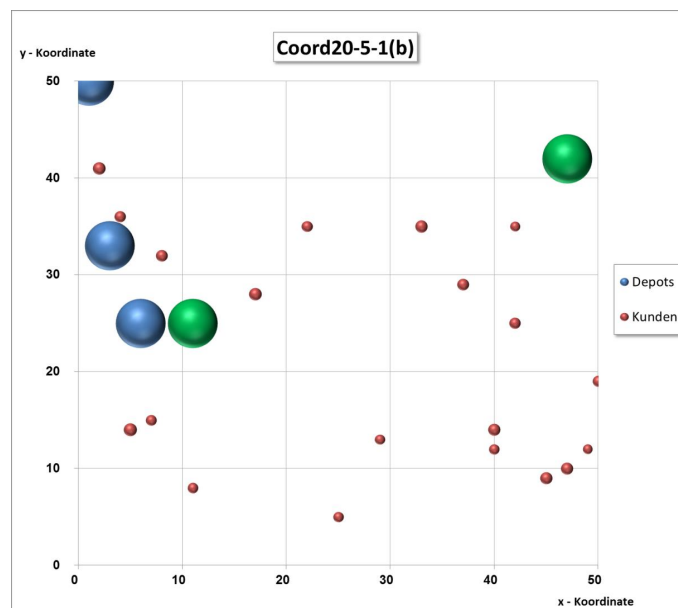


Abbildung 9.1: Grafische Darstellung einer Instanz (20-5-1b)(Eigene Darstellung)

¹⁶⁰Vgl. Prins C. et al. (2006): S.234 [70]; Prins C. et al. (2007): S.477f [69]; Duhamel C. et al. (2010): S.1919 [32]

In Abbildung (9.1) ist die grafische Darstellung einer Instanz ($20 - 5 - 1b$) zu finden. Die Flächen der Kugeln repräsentieren für die Depots die Kapazität und für die Kunden deren Nachfrage. Die beiden Depots, die bei einem Programmdurchlauf als beste Standorte bestimmt wurden, sind grün eingefärbt.

Da die anschließende Tourenplanung keine Zuordnung oder Tourenverläufe ausgibt, konnte dies in der Grafik nicht zusätzlich dargestellt werden.

Den Datei-Aufbau der Instanzen von Prodhon zeigt Abbildung (9.2).

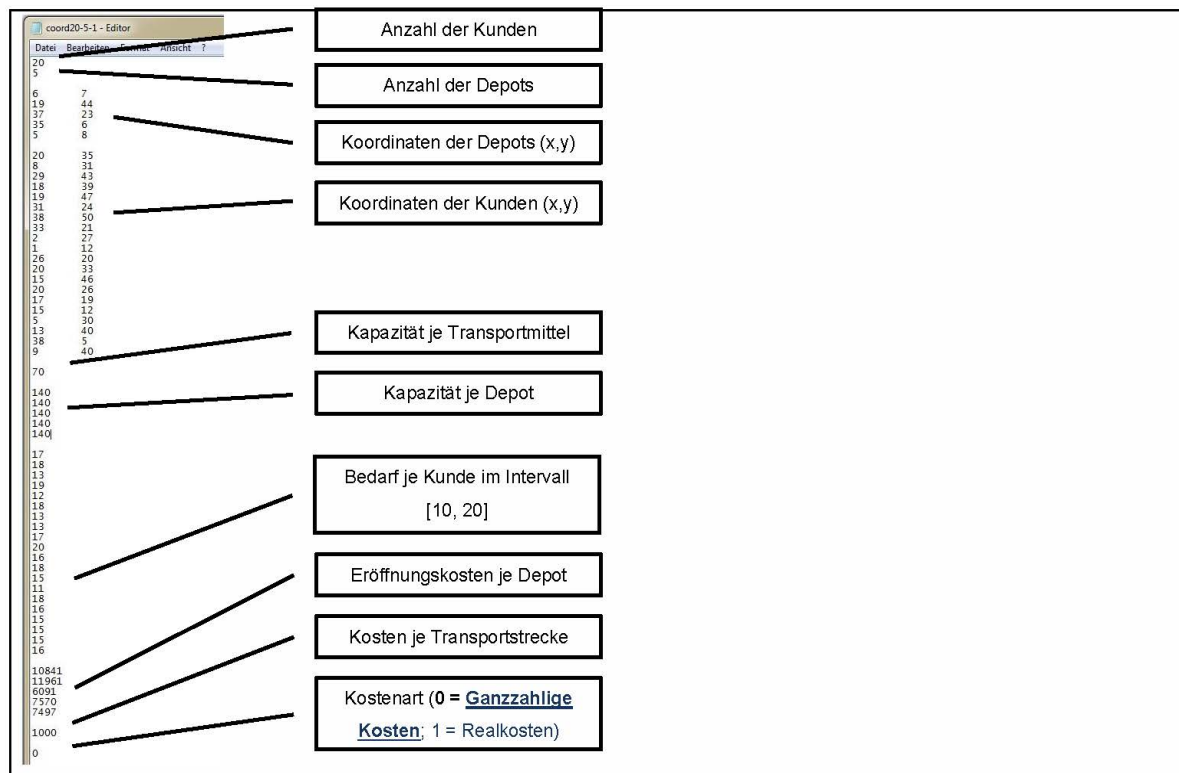


Abbildung 9.2: Erläuterung der Instanz-Dateien¹⁶¹

9.5 Ergänzung der Prodhon-Instanzen

Die Prodhon-Instanzen sollen in **AdL(e)R**[©] eingespeist, berechnet ($30.000 / 15.000 / 20$) und anschließend analysiert werden. Diese umfassen 30 Instanzen mit unterschiedlicher Anzahl an Kunden (20, 50, 100 und 200), Kapazitätsbeschränkungen bei Depots und Fahrzeugen (70 und 150) und Clusteranordnungen (1-3). Die Instanzen können auf der Website von Caroline Prodhon kostenlos zum Benchmarking der Algorithmen heruntergeladen werden.

¹⁶¹<http://prodhonc.free.fr/Instances/Format.txt> [110]

Bei 20 Kunden finden die Algorithmen vielfach die optimale Lösung, deswegen beziehen sich die Ergänzungen nur auf die Szenarien mit 50, 100 und 200 Kunden. Folgende Anordnungen der Kunden sollen hinzugefügt werden:

- 4 Cluster
- zentrale Lage
- dezentrale Lage

Zu jeder Anordnung gehört eine Instanz mit 5 und 10 Depots und Fahrzeugkapazitäten von 70 und 150. Es entstehen 12 neue Instanzen pro gleicher Kundenanzahl und 36 Instanzen insgesamt. Die Nomenklatur für die erstellten Instanzen wird von den Prodhon-Instanzen übernommen und um die Bezeichnung für zentral „z“ und dezentral „d“ ergänzt.

In Abbildung (9.3) sind beispielhafte Verteilungen für Kunden und Depots dargestellt. Links sind die Kunden dezentral und die Depots zentral angeordnet. In der rechten Abbildung verteilen sich die Kunden auf vier verschiedene Cluster und die Depots sind zufällig verteilt.

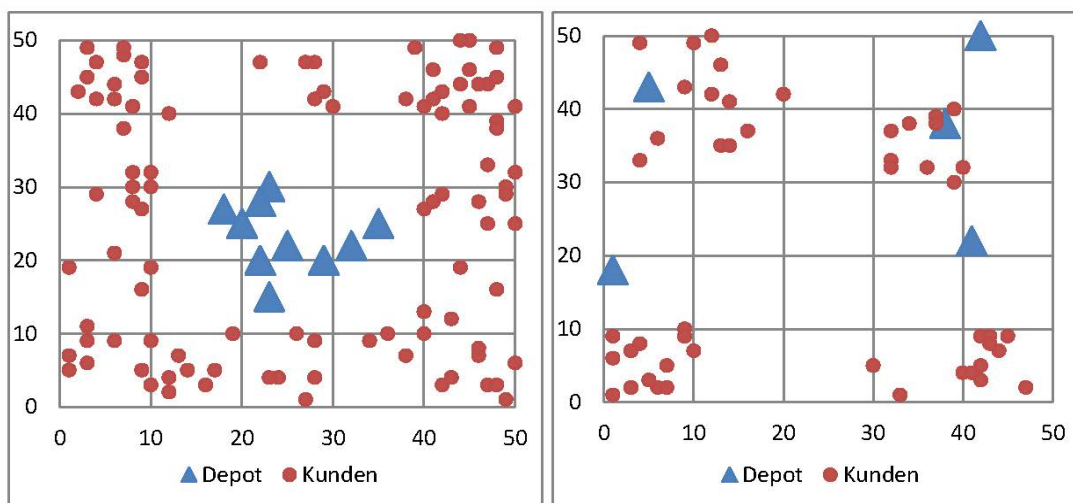


Abbildung 9.3: Verteilung von Depots und Kunden (Eigene Darstellung)

9.6 Auswertung aller Durchläufe

Insgesamt wurden 326 Instanzen berechnet und ausgewertet (Anhang A.3). Nachfolgend sollen die Ergebnisse von FLP + VRP, LRP und LRP/VRP verglichen werden. FLP Ergebnisse werden nicht analysiert, da diese keine Tourenplanung beinhalten und die Fahrtkosten

nicht vergleichbar sind. Die Ergebnisse der drei Algorithmen sollen im Paarvergleich analysiert werden (Siehe Anhang A.4). Diese Ergebnisse können wie folgt interpretiert werden:

		FLP + VRP		
		Max	∅	Min
LRP	Abweichung	51,5 %	0,8 %	-16,9 %
		+	o	-
VRP	Anzahl	158	13	155

Tabelle 9.2: Paarvergleich LRP/VRP vs. FLP + VRP

Positive Ergebnisse bei dem Paarvergleich LRP/VRP vs. FLP + VRP bedeuten, dass das kombinierte Verfahren besser ist. Mit Hilfe des Paarvergleichs LRP/VRP vs. LRP soll die Optimierung durch den nachgeschalteten LRP/VRP Algorithmus überprüft werden. Liefert LRP im Paarvergleich LRP vs. FLP + VRP signifikant bessere Ergebnisse, so ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass LRP/VRP ebenfalls bessere Ergebnisse liefert. In diesen Fällen eignet sich die kombinierte Betrachtung ebenfalls besser. Des Weiteren soll die Anzahl ermittelt werden, wie oft das jeweilige Verfahren bessere Ergebnisse als der Vergleichsalgorithmus liefert. Ergänzend sollen die Abweichung der jeweiligen Gesamtkosten dargestellt werden.

Die durchschnittliche Abweichung der Gesamtkosten von LRP/VRP zu FLP + VRP beträgt 0,8%. Die maximale positive Abweichung (LRP/VRP besser) beträgt 51,5% und die maximale negative (FLP + VRP besser) beträgt -16,9%. Bei 158 Instanzen berechnet LRP/VRP ein besseres Ergebnis und bei 155 Instanzen FLP + VRP. Die Gesamtkosten weichen mit -0,03% nur minimal voneinander ab.

		LRP		
		Max	∅	Min
LRP	Abweichung	44,1 %	2,5 %	-20,6 %
		+	o	-
VRP	Anzahl	226	12	88

Tabelle 9.3: Paarvergleich LRP/VRP vs. LRP

Der LRP/VRP Algorithmus verbessert die Ergebnisse von LRP im Durchschnitt um 2,5%. Demnach ist es sinnvoll, anschließend an die kombinierte Betrachtung eine Tourenplanung durchzuführen. Die maximale positive Abweichung beträgt 44% und die minimale beträgt -20,6%. Allerdings erzielt LRP bei 88 Instanzen bessere Ergebnisse als LRP/VRP. Dies liegt daran, dass nur die Standortentscheidung an die Routenplanung übermittelt wird und nicht die geringsten Gesamtkosten. Würde der LRP/VRP Algorithmus, sofern er kein besseres Ergebnis erzielen kann, das LRP Ergebnis ausgeben, könnten weitere Kosten gespart werden. In 55 Fällen erzielt der LRP Algorithmus das beste Ergebnis. Bei den anderen 33 Berechnungen ist LRP nicht besser als FLP + VRP, aber als LRP/VRP.

Positive Ergebnisse bei dem Paarvergleich LRP/VRP vs. FLP + VRP bedeuten, dass das kombinierte Verfahren besser ist. Mit Hilfe des Paarvergleichs LRP/VRP vs. LRP soll die Optimierung durch den nachgeschalteten LRP/VRP Algorithmus überprüft werden. Liefert LRP im Paarvergleich LRP vs. FLP + VRP signifikant bessere Ergebnisse, so ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass LRP/VRP ebenfalls bessere Ergebnisse liefert. In diesen Fällen eignet sich die kombinierte Betrachtung ebenfalls besser. Des Weiteren soll die Anzahl ermittelt werden, wie oft das jeweilige Verfahren bessere Ergebnisse als der Vergleichsalgorithmus liefert. Ergänzend sollen die Abweichung der jeweiligen Gesamtkosten dargestellt werden.

Der LRP/VRP Algorithmus verbessert die Ergebnisse von LRP im Durchschnitt um 2,5%. Demnach ist es sinnvoll, anschließend an die kombinierte Betrachtung eine Tourenplanung durchzuführen. Die maximale positive Abweichung beträgt 44% und die minimale beträgt -20,6%. Allerdings erzielt LRP bei 88 Instanzen bessere Ergebnisse als LRP/VRP. Dies liegt daran, dass nur die Standortentscheidung an die Routenplanung übermittelt wird und nicht die geringsten Gesamtkosten. Würde der LRP/VRP Algorithmus, sofern er kein besseres Ergebnis erzielen kann, das LRP Ergebnis ausgeben, könnten weitere Kosten gespart werden. In 55 Fällen erzielt der LRP Algorithmus das beste Ergebnis. Bei den anderen 33 Berechnungen ist LRP nicht besser als FLP + VRP, aber als LRP/VRP.

		FLP + VRP		
		Max	\emptyset	Min
LRP	Abweichung	73,5 %	-3,6 %	-93,2 %
	Anzahl	116	12	198

Tabelle 9.4: Paarvergleich LRP vs. FLP + VRP

Die Notwendigkeit, anschließend an den LRP Algorithmus eine Tourenplanung durchzuführen, zeigt sich auch bei dem Vergleich mit den Ergebnissen aus dem sukzessiven Verfahren. LRP liefert im Durchschnitt 3,6% schlechtere Ergebnisse als FLP + VRP. Insgesamt berechnet FLP + VRP bei 198

Instanzen geringere Kosten. Die Gesamtkosten weichen um 6% ab.

Da der Algorithmus für die Tourenplanung bei beiden Verfahren der gleiche ist, können nur signifikante Unterschiede entstehen, wenn unterschiedliche Depots gewählt werden. Werden nur die Instanzen betrachtet, bei denen die Depotkosten unterschiedlich sind, so beträgt die Abweichung zwischen den beiden Verfahren 1,7%. In diesen Berechnungen ist LRP/VRP signifikant besser. Werden bei beiden Verfahren die gleichen Depotkosten berechnet, beträgt die Differenz zwischen beiden Verfahren -0,3%. Dies liegt an den zufälligen Schwankungen der Ergebnisse von heuristischen Lösungsverfahren.

Des Weiteren sind die Mittelwerte vom LRP/VRP Algorithmus um 1,1% besser. Beim kombinierten Verfahren weichen die Depotkosten um 5,7% und bei den Tourenkosten um -4,3% ab. Bei der Anzahl der benötigten Depots und eingesetzten Fahrzeuge gibt es keine signifikanten Unterschiede.

Die durchschnittliche Abweichung aller Berechnungen beträgt 0,8%. Werden nur die Berechnungen betrachtet, bei denen unterschiedliche Depots ausgewählt werden, beträgt die durchschnittliche Abweichung 1,7%.

Berechnung Nr.50 hat gezeigt, dass Kosten, mit Hilfe vom LRP, gespart werden können. FLP bevorzugt die teuren zentralen Depots, da die höheren Depotkosten deutlich geringer sind, als die variablen Fahrtkosten von den dezentralen Depots. Dies liegt daran, dass jedes Fahrzeug nur einen Kunden beliefert und keine Tourenplanung stattfindet. Der LRP Algorithmus berechnet, dass die Kosten für die Gesamtdistanz von den dezentralen Depots durch Tourenplanung deutlich geringer sind als die zusätzlichen Depotkosten.

Werden bei FLP und LRP die gleichen Standorte ausgewählt, kann es dennoch zu größeren Schwankungen bei den Gesamtkosten kommen. Obwohl FLP + VRP und LRP/VRP die gleichen Algorithmen sind, wurden Abweichungen von bis zu 3% bei den Gesamtkosten berechnet. Demnach können die Gesamtkosten beim optimalen Standort durch schlechte Ergebnisse bei der Tourenplanung höher sein, als beim suboptimalen Standort mit einer sehr guten Tourenplanung.

Der LRP Algorithmus leitet nur die ausgewählten Standorte, nicht aber die Gesamtkosten weiter. In 85 Berechnungen erzielt LRP eine bessere Lösung als der LRP/VRP Algo-

rithmus. Die zwischenzeitliche bessere Lösung von LRP wurde somit verworfen. Hier könnte der LRP/VRP Algorithmus umgeschrieben werden, so dass er das Ergebnis von LRP ausgibt, sofern er kein besseres erzielen konnte. Des Weiteren setzt LRP bei Berechnung Nr.68 ein Fahrzeug mehr ein und spart über 70% der Kosten. Der FLP + VRP Algorithmus erkennt dies nicht.

Bei vielen Instanzen werden drei von fünf möglichen Depots eröffnet. Die Wahrscheinlichkeit, dass beide Verfahren die gleichen Standorte eröffnen, ist somit relativ hoch und die Abweichung der Gesamtkosten nicht signifikant.

Kapitel 10

Modelle des LRP mit variablen Standortentscheidungen

10.1 Typisierung der Modellvarianten

In dieser Arbeit werden erstmalig Modelle des dynamischen Location-Routing Problems mit variablen Standortentscheidungen aufgestellt. Das betrachtete logistische Problem kann als eine Erweiterung des klassisch-statischen, kapazitierten LRP¹⁶² verstanden werden, das durch eine Ausweitung der zeitlichen Dimension und eine Flexibilisierung von Standortentscheidungen durch variables Öffnen und Schließen von (potentiellen) Depots spezifiziert wird. Mit jedem Öffnen, Betreiben und Schließen von Standorten sind Öffnungs-, fixe Betriebs- und Schließungskosten verbunden. Als eine Untergruppe der Klasse des Location-Routing Problems dient auch die dynamische Variante der Ermittlung eines optimalen (kostenminimalen) Tourenplans, der in die Problematik der Findung eines kostengünstigsten Standorts integriert ist und somit strategische und taktische Planungsebene verknüpft.

Zweck der Modellierung ist, anhand der Simulation unterschiedlicher Nachfragentwicklungen zu untersuchen, inwiefern das Zulassen einer Veränderung des Betriebszustands der betrachteten Depots im zeitlichen Verlauf ergebniswirksam ist, wenn eine mangelnde Kenntnis über Nachfragetendenzen in einem längeren Planungshorizont existiert. Hierbei werden die folgenden Problemvarianten differenziert:

- das dynamisch - deterministische LRP mit periodischer Konfiguration der Standorte
- das dynamisch - deterministische LRP mit einmaliger Konfiguration der Standorte
- das dynamisch - stochastische LRP mit periodischer Konfiguration der Standorte

¹⁶²Angelehnt an Prins C. et al. (2007): S.470-483 [69]

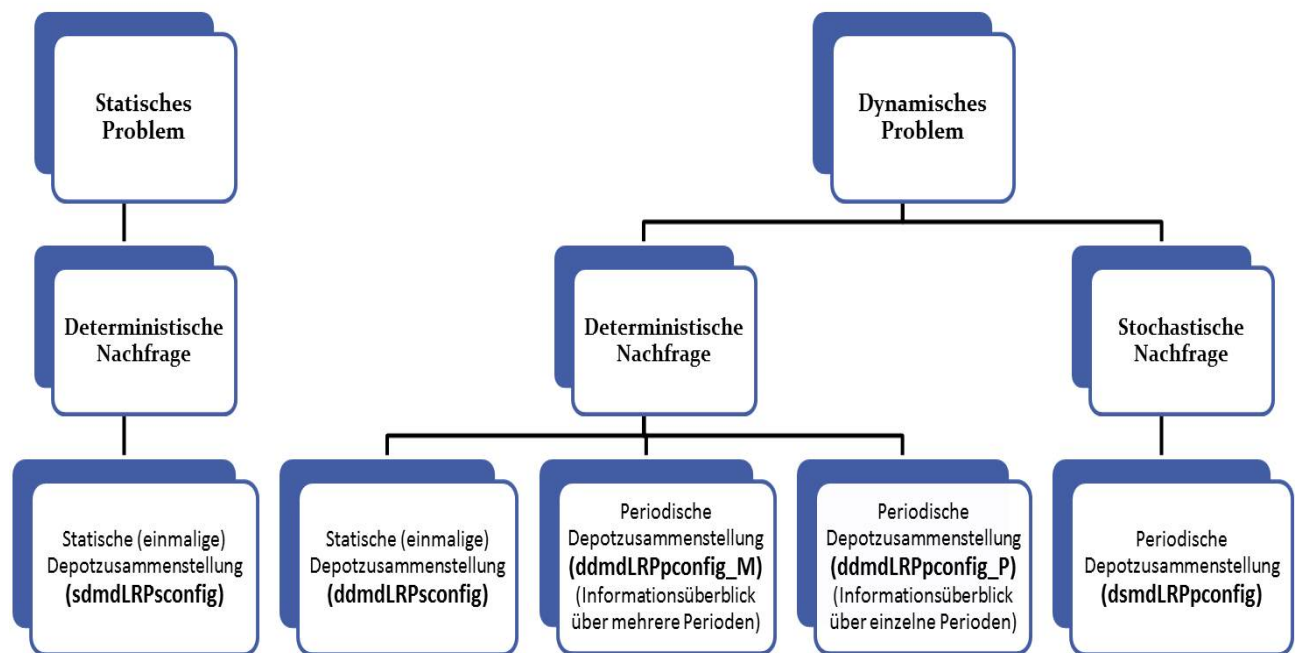


Abbildung 10.1: Klassifizierung von Modellvarianten (Eigene Darstellung)

Eine kategorische Einordnung zeigt Abbildung (10.1). Sämtliche Probleme kennzeichnen eine Mehrperiodizität.

10.2 Differenzierung der einzelnen Modellvarianten

1. Dynamisch - deterministisches LRP mit periodischer Standortkonfiguration.

Mit einperiodischer Informationsnutzung

Kundennachfragemengen d_{jt} für eine Periode t sind erst zu Beginn ebendieser Periode gegeben. Ausgehend von einer gegebenen Depotkonfiguration (Ausgangswert: sämtliche Depots sind geschlossen) wird in jeder Periode anhand der vorliegenden Daten das LRP neu gelöst. Folglich erfolgt auch die Depotkonfiguration periodisch. In jeder Periode t sind (unter Berücksichtigung des Depotkonfigurationszustands der vorausgehenden Periode $t - 1$) eine Weiternutzung bereits geöffneter Standorte, ihre Schließung, oder aber die Eröffnung von anderen potentiellen Depots möglich. Mit sämtlichen Entscheidungen sind fixe Öffnungs-, Betriebs- oder Schließungskosten verbunden. Die folgende Abbildung dient der Visualisierung dieses Sachverhalts.

Rote Balken stellen zulässige Zeitpunkte der Depotkonfiguration dar.

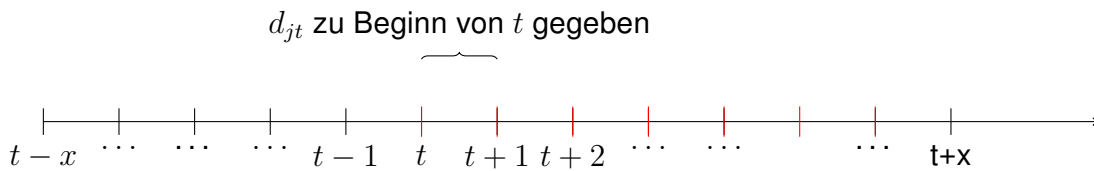


Abbildung 10.2: Dynamisch-deterministisches LRP mit einperiodischer Informationsnutzung

⇒ Implikation für die Generierung von Instanzen:

Entsprechend der Größe des betrachteten Planungshorizonts ist eine Dateninstanz zu generieren, die für jede Periode eine Nachfragemenge für jeden Kunden generiert. Im Rahmen einer Zählschleife ist in jeder Iteration ein periodenspezifischer Datensatz einzulesen.

Mit mehrperiodischer Informationsauswertung

Kundennachfragemengen sind für jede Periode eines Planungshorizonts H gegeben. Auch hier können periodische Depotkonfigurationen (Öffnung, Betrieb, Schließung) vorgenommen werden. Diese Problemvariante dient als Benchmark für die anderen Problemvarianten, da sie einen optimalen Zielfunktionswert bei tatsächlicher Nachfrageveränderung liefert und folglich eine Quantifizierung der Abweichung von Zielfunktionswerten bei mangelnder Kenntnis über den tatsächlichen Nachfrageverlauf. Der Planungszeitpunkt t kann dabei auch als gegenwärtiger Betrachtungszeitpunkt von Nachfragedaten eines vergangenen Nachfragehorizonts H interpretiert werden.

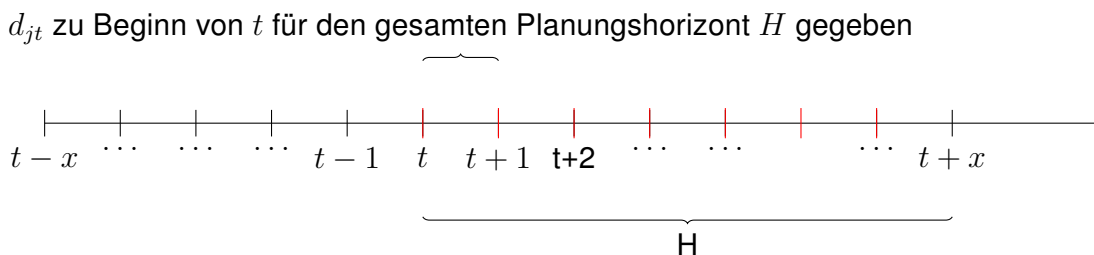


Abbildung 10.3: Dynamisch-deterministisches LRP mit mehrperiodischer Informationsnutzung

⇒ Implikation für die Generierung von Instanzen:

Entsprechend der Größe des betrachteten Planungshorizonts ist auch für diesen Fall eine Dateninstanz zu generieren, die für jede Periode eine Nachfragemenge für jeden Kunden generiert. Im Gegensatz zu dem Fall mit einperiodischer Informationsauswertung wird hier jedoch die gesamte Datenmatrix einmalig eingelesen.

2. Dynamisch-deterministisches LRP mit einmaliger Standortkonfiguration

Im Gegensatz zum Fall mit periodischer Standortkonfiguration lässt diese Modellvariante lediglich eine einmalige Standortkonfiguration zu. Sie berücksichtigt somit den Sachverhalt, dass Standortentscheidungen in der Regel von langfristigem Charakter sind und errichtete Depots bereits aufgrund der für sie notwendigen hohen Investitionsaufwendungen nicht in jeder Periode neu überdacht werden können. Ergebnisse dieser Modellvariante ermöglichen somit einen Vergleich der Zielwertveränderungen beim Fall periodischer Depotkonfigurationen.

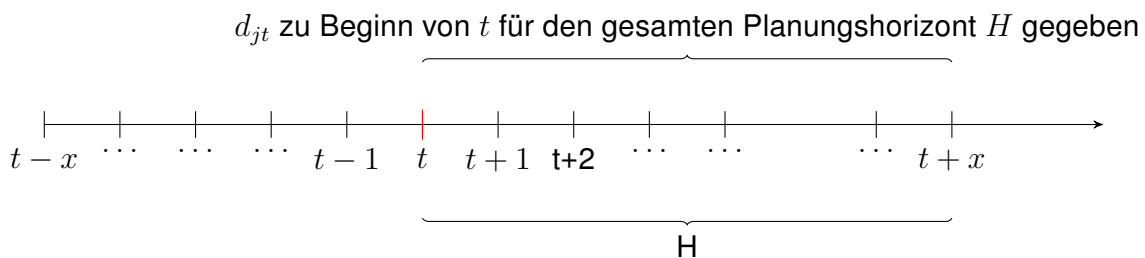


Abbildung 10.4: Dynamisch-deterministisches LRP mit einmaliger Standortkonfiguration

⇒ Implikation für die Generierung von Instanzen:

Entsprechend der Größe des betrachteten Planungshorizonts ist eine Dateninstanz zu generieren, die für jede Periode eine Nachfragemenge für jeden Kunden generiert. Wie im dynamisch-deterministischen Fall mit periodischer Standortkonfiguration und mehrperiodischer Informationsauswertung, wird auch hier die gesamte Datenmatrix einmalig eingelesen.

3. Dynamisch-stochastisches LRP mit einmaliger / periodischer Standortkonfiguration unter Verwendung von Prognosedaten

Ausgehend von einer Zeitreihe mit Vergangenheitsdaten werden für einen festgelegten Planungshorizont zukünftige Nachfrageprognosen für jeden Kunden in jeder Pe-

riode ermittelt. Das Modell entspricht den dynamisch – deterministischen Modellen, allerdings erfolgt die Optimierung für die Periode t anhand der Prognosewerte.

Mit periodischer Standortkonfiguration

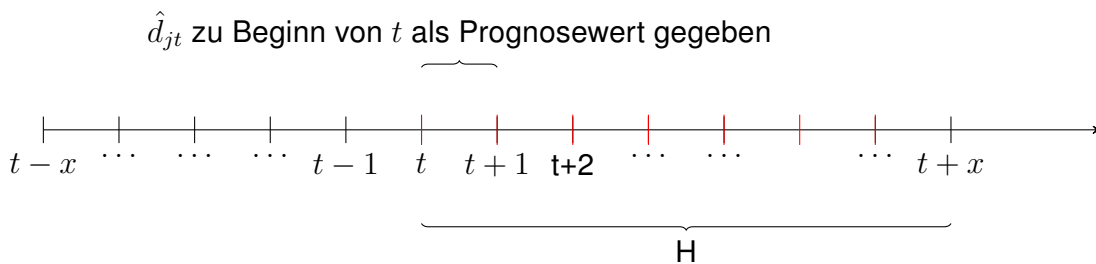


Abbildung 10.5: Dynamisch-stochastisches LRP mit periodischer Standortkonfiguration

Mit einmaliger Standortkonfiguration

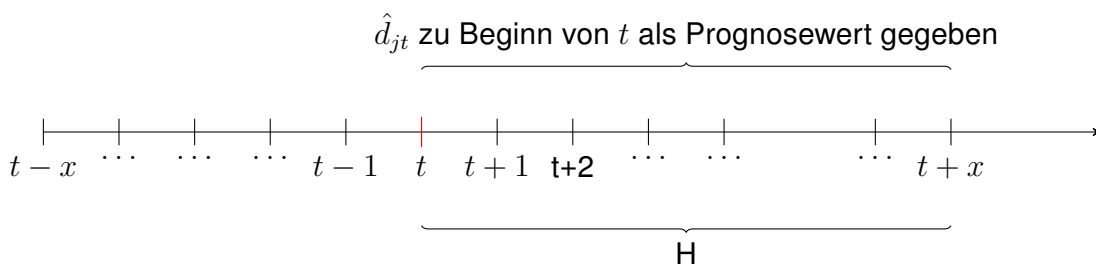


Abbildung 10.6: Dynamisch-stochastisches LRP mit einmaliger Standortkonfiguration

⇒ Implikation für die Generierung von Instanzen:

Entsprechend der Größe des Zeithorizonts, für den die Nachfragedaten zu prognostizieren sind, ist eine Dateninstanz mit prognostizierten Nachfragemengen zu generieren. Wie die Daten eingelesen werden, ist im Rahmen der genaueren Spezifizierung des Prognoseverfahrens zu bestimmen (Zeitfenster, Zeithorizont, rollierend vs. fix etc.).

Es gelten auch weitere Annahmen, die sämtliche Modellvarianten erfüllen müssen, um miteinander vergleichbar sein zu können. Diese Prämissen sind im Folgenden – bevor eine Erläuterung der einzelnen Varianten erfolgt – erläutert.

Erläuterung zu den Modellannahmen

Eine Charakterisierung der Modellvarianten erfolgt anhand der Kriterien *Typus der verwendeten Daten*, *Planungsperiode*, *Zielfunktion*, *Lösungsraum*, *Standortkonfiguration*, *Anzahl der Depots*, *Art und Größe der Fahrzeugflotte*, *Struktur der Routen* und *Nachfragestruktur*.

Die Eigenschaft *Typus der verwendeten Daten* kennzeichnet die Determiniertheit der für das Planungsproblem verwendeten Daten. Hierbei wird unterschieden zwischen Daten, die zum Planungszeitpunkt bereits für einen fixierten zukünftigen Zeitraum bekannt sind (\Rightarrow deterministische Datengrundlage), und solchen, die nicht determiniert sind (\Rightarrow stochastische Datengrundlage). Wie in der wissenschaftlichen Literatur zum Location-Routing Problem üblich, bezieht sich die Ausprägung des Merkmals des Datentyps lediglich auf die Nachfragemengen der im Rahmen der Tourenplanung zu befriedigenden Kunden¹⁶³.

Anhand der Eigenschaft *Planungsperiode* wird differenziert, ob es sich um ein statisches oder dynamisches Problem handelt. Wie Abbildung (10.1) bereits andeuten lässt, sind die betrachteten Modellvarianten dynamisch, d.h. Nachfragemengen variieren in Abhängigkeit der betrachteten Periode.

Das Merkmal *Zielfunktion* ist in sämtlichen Varianten gleich ausgeprägt. Sämtliche Problemtypen zielen auf eine Minimierung der Gesamtkosten ab, unter die sich Depot-, fixe Fahrzeug- und variable Transportkosten subsumieren lassen.

Die mathematische Kodierung der Standorte ist durch den *Lösungsraum* spezifiziert und kontinuierlich. Sämtliche Standorte sind durch eine x- und y-Koordinate in einem Koordinatensystem mit festgelegtem Definitionsbereich gekennzeichnet. Die Lösungsfindung erfolgt nicht durch die Suche kostenoptimaler Punkte auf einem Graphen.

Ein weiteres Charakteristikum, in dem sich die Modellvariante erheblich voneinander unterscheiden, ist die *Standortkonfiguration*. Sie unterscheiden sich darin, ob die Konfiguration *dynamisch-variabel* ist, d.h. in jeder Periode eine Entscheidung über die Öffnung und/oder Schließung eines Depots getroffen werden kann, oder als *statisch-fix* angenommen wird und eine Konfiguration lediglich einmalig – etwa zu Beginn eines gesamten Planungshorizonts – erfolgt.

In sämtlichen Modellvarianten werden zudem *mehrere potentielle Depots* mit *beschränkten Depotkapazitäten* betrachtet. Zudem wird vereinfachend die Annahme getroffen, dass die Summe der Kapazitäten aller potentiellen Depots $\sum_{i \in I} W_i$ (I entspricht der Menge aller Depots) die Gesamtmenge der Kundenbedarfe $\sum_{j \in J} d_j$ (J entspricht der Menge aller Kunden) decken kann, d.h.

$$\sum_{i \in I} W_i \geq \sum_{j \in J} d_j \quad (10.1)$$

¹⁶³Vgl. Nagy G. et al. (2007): S.654-656 [63]

Das Attribut *Art und Größe der Fahrzeugflotte* stellt auf einen Fuhrpark ab, der sich durch Fahrzeuge kennzeichnet, dessen *Kapazitäten begrenzt* und *homogen* in ihrer Größe sind. Zudem wird unterstellt, dass die Gesamtzahl der Fahrzeuge keinen Engpass in der Befriedigung der Kundenachfragemengen repräsentiert. D.h. jede einzelne Kundennachfrage d_j muss durch ein einzelnes Fahrzeug k befriedigt werden können; zudem ist die Anzahl der Fahrzeuge so zu wählen, dass die Summe der zur Verfügung stehenden Laderaumkapazitäten die Kundengesamtnachfrage abdecken kann.

Eine weitere Prämisse bezieht sich auf die *Struktur der Routen*. Demnach sind nur solche Routen erlaubt, die in *dem* Depot enden, von dem sie starten. In der wissenschaftlichen Literatur werden sie als sog. „*chain barring constraints*“ bezeichnet¹⁶⁴, da sie eine Kettenbildung durch Divergieren von Abfahrts- und Ankunftsdepot eines Fahrzeugs verhindern und lediglich Zyklen zulassen.

Eine letzte Annahme restringiert die *Nachfragestruktur* der Kunden. So muss jeder Kunde befriedigt werden und die Nachfragemenge jedes Kunden darf in keiner Periode des gesamten Planungshorizonts Null werden. Bevor auf die verschiedenen Modelle des dynamischen Falles des Location Routing eingegangen wird, wird zunächst einmal das zugrunde liegende Modell des statischen Falles erläutert werden.

10.3 Statisches LRP mit einmaliger Konfiguration der Standorte

Modellvariante: *sdmdLRPsconfig*¹⁶⁵

Im *statischen deterministischen Multi-Depot-Location-Routing-Problem mit statischer Depotzusammenstellung* wird lediglich eine Periode betrachtet. Es wird angenommen, dass die Daten, auf denen die Berechnungen basieren, deterministisch sind und somit die gesamten Nachfragen im Voraus bekannt sind. Die Zielfunktion minimiert die Gesamtkosten, die aus Depotkosten (fixe Eröffnungskosten, Betriebskosten und Stilllegungskosten) und Fahrzeugkosten (variable und fixe Kosten) bestehen. Die Depotzusammenstellung ist statisch und wird einmal durchgeführt. Mehrere Depots mit fixen Kapazitäten werden bei der Netzwerkkonfiguration betrachtet. Darüber hinaus wird eine homogene und unbegrenzte Fahrzeugflotte mit fixen Kapazitäten in jedem Depot aufgefunden. Dieses Problem ist das einfachste der fünf Probleme in Bezug auf periodische Depotzusammenstellungen und schwankende Nachfragen.

¹⁶⁴Vgl. Laporte G. et al. (1986): S.293ff [57]

¹⁶⁵In Anlehnung an Prins C. et al. (2007): S.470-483 [69]

Prämissen:

- Typus der verwendeten Daten
 - deterministisch
- Planungsperiode
 - statisch
- Zielfunktion
 - Minimierung der Gesamtkosten
- Lösungsraum
 - kontinuierliche Standortplanung
- Standortkonfiguration
 - statisch-fix
- Anzahl der Depots
 - mehrere
 - Depotkapazitäten beschränkt
- Art und Größe der Fahrzeugflotte
 - homogen (wählbar zwischen endlich und unendlich groß)
 - Fahrzeugkapazitäten beschränkt
- Struktur der Routen
 - zyklisch (jede Route endet in dem Depot, von dem sie startet)
- Nachfragestruktur
 - die Nachfrage jedes Kunden wird durch ein einzelnes Fahrzeug befriedigt
 - jede Nachfrage muss befriedigt werden
 - die Summe sämtlicher auf einer Tour befriedigten Kundennachfragen darf die Kapazität eines einzelnen Fahrzeugs nicht überschreiten
 - Nachfragestruktur bleibt unverändert, d.h. Nachfragen variieren lediglich in ihrer Ausprägungshöhe - Nachfragen in Höhe von Null sind nicht erlaubt
- Zusätzliche Annahmen
 - Zweistufiges Modell
 - Entfernungsmatrix ist symmetrisch

Entscheidungsvariablen:

x_{ijk} = 1, falls die Verbindung (i, j) mit dem Fahrzeug k befahren wird
= 0, sonst

y_i = 1, falls Depot i errichtet und betrieben wird
= 0, sonst

f_{ij} = 1, falls Kunde j Depot i zugeordnet wird
= 0, sonst

Parameter:

- V Menge aller Knoten, d.h. eine Vereinigung aus der Menge aller Depots I und der Menge sämtlicher Kunden J
- I Menge aller Depots
- J Menge aller Kunden
- K Menge aller Fahrzeuge (homogene Fahrzeugflotte)
- c_{ij} Fahrkosten zwischen i und j
- O_i Kosten der Eröffnung des Depots $i \in I$
- W_i Kapazität des Depots $i \in I$
- d_j Nachfrage des Kunden j
- Q Kapazität des Fahrzeugs $k \in K$
- F Fixkosten für die Nutzung des Fahrzeugs $k \in K$

Zielfunktion:

$$\text{Min} \quad \sum_{i \in I} O_i y_i + \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} c_{ij} x_{ijk} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} F x_{ijk} \quad (10.2)$$

u.d.N.:

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in V} x_{ijk} = 1, \quad \forall j \in J \quad (10.3)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{i \in V} d_j x_{ijk} \leq Q, \quad \forall k \in K \quad (10.4)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ijk} - \sum_{j \in V} x_{jik} = 0, \quad \forall k \in K, \quad \forall i \in V \quad (10.5)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ijk} \leq 1, \quad \forall k \in K \quad (10.6)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ijk} \leq |S| - 1, \quad \forall S \subseteq J, \quad \forall k \in K \quad (10.7)$$

$$\sum_{u \in J} x_{iuk} + \sum_{u \in V \setminus \{j\}} x_{ujk} \leq 1 + f_{ij}, \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J, \quad \forall k \in K \quad (10.8)$$

$$\sum_{j \in J} d_j f_{ij} \leq W_i y_i, \quad \forall i \in I \quad (10.9)$$

$$\sum_{j \in J} x_{jik} - \sum_{j \in J} x_{ijk} = 0, \quad \forall k \in K, \quad \forall i \in I \quad (10.10)$$

¹⁶⁶Guerra L. et al. (2007): S.149 [41]

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in V, \quad \forall j \in V, \quad \forall k \in K \quad (10.11)$$

$$y_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I \quad (10.12)$$

$$f_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J \quad (10.13)$$

Erläuterung:

Die Zielfunktion (10.2) minimiert die Gesamtkosten, die sich aus der Summe von Depot-, Routing und Fahrzeugkosten ergeben.

Restriktion (10.3) legt fest, dass jeder Kunde bedient werden muss. Hierbei wird er nur einem einzigen Fahrzeug - und somit einer einzigen Route - zugeordnet. Außerdem hat er genau einen einzigen Knoten (Depot oder Kunde) als Vorgänger auf der ihm zugeteilten Route.

Restriktion (10.4) dient der Einhaltung der Fahrzeugkapazität. Die Summe der Nachfrage der Kunden, die einem Fahrzeug (einer Route) zugeordnet werden, darf dessen Kapazität nicht überschreiten.

Nebenbedingung (10.5) restringiert die Routenbildung. Jedes Fahrzeug, das einen Knoten befährt, muss diesen auch wieder verlassen. Führt im Rahmen einer Route eine Verbindung zu einem Knoten i , so muss im Rahmen derselben Route wieder eine Verbindung aus diesem Knoten heraus existieren.

Nebenbedingung (10.6) regelt, dass jedes Fahrzeug nur einem einzigen Depot zugeordnet werden kann. Außerdem kann es nur eine Route fahren. Fahrzeuge dürfen zudem durchaus unbenutzt bleiben, solange die Befriedigung der Gesamtnachfrage erfüllt wird.

Restriktion (10.7) dient der Verhinderung von Subtouren bzw. Kurzzyklen.

Nebenbedingung (10.8) besagt, dass ein Kunde einem Depot nur dann zugeordnet werden kann, wenn eine (direkte oder indirekte (= über andere Knoten)) Verbindung zwischen diesen aufgrund des Befahrens mit einem Fahrzeug existiert.

Restriktion (10.9) dient einer Einhaltung der Depotkapazität: Wird ein Depot eröffnet, darf die Summe der Nachfrage, der diesem Depot zugeordneten Kunden, dessen Kapazität nicht überschreiten. Wird das Depot nicht eröffnet, dürfen diesem keine Kunden zugeordnet werden.

Restriktion (10.10) garantiert, dass Routen in dem Depot enden, in dem sie starten. Startet ein Fahrzeug seine Route im Depot m , so muss es seine Route auch wieder in m beenden.

Die Nebenbedingungen (10.11) bis (10.13) definieren den Definitionsbereich der Entscheidungsvariablen, welche binär sind.

10.4 Dynamische Modelle mit variablen Standortentscheidungen

10.4.1 Dynamisch-deterministisches LRP mit periodischer Konfiguration der Standorte

In der dynamisch-deterministischen Variante geht man von einer Kenntnis der Nachfragedaten (Determiniertheit) in einem zukünftigen Planungshorizont H mit t Perioden aus. Dieser Fall lässt sich anhand der Flexibilität in der Handhabung des Betriebszustands der (potenziellen) Standorte in zwei Unterpunkte untergliedern. Einen dieser Unterpunkte stellt die periodische Konfiguration der Standorte dar, der andere isolierte Betrachtung jeder einzelnen Periode. Der erste Fall charakterisiert die höchste Flexibilitätsausprägung. Zu Beginn jeder Periode ist es möglich, Standorte zu öffnen und – mit Ausnahme der Ersten – zu schließen. Es findet folglich eine *diskrete Depotkonfiguration während des Gesamtplanungshorizonts* statt. Zum Zeitpunkt der Planung ist der Betriebszustand für sämtliche potentielle Standorte „geschlossen“ (deswegen ist ein Schließen von Standorten in der Ausgangsperiode nicht möglich). Weitere Spezifikationen, die dazugehörige Formulierung der beiden Modelle und ihre Erläuterungen stellt der folgende Abschnitt.

Modellvariante: **ddmdLRPpconfig_M**¹⁶⁷

Prämissen:

- Typus der verwendeten Daten
 - deterministisch
- Planungsperiode
 - dynamisch
- Zielfunktion
 - Minimierung der Gesamtkosten
- Lösungsraum
 - kontinuierliche Standortplanung
- Standortkonfiguration
 - dynamisch-variabel
- Anzahl der Depots
 - mehrere
 - Depotkapazitäten beschränkt

¹⁶⁷In Anlehnung an Prins C. et al. (2007): S.470-483 [69]

- Art und Größe der Fahrzeugflotte
 - homogen (wählbar zwischen endlich und unendlich groß)
 - Fahrzeugkapazitäten beschränkt
- Struktur der Routen
 - zyklisch (jede Route endet in dem Depot, von dem sie startet)
- Nachfragestruktur
 - die Nachfrage jedes Kunden wird durch ein einzelnes Fahrzeug befriedigt
 - jede Nachfrage muss befriedigt werden
 - die Summe sämtlicher auf einer Tour befriedigten Kundennachfragen darf die Kapazität eines einzelnen Fahrzeugs nicht überschreiten
 - Nachfragestruktur bleibt unverändert, d.h. Nachfragen variieren lediglich in ihrer Ausprägungshöhe - Nachfragen in Höhe von Null sind nicht erlaubt
- Zusätzliche Annahmen
 - Zweistufiges Modell
 - Entfernungsmatrix ist symmetrisch
 - diskrete Depotkonfiguration während des Gesamtplanungshorizonts

Entscheidungsvariablen:¹⁶⁸

x_{ijklt} = 1, falls die Verbindung (i, j) mit dem Fahrzeug k in Periode t befahren wird
= 0, sonst

w_{it} = 1, falls Depot i in Periode t eröffnet wird
= 0, sonst

y_{it} = 1, falls Depot i in Periode t betrieben wird
= 0, sonst

z_{it} = 1, falls Depot i in Periode t geschlossen wird
= 0, sonst

f_{ijt} = 1, falls Kunde j Depot i in Periode t zugeordnet wird
= 0, sonst

Parameter:

V Menge aller Knoten, d.h. eine Vereinigung aus der Menge aller Depots I und der Menge sämtlicher Kunden J

I Menge aller Depots

J Menge aller Kunden

¹⁶⁸Notationen der Entscheidungsvariablen und deren Bedeutung sind der Legende aus der Tabelle (10.3) zu entnehmen

- K Menge aller Fahrzeuge (homogene Fahrzeugflotte)
- H Planungshorizont, beinhaltet die Perioden $t = 1, \dots, |H|$
- c_{ij} Fahrkosten zwischen i und j
- O_i Kosten der Eröffnung des Depots $i \in I$
- U_i Fixkosten für den Betrieb des Depots $i \in I$
- C_i Kosten der Schließung des Depots $i \in I$
- y_{i0} Geschlossener Ausgangszustand sämtlicher Depots $i \in I$
- W_i Kapazität des Depots $i \in I$
- d_{jt} Nachfrage des Kunden j in Periode t
- Q Kapazität des Fahrzeugs $k \in K$
- F Fixkosten für die Nutzung des Fahrzeugs $k \in K$

Zielfunktion:

Min:

$$\sum_{i \in I} \sum_{t \in H} O_i w_{it} + \sum_{i \in I} \sum_{t \in H} U_i y_{it} + \sum_{i \in I} \sum_{t \in H} C_i z_{it} + \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} \sum_{t \in H} c_{ij} x_{ijkt} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{t \in H} F x_{ijkt} \quad (10.14)$$

u.d.N.:

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in V} x_{ijkt} = 1, \quad \forall j \in J, \quad \forall t \in H \quad 169 \quad (10.15)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{i \in V} d_{jt} x_{ijkt} \leq Q, \quad \forall k \in K, \quad \forall t \in H \quad (10.16)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ijkt} - \sum_{j \in V} x_{jik t} = 0, \quad \forall k \in K, \quad \forall i \in V, \quad \forall t \in H \quad (10.17)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ijkt} \leq 1, \quad \forall k \in K, \quad \forall t \in H \quad (10.18)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ijkt} \leq |S| - 1, \quad \forall S \subseteq J, \quad \forall k \in K, \quad \forall t \in H \quad (10.19)$$

$$\sum_{u \in J} x_{iukt} + \sum_{u \in V \setminus \{j\}} x_{ujkt} \leq 1 + f_{ijt}, \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J, \quad \forall k \in K, \quad \forall t \in H \quad (10.20)$$

$$\sum_{j \in J} d_{jt} f_{ijt} \leq W_i y_{it}, \quad \forall i \in I, \quad \forall t \in H \quad (10.21)$$

¹⁶⁹In Anlehnung an Prins C. et al. (2007): S.470-483 [69]

$$y_{i(t-1)} - y_{it} - z_{it} \leq 0, \quad \forall i \in I, \quad \forall t \in H \quad 170 \quad (10.22)$$

$$y_{it} - y_{i(t-1)} - w_{it} \leq 0, \quad \forall i \in I, \forall t \in H \quad 171 \quad (10.23)$$

$$x_{ijkt} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in V, \quad \forall j \in V, \quad \forall k \in K, \quad \forall t \in H \quad (10.24)$$

$$w_{it} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I, \quad \forall t \in H \quad (10.25)$$

$$y_{it} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I, \quad \forall t \in H \quad (10.26)$$

$$z_{it} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I, \quad \forall t \in H \quad (10.27)$$

$$f_{ijt} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J, \quad \forall t \in H \quad (10.28)$$

Erläuterung

Zielfunktion (10.14) stellt eine Minimierung der Gesamtkosten dar. Diese bestehen aus den Kosten für die Eröffnung, Betrieb und Schließung eines Depots, den variablen Fahrkosten für den Transport von Gütern von i nach j , sowie den Fixkosten für die Nutzung der Fahrzeuge.

Restriktion (10.15) legt fest, dass jeder Kunde j in einer Periode t genau ein einziges Mal bedient werden kann und muss. Somit ist Kunde j Gegenstand von einer einzigen Route und wird von genau einem Fahrzeug k angefahren. Voraussetzung hierfür ist, dass die Nachfragemenge eines einzelnen Kunden die Fahrzeugkapazität Q nicht überschreitet.

Nebenbedingung (10.16) regelt die Kapazitätseinhaltung jedes Fahrzeugs k . So darf die Nachfragemenge der Kunden, die in einer Periode t Teil der geschlossenen Route eines Fahrzeugs k sind, dessen Kapazität nicht überschreiten.

Restriktion (10.17) garantiert, dass jedes Fahrzeug eine Route fährt, auf der jeder Knoten einen eindeutigen Vorgänger und Nachfolger hat. Zudem dient sie der Flussaufrechterhaltung. Wird in einer Periode t eine Verbindung nach i gefahren, muss in ebendieser Periode eine Verbindung mit demselben Fahrzeug von i wegführen so, dass die Gesamtheit aller gefahrenen Verbindungen eine geschlossene Route ergibt. Nebenbedingung (10.18) stellt sicher, dass jedes Fahrzeug k in einer Periode t aus maximal einem Depot starten darf und in diesem wieder enden muss. Beide Restriktionen definieren somit für das Fahrzeug k eine einzigartige geschlossene Route, lassen aber auch zu, dass nicht jedes Fahrzeug verwendet werden muss.

Restriktion (10.19) dient der Verhinderung von Subtouren. Sie unterdrückt Kurzzyklen, deren Knoten lediglich Kunden darstellen.

¹⁷⁰Eigenleistung

¹⁷¹Eigenleistung

Durch Restriktion (10.20) wird einerseits verhindert, dass ein Fahrzeug k in einer Periode t von einem Depot i losfährt und einen Kunden j im Rahmen seiner Route anfährt, wenn Kunde j ebendiesem Depot in t nicht zugeordnet wird. Andererseits regelt diese Nebenbedingung die Zuordnung von Kunden zu Depots in den einzelnen Perioden. So können Kunden einem Depot in einer Periode erst dann zugeordnet werden, wenn eine Verbindung, die diese mit dem Depot verlinkt, eröffnet wird.

Restriktion (10.21) berücksichtigt die Kapazitätsgrenzen der potentiellen Depots. Bleibt ein Depot i in einer Periode t geschlossen, so kann diesem kein Kunde im Rahmen einer möglichen Route in ebendieser Periode zugeordnet werden. In diesem Fall dürfen keine Routen von dem betrachteten Depot ausgehen. Wird ein Depot i in einer Periode t eröffnet, können lediglich *die* Kunden in einer Periode t von i versorgt werden, deren Nachfragemengen in ebendieser Periode kumuliert die Kapazität von i einhalten.

Nebenbedingung (10.22) stellt in Verbindung mit der Minimierungsfunktion (10.14) eine Konsistenz zwischen dem geöffneten und dem geschlossenen Zustand eines Depots i in zwei aufeinander folgenden Perioden t dar. So kann ein Depot i nur dann einen geschlossenen Zustand in Periode t annehmen, wenn das Depot in der Vorperiode geöffnet war. Die Schließung eines geöffneten Depots wird in der Zielfunktion mit den Schließungskosten C_i gewichtet. Analog ist die Öffnung eines Depots i durch Restriktion (10.23) geregelt. Jede Depotöffnung ist in der Zielfunktion mit dem Faktor O_i bewertet. Für eine detailliertere Erläuterung Funktion der Restriktionen (10.22) und (10.23) sei der Leser auf den folgenden Exkurs verwiesen.

Restriktionen (10.24) bis (10.28) legen den Definitionsbereich der Entscheidungsvariablen fest. Sämtliche Variablen stellen binäre Entscheidungsvariablen dar, sodass das betrachtete Optimierungsproblem ein ganzzahliges Problem darstellt.

Exkurs: Funktionsweise der Restriktionen (10.22) und (10.23):

Grundidee der Modellierung bzw. Integration einer Öffnung und Schließung von Depots ist, für jede dieser Aktivitäten eine Binärvariable einzuführen und diese mit dem (gegenwärtigen) Betriebszustand des betrachteten Depots in Relation zu setzen, um eine Konsistenz zu gewährleisten. Konsistenz meint, beispielsweise, das Ausschließen einer Depotöffnung für einen Standort, der bereits geöffnet ist (oder analog die Schließung eines Standorts in einer Periode, in der sich dieser bereits in einem geschlossenen Zustand befindet). Hierzu muss in einem ersten Schritt für jede Aktivität separat untersucht werden, welche Ausprägungskonstellationen für die Entscheidungsvariable y_{it} in zwei aufeinander folgenden Perioden denkbar sind (zur Erinnerung: y_{it} legt fest, ob ein Standort i in einer Periode t betrieben wird oder nicht). In einem zweiten Schritt ist zu überlegen, welche dieser Konstellationen eine Öffnung oder Schließung kennzeichnet und wie diese Konstellation durch eine lineare

Ungleichung eindeutig von den anderen Konstellationen isoliert werden kann. Beide Schritte seien im Folgenden am Beispiel der Depotschließung erläutert.

Konstellation	$y_{i,t-1}$	$y_{i,t}$
1	0	0
2	1	0
3	1	1
4	0	1

Tabelle 10.1: Ausprägungskonstellationen der binären Betriebszustandsvariablen am Beispiel der Depotschließung (Eigene Darstellung)

Tabelle (10.1) illustriert alle denkbaren Kombinationen, die der Betriebszustand eines Depots i in zwei aufeinander folgenden Perioden $t - 1$ und t annehmen kann. Eine 1 markiert einen Betrieb des Depots i in der betrachteten Periode, eine 0 einen geschlossenen Zustand.

Für die Modellierung einer Schließung entfallen die Ausprägungskonstellationen 1 und 3, da sie symbolisieren, dass ein Depot, das in $t - 1$ geschlossen (geöffnet) war, in Periode t ebenfalls geschlossen (geöffnet) bleibt, d.h. keine Schließung vorgenommen wird. Konstellation 4 kennzeichnet ebenfalls keine Schließung, da ein in Periode $t - 1$ geschlossenes Depot in der unmittelbar darauffolgenden Periode t geöffnet wird. Folglich handelt es sich um einen Öffnungsvorgang. Lediglich Kombination 2 (**grün** markiert) bildet die Aktivität einer Schließung ab, da sie dem Übergang des Depotzustands von *geöffnet* in $t - 1$ zu *geschlossen* in t gleicht. z_{it} – Binärvariable zur Kennzeichnung einer Depotschließung – muss entsprechend in t den Wert 1 annehmen. Die lineare Ungleichung $y_{(i,t-1)} - y_{it} \leq z_{it}$ lässt z_{it} genau bei nur dieser zweiten Konstellation 1 werden. Kombination 4 wird durch die Ungleichung ausgeschlossen, weil z_{it} keine negativen Werte annehmen kann. Für die Konstellationen 1 und 3 nimmt z_{it} lediglich den *Null*-Wert an, da dieser größer-gleich der Differenz von *Null* ist und eine Realisation von *Eins* zu einer Vergrößerung/Verschlechterung des Zielfunktionsterms aufgrund des positiven Koeffizienten C_i führen würde.

Restriktion (10.23) lässt sich für die Modellierung des Falls der Depoteröffnung analog konstruieren.

Modellvariante: `ddmdLRPconfig_P`¹⁷²

Prämissen:

- Typus der verwendeten Daten
 - deterministisch

¹⁷²In Anlehnung an Prins C. et al. (2007): S.470-483 [69]

- Planungsperiode
 - dynamisch (jedoch für jede separate Periode statisch)
- Zielfunktion
 - Minimierung der Gesamtkosten
- Lösungsraum
 - kontinuierliche Standortplanung
- Standortkonfiguration
 - dynamisch-variabel
- Anzahl der Depots
 - mehrere
 - Depotkapazitäten beschränkt
- Art und Größe der Fahrzeugflotte
 - homogen (wählbar zwischen endlich und unendlich groß)
 - Fahrzeugkapazitäten beschränkt
- Struktur der Routen
 - zyklisch (jede Route endet in dem Depot, von dem sie startet)
- Nachfragestruktur
 - die Nachfrage jedes Kunden wird durch ein einzelnes Fahrzeug befriedigt
 - jede Nachfrage muss befriedigt werden
 - die Summe sämtlicher auf einer Tour befriedigten Kundennachfragen darf die Kapazität eines einzelnen Fahrzeugs nicht überschreiten
 - Nachfragestruktur bleibt unverändert, d.h. Nachfragen variieren lediglich in ihrer Ausprägungshöhe - Nachfragen in Höhe von Null sind nicht erlaubt
- Zusätzliche Annahmen
 - Zweistufiges Modell
 - Entfernungsmatrix ist symmetrisch
 - diskrete Depotkonfiguration während des Gesamtplanungshorizonts

Entscheidungsvariablen:

x_{ijk} = 1, falls die Verbindung (i, j) mit dem Fahrzeug k befahren wird

= 0, sonst

w_i = 1, falls Depot i eröffnet wird

= 0, sonst

y_i = 1, falls Depot i betrieben wird

= 0, sonst

z_i = 1, falls Depot i geschlossen wird

$= 0$, sonst
 $f_{ijt} = 1$, falls Kunde j Depot i zugeordnet wird
 $= 0$, sonst

Parameter:

- V Menge aller Knoten, d.h. eine Vereinigung aus der Menge aller Depots I und der Menge sämtlicher Kunden J
- I Menge aller Depots
- J Menge aller Kunden
- K Menge aller Fahrzeuge (homogene Fahrzeugflotte)
- c_{ij} Fahrkosten zwischen i und j
- O_i Kosten der Eröffnung des Depots $i \in I$
- U_i Fixkosten für den Betrieb des Depots $i \in I$
- C_i Kosten der Schließung des Depots $i \in I$
- y_{i0} Ausgangszustand sämtlicher Depots $i \in I$
- W_i Kapazität des Depots $i \in I$
- d_j Nachfrage des Kunden j
- Q Kapazität des Fahrzeugs $k \in K$
- F Fixkosten für die Nutzung des Fahrzeugs $k \in K$

Zielfunktion:

Min:

$$\sum_{i \in I} O_i w_i + \sum_{i \in I} U_i y_i + \sum_{i \in I} C_i z_i + \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} c_{ij} x_{ijk} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} F x_{ijk} \quad (10.29)$$

u.d.N.:

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in V} x_{ijk} = 1, \quad \forall j \in J \quad (10.30)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{i \in V} d_{jt} x_{ijk} \leq Q, \quad \forall k \in K \quad (10.31)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ijk} - \sum_{j \in V} x_{jik} = 0, \quad \forall k \in K, \quad \forall i \in V \quad (10.32)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ijk} \leq 1, \quad \forall k \in K \quad (10.33)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ijk} \leq |S| - 1, \quad \forall S \subseteq J, \quad \forall k \in K \quad (10.34)$$

$$\sum_{u \in J} x_{iuk} + \sum_{u \in V \setminus \{j\}} x_{ujk} \leq 1 + f_{ij}, \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J, \quad \forall k \in K \quad (10.35)$$

$$\sum_{j \in J} d_j f_{ij} \leq W_i y_i, \quad \forall i \in I \quad (10.36)$$

$$y_{i0} - y_i - z_i \leq 0, \quad \forall i \in I \quad ^{173} \quad (10.37)$$

$$y_i - y_{i0} - w_i \leq 0, \quad \forall i \in I \quad ^{174} \quad (10.38)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in V, \quad \forall j \in V, \quad \forall k \in K \quad (10.39)$$

$$w_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I \quad (10.40)$$

$$y_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I \quad (10.41)$$

$$z_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I \quad (10.42)$$

$$f_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J \quad (10.43)$$

Erläuterung

Die Zielfunktion (10.29) minimiert die Gesamtkosten, die sich aus der Summe von Depot-eröffnungs-, Depotbetriebs- und Depotschließungskosten, sowie den Routing- und Fahrzeugkosten ergeben.

Restriktion (10.30) legt fest, dass jeder Kunde bedient werden muss. Hierbei wird er nur einem einzigen Fahrzeug - und somit einer einzigen Route - zugeordnet. Außerdem hat er genau einen einzigen Knoten (Depot oder Kunde) als Vorgänger auf der ihm zugeteilten Route.

Restriktion (10.31) dient der Einhaltung der Fahrzeugkapazität. Die Summe der Nachfrage der Kunden, die einem Fahrzeug (einer Route) zugeordnet werden, darf dessen Kapazität nicht überschreiten.

Nebenbedingung (10.32) restringiert die Routenbildung. Jedes Fahrzeug, das einen Knoten befährt, muss diesen auch wieder verlassen. Führt im Rahmen einer Route eine Verbindung zu einem Knoten i , so muss im Rahmen derselben Route wieder eine Verbindung aus diesem Knoten heraus existieren.

Nebenbedingung (10.33) regelt, dass jedes Fahrzeug nur einem einzigen Depot zugeordnet werden kann. Außerdem kann es nur eine Route fahren. Fahrzeuge dürfen zudem

¹⁷³Eigenleistung

¹⁷⁴Eigenleistung

durchaus unbenutzt bleiben, solange die Befriedigung der Gesamtnachfrage erfüllt wird.

Restriktion (10.34) dient der Verhinderung von Subtouren bzw. Kurzzyklen.

Nebenbedingung (10.35) besagt, dass ein Kunde einem Depot nur dann zugeordnet werden kann, wenn eine (direkte oder indirekte (= über andere Knoten)) Verbindung zwischen diesen aufgrund des Befahrens mit einem Fahrzeug existiert.

Restriktion (10.36) dient einer Einhaltung der Depotkapazität: Wird ein Depot eröffnet, darf die Summe der Nachfrage der diesem Depot zugeordneten Kunden dessen Kapazität nicht überschreiten. Wird das Depot nicht eröffnet, dürfen diesem keine Kunden zugeordnet werden.

Nebenbedingung (10.37) stellt in Verbindung mit der Minimierungsfunktion (10.29) eine Konsistenz zwischen dem geöffneten und dem geschlossenen Zustand eines Depots i in zwei aufeinander folgenden Perioden dar. So kann ein Depot i nur dann einen geschlossenen Zustand in Periode t annehmen, wenn das Depot in der Periode unmittelbar vor der Planzeitpunkt geöffnet war. Die Schließung eines geöffneten Depots wird in der Zielfunktion mit den Schließungskosten C_i gewichtet.

Analog ist die Öffnung eines Depots i durch Restriktion (10.38) geregelt. Jede Depotöffnung ist in der Zielfunktion mit dem Faktor O_i bewertet.

Die Nebenbedingungen (10.39) bis (10.43) definieren den Definitionsbereich der Entscheidungsvariablen, welche binär sind. x_{ijk} deklariert, ob die Verbindung (i, j) vom Fahrzeug k bedient wird. w_i nimmt den Wert 1 an, falls Depot i geöffnet wird, andernfalls Null. y_i nimmt den Wert 1 an, falls Depot i eröffnet wird, andernfalls Null. z_i nimmt den Wert 1 an, falls Depot i geschlossen wird, andernfalls Null. Die Binärvariable $f_{i,j}$ kennzeichnet die Zuordnung vom Kunden j zum Depot i .

10.4.2 Dynamisch-deterministisches LRP mit einmaliger Konfiguration der Standorte

Wie bereits oben erwähnt, lässt sich die dynamisch-deterministische Variante hinsichtlich der Flexibilität in der Handhabung des Betriebszustands der (potentiellen) Standorte in zwei Unterpunkte untergliedern. Nachdem die Modellvariante mit periodischer Konfiguration der potentiellen Standorte bereits erläutert wurde, erfolgt in diesem Abschnitt die Beschreibung der Variante bei einmaliger Konfiguration. Diese charakterisiert ebenfalls eine Kenntnis der Nachfragemengen für jede Periode t eines gesamten Planungshorizonts H , jedoch muss der Betriebszustand der potentiellen Depots für den gesamten Planungszeitraum bereits in der ersten Periode festgelegt werden. Die Bestimmung, welche Depots geöffnet werden und welche geschlossen bleiben, erfolgt *einmalig* und ist *fixiert*. Auch in dieser Modellvariante ist der Betriebszustand zum Planungszeitpunkt für sämtliche potentielle Standorte

als „geschlossen“ markiert. Weitere Spezifikationen, die dazugehörige Formulierung des Modells und ihre Erläuterungen stellt der folgende Abschnitt dar.

Modellvariante: ddmdLRPconfig¹⁷⁵

Prämissen:

- Typus der verwendeten Daten
 - deterministisch
- Planungsperiode
 - dynamisch
- Zielfunktion
 - Minimierung der Gesamtkosten
- Lösungsraum
 - kontinuierliche Standortplanung
- Standortkonfiguration
 - statisch - fix
- Anzahl der Depots
 - mehrere
 - Depotkapazitäten beschränkt
- Art und Größe der Fahrzeugflotte
 - homogen (wählbar zwischen endlich und unendlich groß)
 - Fahrzeugkapazitäten beschränkt
- Struktur der Routen
 - zyklisch (jede Route endet in dem Depot, von dem sie startet)
- Nachfragestruktur
 - die Nachfrage jedes Kunden wird durch ein einzelnes Fahrzeug befriedigt
 - jede Nachfrage muss befriedigt werden
 - die Summe sämtlicher auf einer Tour befriedigten Kundennachfragen darf die Kapazität eines einzelnen Fahrzeugs nicht überschreiten
 - Nachfragestruktur bleibt unverändert, d.h. Nachfragen variieren lediglich in ihrer Ausprägungshöhe - Nachfragen in Höhe von Null sind nicht erlaubt
- Zusätzliche Annahmen
 - Zweistufiges Modell
 - Entfernungsmatrix ist symmetrisch
 - einmalige Depotkonfiguration zu Beginn des Gesamtplanungshorizonts

¹⁷⁵In Anlehnung an Prins C. et al. (2007): S.470-483 [69]

Entscheidungsvariablen:

- x_{ijkt} = 1, falls die Verbindung (i, j) mit dem Fahrzeug k in Periode t befahren wird
= 0, sonst
- w_i = 1, falls Depot i zu Beginn des Planungshorizonts H eröffnet wird
= 0, sonst
- y_i = 1, falls Depot i während des Planungshorizonts H betrieben wird
= 0, sonst
- f_{ijt} = 1, falls Kunde j Depot i in Periode t zugeordnet wird
= 0, sonst

Parameter:

- V Menge aller Knoten, d.h. eine Vereinigung aus der Menge aller Depots I und der Menge sämtlicher Kunden J
- I Menge aller Depots
- J Menge aller Kunden
- K Menge aller Fahrzeuge (homogene Fahrzeugflotte)
- H Planungshorizont, beinhaltet die Perioden $t = 1, \dots, |H|$
- c_{ij} Fahrkosten zwischen i und j
- O_i Kosten der Eröffnung des Depots $i \in I$
- U_i Fixkosten für den Betrieb des Depots $i \in I$
- y_{i0} Geschlossener Ausgangszustand sämtlicher Depots $i \in I$
- W_i Kapazität des Depots $i \in I$
- d_{jt} Nachfrage des Kunden j in Periode t
- Q Kapazität des Fahrzeugs $k \in K$
- F Fixkosten für die Nutzung des Fahrzeugs $k \in K$

Zielfunktion:

$$\text{Min} \quad \sum_{i \in I} O_i w_i + \sum_{i \in I} |H| U_i y_i + \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} \sum_{t \in H} c_{ij} x_{ijkt} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{t \in H} F x_{ijkt} \quad (10.44)$$

u.d.N.:

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in V} x_{ijkt} = 1, \quad \forall j \in J, \quad \forall t \in H \quad 176 \quad (10.45)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{i \in V} d_{jt} x_{ijkt} \leq Q, \quad \forall k \in K, \quad \forall t \in H \quad (10.46)$$

¹⁷⁶In Anlehnung an Prins C. et al. (2007): S.470-483 [69]

$$\sum_{j \in V} x_{ijkt} - \sum_{j \in V} x_{jikt} = 0, \quad \forall k \in K, \quad \forall i \in V, \quad \forall t \in H \quad (10.47)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ijkt} \leq 1, \quad \forall k \in K, \quad \forall t \in H \quad (10.48)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ijkt} \leq |S| - 1, \quad \forall S \subseteq J, \quad \forall k \in K, \quad \forall t \in H \quad (10.49)$$

$$\sum_{u \in J} x_{iukt} + \sum_{u \in V \setminus \{j\}} x_{ujkt} \leq 1 + f_{ijt}, \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J, \quad \forall k \in K, \quad \forall t \in H \quad (10.50)$$

$$\sum_{j \in J} d_{jt} f_{ijt} \leq W_i y_i, \quad \forall i \in I, \quad \forall t \in H \quad (10.51)$$

$$y_i - y_{i0} - w_i \leq 0, \quad \forall i \in I \quad ^{177} \quad (10.52)$$

$$x_{ijkt} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in V, \quad \forall j \in V, \quad \forall k \in K, \quad \forall t \in H \quad (10.53)$$

$$w_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I \quad (10.54)$$

$$y_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I \quad (10.55)$$

$$f_{ijt} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J, \quad \forall t \in H \quad (10.56)$$

Erläuterung

Zielfunktion (10.44) stellt eine Minimierung der Gesamtkosten dar. Diese bestehen aus den Kosten für die Eröffnung und Betrieb eines Depots, den variablen Fahrtkosten für den Transport von Gütern von i nach j , sowie den Fixkosten für die Nutzung der Fahrzeuge.

Restriktion (10.45) legt fest, dass jeder Kunde j in einer Periode t genau ein einziges Mal bedient werden kann und muss. Somit ist Kunde j Gegenstand von einer einzigen Route und wird von genau einem Fahrzeug k angefahren. Voraussetzung hierfür ist, dass die Nachfragemenge eines einzelnen Kunden die Fahrzeugkapazität Q nicht überschreitet.

Nebenbedingung (10.46) regelt die Kapazitätseinhaltung jedes Fahrzeugs k . So darf die Nachfragemenge der Kunden, die in einer Periode t Teil der geschlossenen Route eines Fahrzeugs k sind, dessen Kapazität nicht überschreiten.

Restriktion (10.47) garantiert, dass jedes Fahrzeug eine Route fährt, auf der jeder Knoten einen eindeutigen Vorgänger und Nachfolger hat. Zudem dient sie der Flussaufrechterhaltung. Wird in einer Periode t eine Verbindung nach i gefahren, muss in ebendieser Periode eine Verbindung mit demselben Fahrzeug von i wegführen so, dass die Gesamtheit aller gefahrenen Verbindungen eine geschlossene Route ergibt. Nebenbedingung (10.48) stellt sicher, dass jedes Fahrzeug k in einer Periode t aus maximal einem Depot starten darf und in diesem wieder enden muss. Beide Restriktionen definieren somit für das Fahrzeug

¹⁷⁷Eigenleistung

k eine einzigartige geschlossene Route, lassen aber auch zu, dass nicht jedes Fahrzeug verwendet werden muss.

Restriktion (10.49) dient der Verhinderung von Subtouren. Sie unterdrückt Kurzzyklen, deren Knoten lediglich Kunden darstellen.

Durch Restriktion (10.50) wird einerseits verhindert, dass ein Fahrzeug k in einer Periode t von einem Depot i losfährt und einen Kunden j im Rahmen seiner Route anfährt, wenn Kunde j ebendiesem Depot in t nicht zugeordnet wird. Andererseits regelt diese Nebenbedingung die Zuordnung von Kunden zu Depots in den einzelnen Perioden. So können Kunden einem Depot in einer Periode erst dann zugeordnet werden, wenn eine Verbindung, die diese mit dem Depot verlinkt, eröffnet wird.

Restriktion (10.51) berücksichtigt die Kapazitätsgrenzen der potentiellen Depots. Bleibt ein Depot i in einem gesamten Planungshorizont H geschlossen, so kann diesem kein Kunde im Rahmen einer möglichen Route in ebendiesem Planungshorizont zugeordnet werden. In diesem Fall dürfen keine Routen von dem betrachteten Depot ausgehen. Wird ein Depot i für einen Planungshorizont H eröffnet, können lediglich die Kunden in einer Periode t von i versorgt werden, deren kumulierte Nachfragemengen in ebendieser Periode die Kapazität von i einhalten.

Nebenbedingung (10.52) stellt in Verbindung mit der Minimierungsfunktion (10.44) eine Konsistenz zwischen dem Ausgangszustand zu Beginn des Planungshorizonts H und dem geöffneten Zustand eines Depots i dar. Jede Depotöffnung ist in der Zielfunktion mit dem Faktor O_i bewertet.

Restriktionen (10.53) bis (10.56) legen den Definitionsbereich der Entscheidungsvariablen fest. Sämtliche Variablen stellen binäre Entscheidungsvariablen dar, sodass das betrachtete Optimierungsproblem ein ganzzahliges Problem darstellt.

10.4.3 Dynamisch-stochastisches LRP mit periodischer Konfiguration der Standorte

Die dritte Modellvariante findet ebenfalls im mehrperiodischen Fall Anwendung. Im Gegensatz zu ihrem deterministischen Pendant berücksichtigt sie jedoch eine fehlende Kenntnis über zukünftige Nachfragemengen. Die tatsächliche Nachfragehöhe einer Periode t ist erst zu Beginn derselben bekannt. Entsprechend erfolgt eine Konfiguration zu Beginn jeder Periode. Modelltechnisch wird dieser Sachverhalt durch die Implementierung einer Schleife geregelt. Diese Zählschleife generiert in jeder Iteration eine Nachfragemenge, die Realisation einer Normalverteilung ist und um einen festgelegten Mittelwert schwankt. Zusätzlich lassen sich ein Wachstums- oder Schrumpfungstrend, sowie eine Stagnation in der zukünftigen Entwicklung der Bedarfe abbilden. Sowohl eine lineare als auch eine exponentielle

Veränderungstendenz lassen sich darstellen. Weitere Spezifikationen, die dazugehörige Formulierung des Modells, der Zählschleife und ihre Erläuterungen stellt der folgende Abschnitt dar.

Modellvariante: dsmdLRPconfig¹⁷⁸

Prämissen:

- Typus der verwendeten Daten
 - stochastisch
- Planungsperiode
 - dynamisch (jedoch für jede separate Periode statisch)
- Zielfunktion
 - Minimierung der Gesamtkosten
- Lösungsraum
 - kontinuierliche Standortplanung
- Standortkonfiguration
 - dynamisch - variabel
- Anzahl der Depots
 - mehrere
 - Depotkapazitäten beschränkt
- Art und Größe der Fahrzeugflotte
 - homogen (wählbar zwischen endlich und unendlich groß)
 - Fahrzeugkapazitäten beschränkt
- Struktur der Routen
 - zyklisch (jede Route endet in dem Depot, von dem sie startet)
- Nachfragestruktur
 - die Nachfrage jedes Kunden wird durch ein einzelnes Fahrzeug befriedigt
 - jede Nachfrage muss befriedigt werden
 - die Summe sämtlicher auf einer Tour befriedigten Kundennachfragen darf die Kapazität eines einzelnen Fahrzeugs nicht überschreiten
 - Nachfragestruktur bleibt unverändert, d.h. Nachfragen variieren lediglich in ihrer Ausprägungshöhe - Nachfragen in Höhe von Null sind nicht erlaubt
- Zusätzliche Annahmen
 - Zweistufiges Modell
 - Entfernungsmatrix ist symmetrisch
 - Depotkonfiguration erfolgt in jeder Periode für die betrachtete Periode

¹⁷⁸In Anlehnung an Prins C. et al. (2007): S.470-483 [69]

Entscheidungsvariablen:

x_{ijk} = 1, falls die Verbindung (i, j) mit dem Fahrzeug k befahren wird

= 0, sonst

w_i = 1, falls Depot i eröffnet wird

= 0, sonst

y_i = 1, falls Depot i betrieben wird

= 0, sonst

z_i = 1, falls Depot i geschlossen wird

= 0, sonst

f_{ij} = 1, falls Kunde j Depot i zugeordnet wird

= 0, sonst

Parameter:

V Menge aller Knoten, d.h. eine Vereinigung aus der Menge aller Depots I und der Menge sämtlicher Kunden J

I Menge aller Depots

J Menge aller Kunden

K Menge aller Fahrzeuge (homogene Fahrzeugflotte)

c_{ij} Fahrkosten zwischen i und j

O_i Kosten der Eröffnung des Depots $i \in I$

U_i Fixkosten für den Betrieb des Depots $i \in I$

C_i Kosten der Schließung des Depots $i \in I$

y_{i0} Ausgangszustand sämtlicher Depots $i \in I$

W_i Kapazität des Depots $i \in I$

d_j Nachfrage des Kunden j

Q Kapazität des Fahrzeugs $k \in K$

F Fixkosten für die Nutzung des Fahrzeugs $k \in K$

Zielfunktion:

$$\text{Min} \quad \sum_{i \in I} O_i w_i + \sum_{i \in I} U_i y_i + \sum_{i \in I} C_i z_i + \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} c_{ij} x_{ijk} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} F x_{ijk} \quad (10.57)$$

u.d.N.:

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in V} x_{ijk} = 1, \quad \forall j \in J \quad (10.58)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{i \in V} d_j x_{ijk} \leq Q, \quad \forall k \in K \quad (10.59)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ijk} - \sum_{j \in V} x_{jik} = 0, \quad \forall k \in K, \quad \forall i \in V \quad (10.60)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ijk} \leq 1, \quad \forall k \in K \quad (10.61)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ijk} \leq |S| - 1, \quad \forall S \subseteq J, \quad \forall k \in K \quad (10.62)$$

$$\sum_{u \in J} x_{iuk} + \sum_{u \in V \setminus \{j\}} x_{ujk} \leq 1 + f_{ij}, \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J, \quad \forall k \in K \quad (10.63)$$

$$\sum_{j \in J} d_j f_{ij} \leq W_i y_i, \quad \forall i \in I \quad (10.64)$$

$$y_{i0} - y_i - z_i \leq 0, \quad \forall i \in I \quad 179 \quad (10.65)$$

$$y_i - y_{i0} - w_i \leq 0, \quad \forall i \in I \quad 180 \quad (10.66)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in V, \quad \forall j \in V, \quad \forall k \in K \quad (10.67)$$

$$w_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I \quad (10.68)$$

$$y_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I \quad (10.69)$$

$$z_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I \quad (10.70)$$

$$f_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J \quad (10.71)$$

Erläuterung

Die Zielfunktion (10.57) minimiert die Gesamtkosten einer Periode t , die sich aus der Summe von Depotöffnungs-, Depotbetriebs- und Depotschließungskosten, sowie den Routing- und Fahrzeugkosten ergeben.

Restriktion (10.58) legt fest, dass jeder Kunde bedient werden muss. Hierbei wird er nur einem einzigen Fahrzeug - und somit einer einzigen Route - zugeordnet. Außerdem hat er genau einen einzigen Knoten (Depot oder Kunde) als Vorgänger auf der ihm zugeteilten Route.

¹⁷⁹Eigenleistung

¹⁸⁰Eigenleistung

Restriktion (10.59) dient der Einhaltung der Fahrzeugkapazität. Die Summe der Nachfrage der Kunden, die einem Fahrzeug (einer Route) zugeordnet werden, darf dessen Kapazität nicht überschreiten.

Nebenbedingung (10.60) restringiert die Routenbildung. Jedes Fahrzeug, das einen Knoten befährt, muss diesen auch wieder verlassen. Führt im Rahmen einer Route eine Verbindung zu einem Knoten i , so muss im Rahmen derselben Route wieder eine Verbindung aus diesem Knoten heraus existieren.

Nebenbedingung (10.61) regelt, dass jedes Fahrzeug nur einem einzigen Depot zugeordnet werden kann. Außerdem kann es nur eine Route fahren. Fahrzeuge dürfen zudem durchaus unbenutzt bleiben, solange die Befriedigung der Gesamtnachfrage erfüllt wird.

Restriktion (10.62) dient der Verhinderung von Subtouren bzw. Kurzzyklen.

Nebenbedingung (10.63) besagt, dass ein Kunde einem Depot nur dann zugeordnet werden kann, wenn eine (direkte oder indirekte (= über andere Knoten)) Verbindung zwischen diesen aufgrund des Befahrens mit einem Fahrzeug existiert.

Restriktion (10.64) dient einer Einhaltung der Depotkapazität: Wird ein Depot eröffnet, darf die Summe der Nachfrage der diesem Depot zugeordneten Kunden dessen Kapazität nicht überschreiten. Wird das Depot nicht eröffnet, dürfen diesem keine Kunden zugeordnet werden.

Nebenbedingung (10.65) stellt in Verbindung mit der Minimierungsfunktion (10.57) eine Konsistenz zwischen dem geöffneten und dem geschlossenen Zustand eines Depots i in zwei aufeinander folgenden Perioden dar. So kann ein Depot i nur dann einen geschlossenen Zustand in Periode t annehmen, wenn das Depot in der Periode unmittelbar vor der Planzeitpunkt geöffnet war. Die Schließung eines geöffneten Depots wird in der Zielfunktion mit den Schließungskosten C_i gewichtet. Analog ist die Öffnung eines Depots i durch Restriktion (10.66) geregelt. Jede Depotöffnung ist in der Zielfunktion mit dem Faktor O_i bewertet. Die Nebenbedingungen (10.67) bis (10.71) definieren den Definitionsbereich der Entscheidungsvariablen, welche binär sind.

Zählschleife

μ	Mittelwert der Nachfrage (Parameter)
σ	Standardabweichung der Nachfrage (Parameter)
t	Periode t des Planungshorizonts H ($t \in H$) (Parameter)
$Normal(\mu, \sigma)$	Normalverteilung mit dem Mittelwert μ und der Standardabweichung σ -
$cost_t$	Gesamtkosten einer Periode t (entspricht den Gesamtkosten des statischen LRPs)
$cost_H$	Gesamtkosten, die im Planungshorizont H anfallen

begin

$$\text{let } y_{i0} := 0, \quad \forall i \in I \quad (10.72)$$

$$\text{for } t = 1, \dots, |H|, \quad \forall t \in H \quad (10.73)$$

{

$$\text{let } d_j := \lceil \min(\max(\text{Normal}(\mu, \sigma), 1), Q) \rceil, \quad \forall j \in J \quad (10.74)$$

$$\text{solve } LRP \quad (10.75)$$

$$\text{let } y_{i0} := y_i, \quad \forall i \in I \quad (10.76)$$

$$\text{let } cost_t := ZF \quad (10.77)$$

$$\dots * \quad (10.78)$$

}

$$cost_H := \sum_{t \in H} cost_t \quad (10.79)$$

end

 *Zur Simulation eines Trends kann der Mittelwert in jeder Iteration modifiziert werden. Nachfolgend sind Formulierungen dargestellt, die eine lineare oder exponentielle Veränderung des Mittelwerts der Nachfrage darstellen und an dieser Stelle einzufügen sind

Linear:

$$\text{let } \mu := \max(\lceil \delta + \mu \rceil, 0) \quad (10.78 [1])$$

Exponentiell:

$$\text{let } \mu := \min(\lceil \delta * \mu \rceil, Q) \quad (10.78 [2])$$

δ Veränderungsfaktor bzw. Veränderungssummand (Parameter)

Erläuterung – Zählschleife

In der Initialisierung der Zählschleife (10.72) sind sämtliche Depots geschlossen. Die Anzahl der Iterationen der Zählschleife entspricht der Anzahl der Perioden, die im betrachteten Planungszeitraum H enthalten sind. Jede Iteration (10.73) entspricht der Lösung eines statischen Location – Routing Problems (Modell siehe oben). Erstes Element der Schleife ist

die Generation einer Nachfragemenge für jeden Kunden $j \in J$. Es wird angenommen, dass die Nachfrage normalverteilt ist mit einem Mittelwert μ und einer Standardabweichung σ . Formulierung (10.74) gewährleistet, dass bei der Generierung der Nachfragemenge d_j pro Kunden j sowohl keine Negativ- und/oder Nullnachfrage, als auch keine Nachfrage generiert wird, die die Kapazität der Fahrzeuge Q überschreitet. Diese Beschränkung ist eine notwendige Voraussetzung für die Generierung einer zulässigen Instanz und die Ermittlung einer zulässigen Lösung.

Ist eine Nachfrageinstanz generiert, wird das statische LRP gelöst (10.75). Anschließend wird in (10.76) der Gebrauchszustand jedes Depots $i \in I$ aktualisiert, um eine Konsistenz zur Folgeperiode zu gewährleisten. In (10.77) werden die Gesamtkosten der betrachteten Periode t durch Gleichsetzen mit dem Zielfunktionswert des statischen Location – Routing Problems gespeichert. Ihre Summierung über sämtliche Perioden des betrachteten Planungshorizonts H in (10.79) erlaubt schließlich ein Eruiieren der kumulierten Gesamtkosten für das Gesamtproblem im dynamisch – stochastischen Fall des LRP.

Modell	Hauptmerkmale
sdmdLRPsconfig	<ul style="list-style-type: none"> • Nur eine Periode • Deterministische Nachfragen
ddmdLRPsconfig	<ul style="list-style-type: none"> • Mehrere Perioden • Einmalige Depotzusammenstellung • Alle Perioden werden integriert gelöst • Deterministische Nachfragen
ddmdLRPpconfig _ M	<ul style="list-style-type: none"> • Mehrere Perioden • Dynamische Depotzusammenstellung • Alle Perioden werden integriert gelöst • Benchmark - Lösung • Deterministische Nachfragen
ddmdLRPpconfig _ P	<ul style="list-style-type: none"> • Mehrere Perioden • Perioden werden isoliert gelöst • Dynamische Depotzusammenstellung • Deterministische Nachfragen
dsmdLRPpconfig	<ul style="list-style-type: none"> • Mehrere Perioden • Perioden werden isoliert gelöst • Dynamische Depotzusammenstellung • Stochastische Nachfragen

Tabelle 10.2: Zusammenfassung der LRP-Modelle (Eigene Darstellung)

Formulierung (10.78) erlaubt die Simulation eines Trends in der Generierung der Nachfragen im Verlauf des Planungshorizonts. Unterschieden wird zwischen einer linear steigenden / sinkenden (10.78 [1]) und einer exponentiell steigenden / sinkenden (10.78 [2]) Veränderung der Nachfragemengen. Der Grad der Veränderung kann durch Wahl der Ausprägung des Parameters δ entsprechend dargestellt werden. Im Falle eines linearen Trends

entspricht $\delta < 0$ einer sinkenden, $\delta = 0$ einer stagnierenden und $\delta > 0$ einer steigenden Nachfrage. Analog stellen $\delta < 1$ einen schrumpfenden, $\delta = 1$ einen gleichbleibenden und $\delta > 1$ einen wachsenden exponentiellen Trend dar.

Eine Zusammenfassung der aufgestellten Modellvariante stellt Tabelle (10.2) dar.

Tabelle 10.3: Legende zu LRP

Mathematische Notation	Erklärung	Bedeutung
Entscheidungsvariablen		
x_{ijk}	<i>Fahrzeugfluss</i>	= 1, falls die Verbindung (i, j) mit dem Fahrzeug k befahren wird = 0, sonst
x_{ijkt}	<i>Fahrzeugfluss</i>	= 1, falls die Verbindung (i, j) mit dem Fahrzeug k in Periode t befahren wird = 0, sonst
y_i	<i>Einrichtung</i>	= 1, falls Depot i errichtet und betrieben wird = 0, sonst
w_i	<i>Oeffnung</i>	= 1, falls Depot i zu Beginn des Planungshorizonts H eröffnet wird = 0, sonst
y_i	<i>Nutzung</i>	= 1, falls Depot i während des Planungshorizonts H betrieben wird = 0, sonst
z_i	<i>Schliessung</i>	= 1, falls Depot i zu Beginn des Planungshorizonts H geschlossen wird = 0, sonst
w_{it}	<i>Oeffnung</i>	= 1, falls Depot i in Periode t eröffnet wird = 0, sonst
y_{it}	<i>Nutzung</i>	= 1, falls Depot i in Periode t betrieben wird = 0, sonst
z_{it}	<i>Schliessung</i>	= 1, falls Depot i in Periode t geschlossen wird = 0, sonst
f_{ij}	<i>Kundenzuordnung</i>	= 1, falls Kunde j Depot i zugeordnet wird = 0, sonst
f_{ijt}	<i>Kundenzuordnung</i>	= 1, falls Kunde j Depot i in Periode t zugeordnet wird = 0, sonst
a_{ij}	<i>Transportmenge</i>	Transportmenge von i nach j
Parameter		
V	<i>Knoten</i>	Menge aller Knoten, d.h. eine Vereinigung aus der Menge aller Depots I und der Menge sämtlicher Kunden J
I	<i>Depots</i>	Menge aller potenziellen Depots
J	<i>Kunden</i>	Menge aller Kunden
$\{0\}$	<i>(Bildet den Indexwert 0)</i>	Depot (beim Vehicle-Routing Problem)
H	<i>Horizont</i>	Planungshorizont, beinhaltet die Perioden $t = 1, \dots, H $
K	<i>Fahrzeugflotte</i>	Menge aller Fahrzeuge (homogen)
c_{ij}	<i>Transportentfernung</i>	Fahrkosten zwischen i und j
O_i	<i>Oeffnungskosten</i>	Kosten der Eröffnung des Depots $i \in I$
U_i	<i>Fixkosten_Depot</i>	Fixkosten für den Betrieb des Depots $i \in I$
C_i	<i>Schliesskosten</i>	Kosten der Schließung des Depots $i \in I$
y_{i0}	y_{i0}	(Geschlossener) Ausgangszustand des Depots $i \in I$
W_i	<i>Depotkapazitaet</i>	Kapazität des Depots $i \in I$
d_j	<i>Nachfrage</i>	Nachfrage des Kunden j
d_{jt}	<i>Nachfrage</i>	Nachfrage des Kunden j in Periode t
Q	<i>Fahrzeugkapazitaet</i>	Kapazität jedes Fahrzeugs $k \in K$
F	<i>Fixkosten_Fahrzeug</i>	Fixkosten für die Nutzung jedes Fahrzeugs $k \in K$
	Entscheidungsvariablen/ Parameter existieren lediglich im dynamischen Fall	
	Entscheidungsvariable existiert lediglich im dynamisch-deterministischen Fall mit periodischer Konfiguration	
	Entscheidungsvariable existiert lediglich in der zweiten Modellversion des Location-Allocation Problems	

Kapitel 11

Strafkostenberechnung

11.1 Problemstellung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse einer Optimierungsstudie betrachtet. Das Ziel dieser Studie war, die Erfüllung von Nachfragen einer Menge von Kunden, deren voraussichtlicher monatlicher Bedarf nicht bekannt ist, zu untersuchen. Es ist aber die Information über den Bedarf der letzten zwei Jahre (24 Monate) vorhanden, anhand derer die zukünftigen Nachfragen prognostiziert werden.

Insgesamt wurden zwei Prognosemethoden miteinander verglichen. Im ersten Fall wurde angenommen, dass die Nachfrage eines Kunden in einer Periode gleich seiner Nachfrage in der vorherigen Periode ist (Methode der Vorperioden). Im zweiten Fall hat man die Funktionalität der Umgebung für statistisches Rechnen R benutzt und mit Hilfe von Exponential-Glättung die Nachfrage von Kunden prognostiziert (Forecast).

Die Informationen über Kunden, Depots und zur Verfügung stehenden Fahrzeugen sind in den Instanzen zusammengefasst, die danach als Eingabe für das Optimierungsproblem dienen. Die Ergebnisse der Optimierung bilden die Kosten der Eröffnung von Depots, der Benutzung von Fahrzeugen und die Kosten der Routen zwischen den Kunden, die sich als pauschale Entfernung zwischen den Kunden einer Route ergeben.

Für jedes Prognoseverfahren wird zuerst mit den prognostizierten Daten optimiert, danach werden prognostizierte Daten durch reale ersetzt und somit die unerfüllte Nachfrage von Kunden berechnet. Für die unbelieferten Mengen werden dann die Strafkosten festgelegt, die von den Fixkosten der Fahrzeuge und Depots abhängen. Es ist dadurch zu begründen, dass die Nachlieferung von fehlenden Artikeln den Einsatz von zusätzlichen Fahrzeugen und eventuelle Öffnung neuer Depots bedeutet.

Das Ziel dieses Kapitels ist also, eine Funktion für die Berechnung von Strafkosten zu finden.

11.2 Ergebnisse der Optimierung

Für jede Instanz wird ein Location–Routing Problem (**LRP**) gelöst. Dies wird mit Hilfe von *lrptester.exe* gemacht. Als Ergebnis bekommt man die Werte der Depotkosten (**DK**, Kosten der Eröffnung von Depots), der Routenkosten (**RT**, Summe der Längen von Routen) und der Gesamtkosten (**GK**) (siehe die nach der Optimierung generierte Excel–Datei mit dem Namen in der Form *result_DatumZeit.xls*). Die Gesamtkosten sind gleich der Summe von Depotkosten, Routenkosten und Strafen (**St**). Somit kann man die Strafen (in allgemeinen Einheiten) als

$$St = GK - DK - RK \quad (11.1)$$

berechnen. Bei diesem Verfahren lässt sich jedoch nicht unterscheiden, wie die Strafen zustande gekommen sind, was aber von Bedeutung wäre, da verschiedene Gründe für die Strafen auch unterschiedlich bestraft werden sollen. Aus diesem Grund wird nach zwei Typen von Strafen unterschieden.

Die vollständige Information über die Strafen findet man in der zweiten nach der Optimierung generierten Excel–Datei (mit dem Wort *rest* im Namen). In dieser Datei werden jedem Typ von Strafen bestimmte Kosten (Price, weiter **P**) zugewiesen. Das sind die Kosten, die bei der Nachlieferung der fehlenden Waren entstehen. Sie werden als Basis für die Berechnung von Strafen genommen und entsprechend angepasst. Was diese Kosten ausmacht, wird weiter für jeden Typ separat beschrieben.

11.3 Strafen Typ 1: Verletzung der Depotkapazität

Die Strafen des ersten Typs entstehen, wenn die Summe der Nachfragen aller zu einem Depot zugeordneten Kunden größer als die Kapazität dieses Depots ist. Die Kosten P sind in diesem Fall gleich der fixen Depotkosten. Für die Berechnung von Strafen benutzen wir die folgende Formel:

$$St_1 = P_D \cdot \frac{\text{Verletzung}}{\text{Kapazität}}, \quad (11.2)$$

wobei *Verletzung* für unbelieferte Menge steht, und unter *Kapazität* die Kapazität des Depots zu verstehen ist.

Die Verletzung der Depotkapazität bedeutet in diesem Fall, dass man ein oder mehrere zusätzliche Depots braucht, um den Bedarf von Kunden zu erfüllen. Die neu geöffneten Depots sind alle gleich dem Depot, dessen Kapazität überschritten wurde. Wenn aber ein

neues Depot nicht vollständig beladen wird, wird der Preis entsprechend der Beladung angepasst.

11.4 Strafen Typ 2: Verletzung der Fahrzeugkapazität

Die Strafen des zweiten Typs entstehen, wenn die Summe der Nachfragen von den zu einem Fahrzeug zugeordneten Kunden größer ist als die Fahrzeugkapazität. Die Kosten P sind dann gleich der Kosten der Route, die durch dieses Fahrzeug befahren wird. Die Verletzungen vom Typ 2 werden anhand der folgenden Formel bestraft:

$$St_2 = \alpha((Fixpreis + P_R) - \beta e^{-\frac{Verletzung}{\gamma}}) \quad (11.3)$$

wobei $Fixpreis$ ein fester Preis pro Fahrzeug ist und α, β, γ drei einstellbare Parameter sind.

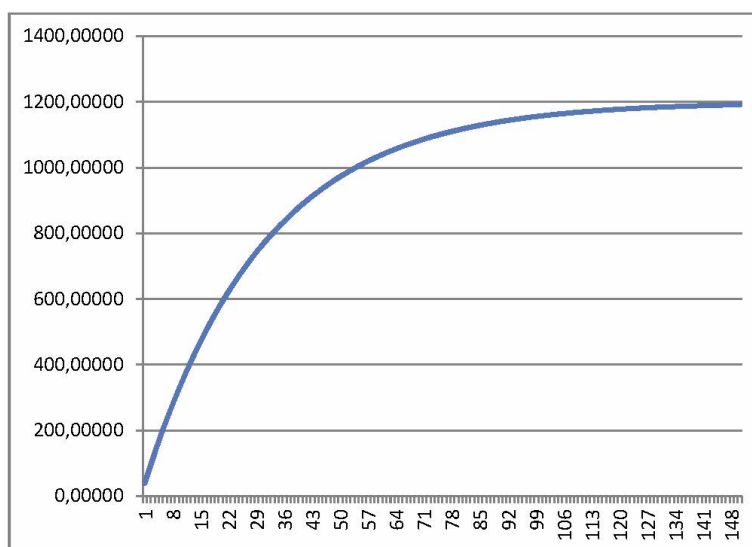


Abbildung 11.1: Typ 2-Strafkurve

In Abbildung (11.1) ist das allgemeine Aussehen einer Strafkurve im Fall der Strafen des Typs 2 dargestellt. Dort ist das mögliche Ausmaß der Verletzungen von 1 bis 150 Einheiten dargestellt, wobei der Wert 150 einem neuen vollbeladenen Fahrzeug mit der Kapazität 150 entspricht. Da die Verletzungen bestraft werden, sind die Parameter so ausgewählt, dass dieses neue voll beladene Auto teurer sein wird als der ursprüngliche Fixpreis, d.h. es soll:

$$\alpha((Fixpreis + P_R) - \beta e^{-\frac{Verletzung}{\gamma}}) > Fixpreis \quad (11.4)$$

gelten. So kostet ein neues Fahrzeug im Fall, der auf der Abbildung (11.1) dargestellt ist,

fast 1200 statt ursprünglichen 1000 Geldeinheiten (Fixpreis = 1000, $\alpha = 1.2$, $\beta = 1200$, $\gamma = 30$).

11.5 Strafkosten einer Instanz

Für jede einzelne Instanz bestimmt man zuerst die Strafen für jede Verletzung und danach summiert man alle Strafen des gleichen Typs. D.h. man bekommt am Ende zwei Werte: die Strafen des Typs 1 und die des Typs 2. Die gesamten Strafkosten einer Instanz ergeben sich als die Summe dieser beiden Werte.

11.6 Berechnung und Ergebnisse

Im Folgenden werden die Berechnungsergebnisse für 90 generierte Instanzen vorgestellt, in denen die Nachfrage von Kunden zweimal generiert wurde (einmal mit dem Vorperiode–Verfahren und einmal mit der exponentiellen Glättung). Die Ergebnisse sind in der Tabelle (11.1) dargestellt.

- Parameter für die Fahrzeugkapazität 70:
 $Fixpreis = 1000, \alpha = 1.2, \beta = 850, \gamma = 15.$
- Parameter für die Fahrzeugkapazität 150:
 $Fixpreis = 1000, \alpha = 1.2, \beta = 1200, \gamma = 30.$

Fazit

Laut der Problemstellung erwartet man, dass die Prognosen der Kundennachfrage mit Hilfe der exponentiellen Glättung bessere (präzisere) Resultate liefern und die Anwendung dieses Verfahrens in der Praxis die bei der Lösung von LRP entstehenden Kosten deswegen reduzieren kann.

Falls diese Vermutung wahr wäre, könnte man das in den Werten von Gesamtkosten nach der Optimierung sehen. In der Tat, bessere Prognoseergebnisse bedeuten, dass die Strafen im Fall der Forecast–Methode kleiner sind als die im Fall der Vorperiode–Methode. Es ist jedoch auch wichtig, welches Gewicht die Strafkosten in den Gesamtkosten enthalten.

Wie die Rechenergebnisse in unserem Fall zeigen, ist die oben formulierte Vermutung bestätigt worden. Es ergibt sich also, dass die Forecast-Methode ca. um 5,34% besser als Vorperiode-Verfahren ausfällt. Es kommen aber auch Instanzen vor, bei denen die Vermutung falsch ist (in der Tabelle (11.1): z.B. $c_3 - KK - 20 - 5 - 70 - 1000 - 0$ und $c_0 - KK - 20 - 5 - 70 - 1000 - 2$ [Anzahl Cluster (0,2,3 -"verstreut", 2 Kunden, 3 Kunden)

/ Zeitreihe / Anzahl der Kunden / Anzahl der Depots / Kapazität der Fahrzeuge / Kosten pro Strecke]). Hinweis: In dieser Arbeit werden **KK-** (kein Trend, keine Saisonalität), **KA-** (kein Trend, additive Saisonalität) und **AK-** (additiver Trend, keine Saisonalität) Zeitreihen getestet. (Vgl. Abbildung (7.1)))

Tabelle 11.1: Ergebnisse der Strafkostenberechnung

Instanz	Vorperiode		Forecast		Vergleich	
	St	GK	St	GK	Verhältnis St	Verhältnis GK
c0-AK-100-10-70-1000-2	812681,799	5009637,8	486972,702	4690774,7	-40,08%	-6,36%
c0-AK-100-5-70-1000-2	807934,719	5127222,72	528765,976	4798293,98	-34,55%	-6,42%
c0-AK-20-5-70-1000-2	128459,724	1451613,72	51403,9753	1382046,98	-59,98%	-4,79%
c0-AK-200-10-70-1000-2	1863750,27	10065040,3	1088643,23	9388790,23	-41,59%	-6,72%
c0-AK-50-5-70-1000-2	479335,926	3005556,93	217505,531	2740315,53	-54,62%	-8,83%
c0-KA-100-10-70-1000-2	1318145,04	11066113	985507,011	10339814	-25,24%	-6,56%
c0-KA-100-5-70-1000-2	1115229,16	11185394,2	819766,708	10921804,7	-26,49%	-2,36%
c0-KA-20-5-70-1000-2	280225,369	2296120,37	148625,725	2165155,72	-46,96%	-5,70%
c0-KA-200-10-70-1000-2	2871205,42	23075523,4	1870767,4	22101360,4	-34,84%	-4,22%
c0-KA-50-5-70-1000-2	685367,598	5868695,6	650185,034	5819159,03	-5,13%	-0,84%
c0-KK-100-10-70-1000-2	785957,527	9122943,53	312623,969	8851237,97	-60,22%	-2,98%
c0-KK-100-5-70-1000-2	592635,36	10921222,4	197296,865	10589885,9	-66,71%	-3,03%
c0-KK-20-5-70-1000-2	70992,8365	2219363,84	41719,9843	2255286,98	-41,23%	1,62%
c0-KK-200-10-70-1000-2	1334824,83	21227528,8	354849,485	21156881,5	-73,42%	-0,33%
c0-KK-50-5-70-1000-2	329698,584	5246297,58	145708,754	5191300,75	-55,81%	-1,05%
c2-AK-100-10-70-1000-1	609245,567	4004454,57	304560,136	3768639,14	-50,01%	-5,89%
c2-AK-100-5-70-1000-1	850722,466	4779579,47	396136,176	4554145,18	-53,44%	-4,72%
c2-AK-20-5-70-1000-1	86314,831	1268063,83	31997,0995	1229861,1	-62,93%	-3,01%
c2-AK-200-10-70-1000-1	1628531,35	8680297,35	820146,36	8264556,36	-49,64%	-4,79%
c2-AK-50-5-70-1000-1	273718,518	2276511,52	167462,669	2150214,67	-38,82%	-5,55%
c2-KA-100-10-70-1000-1	1314298,36	11635197,4	991624,011	11309841	-24,55%	-2,80%
c2-KA-100-5-70-1000-1	840962,844	8470932,84	647231,153	8360659,15	-23,04%	-1,30%
c2-KA-20-5-70-1000-1	173340,039	1997203,04	105896,008	1907041,01	-38,91%	-4,51%
c2-KA-200-10-70-1000-1	1782567,51	17529284,5	1248682,83	16922783,8	-29,95%	-3,46%
c2-KA-50-5-70-1000-1	468761,878	4573452,88	364204,902	4338828,9	-22,30%	-5,13%
c2-KK-100-10-70-1000-1	546324,926	7628277,93	220057,314	7420334,31	-59,72%	-2,73%
c2-KK-100-5-70-1000-1	445674,775	9189284,77	223241,42	9081505,42	-49,91%	-1,17%
c2-KK-20-5-70-1000-1	60383,7237	1354219,72	28595,6415	1326657,64	-52,64%	-2,04%
c2-KK-200-10-70-1000-1	1508092,98	19356322	411852,523	18842447,5	-72,69%	-2,65%
c2-KK-50-5-70-1000-1	530763,1	7785957,1	193512,129	7641081,13	-63,54%	-1,86%
c3-AK-100-10-70-1000-0	875588,828	4708070,83	414379,662	4310905,66	-52,67%	-8,44%
c3-AK-100-5-70-1000-0	782782,019	4955636,02	395959,112	4641638,11	-49,42%	-6,34%
c3-AK-20-5-70-1000-0	100796,201	1140826,2	78207,4209	1122641,42	-22,41%	-1,59%
c3-AK-200-10-70-1000-0	1675850,13	9365032,13	935969,898	9230406,9	-44,15%	-1,44%

11. Kapitel: Strafkostenberechnung

Instanz	Vorperiode		Forecast		Vergleich	
	St	GK	St	GK	Verhältnis	Verhältnis
					St	GK
c3-AK-50-5-70-1000-0	321082,747	2581246,75	235137,673	2539728,67	-26,77%	-1,61%
c3-KA-100-10-70-1000-0	1000013,69	9717206,69	771564,729	9530188,73	-22,84%	-1,92%
c3-KA-100-5-70-1000-0	1187895,96	10780109	867248,369	10454953,4	-26,99%	-3,02%
c3-KA-20-5-70-1000-0	200811,508	2349000,51	119889,928	2287338,93	-40,30%	-2,63%
c3-KA-200-10-70-1000-0	2497803,97	22129785	1595373,74	20420362,7	-36,13%	-7,72%
c3-KA-50-5-70-1000-0	534704,707	4993617,71	355923,093	4753772,09	-33,44%	-4,80%
c3-KK-100-10-70-1000-0	719868,282	9570587,28	201627,112	9540786,11	-71,99%	-0,31%
c3-KK-100-5-70-1000-0	519171,963	10076851	167499,725	9749841,72	-67,74%	-3,25%
c3-KK-20-5-70-1000-0	102053,581	2047459,58	35922,8953	2058821,9	-64,80%	0,55%
c3-KK-200-10-70-1000-0	2008954,24	23627025,2	575732,232	22721081,2	-71,34%	-3,83%
c3-KK-50-5-70-1000-0	277165,869	4625957,87	110649,325	4575222,32	-60,08%	-1,10%
c0-AK-100-10-150-1000-2	563656,718	3270327,72	243095,893	2984415,89	-56,87%	-8,74%
c0-AK-100-5-150-1000-2	667173,869	3132309,87	324207,217	2828365,22	-51,41%	-9,70%
c0-AK-20-5-150-1000-2	108164,021	1234977,02	63118,8985	1192119,9	-41,65%	-3,47%
c0-AK-200-10-150-1000-2	1360186,52	6246253,52	610618,607	5516135,61	-55,11%	-11,69%
c0-AK-50-5-150-1000-2	256979,408	1849601,41	80542,7791	1676796,78	-68,66%	-9,34%
c0-KA-100-10-150-1000-2	922365,271	5511389,27	578562,136	5216577,14	-37,27%	-5,35%
c0-KA-100-5-150-1000-2	1197162,52	6201123,52	808468,099	5954806,1	-32,47%	-3,97%
c0-KA-20-5-150-1000-2	165094,483	1467129,48	117667,389	1428995,39	-28,73%	-2,60%
c0-KA-200-10-150-1000-2	1952075,98	10904913	1213624,2	9823870,2	-37,83%	-9,91%
c0-KA-50-5-150-1000-2	413923,323	2828332,32	217775,932	2589878,93	-47,39%	-8,43%
c0-KK-100-10-150-1000-2	512077,517	4736804,52	139821,106	4389597,11	-72,70%	-7,33%
c0-KK-100-5-150-1000-2	781388,444	5547283,44	199600,665	5033237,66	-74,46%	-9,27%
c0-KK-20-5-150-1000-2	36874,6433	1109892,64	4211,74068	1090632,74	-88,58%	-1,74%
c0-KK-200-10-150-1000-2	1368459,35	9676840,35	386256,374	8771678,37	-71,77%	-9,35%
c0-KK-50-5-150-1000-2	258305,261	2790463,26	69420,414	2571079,41	-73,12%	-7,86%
c2-AK-100-10-150-1000-1	367103,674	2593953,67	204693,743	2434571,74	-44,24%	-6,14%
c2-AK-100-5-150-1000-1	767427,988	3217320,99	378434,23	2842817,23	-50,69%	-11,64%
c2-AK-20-5-150-1000-1	61198,7371	962310,737	32242,5941	939787,594	-47,31%	-2,34%
c2-AK-200-10-150-1000-1	848510,882	4707221,88	469484,324	4547256,32	-44,67%	-3,40%
c2-AK-50-5-150-1000-1	290195,236	1842167,24	128656,25	1688491,25	-55,67%	-8,34%
c2-KA-100-10-150-1000-1	617152,021	4200321,02	429997,5	3950157,5	-30,33%	-5,96%
c2-KA-100-5-150-1000-1	856556,934	4686250,93	550240,869	4187971,87	-35,76%	-10,63%
c2-KA-20-5-150-1000-1	220497,785	1664180,79	135685,254	1602506,25	-38,46%	-3,71%
c2-KA-200-10-150-1000-1	1659339,42	8946181,42	993238,993	8140933,99	-40,14%	-9,00%
c2-KA-50-5-150-1000-1	283418,971	1914310,97	157181,694	1756717,69	-44,54%	-8,23%
c2-KK-100-10-150-1000-1	632109,25	4856301,25	249725,901	4554737,9	-60,49%	-6,21%
c2-KK-100-5-150-1000-1	525142,972	4402324,97	121937,621	3933187,62	-76,78%	-10,66%
c2-KK-20-5-150-1000-1	57015,0713	1118221,07	23772,4193	1091554,42	-58,31%	-2,38%
c2-KK-200-10-150-1000-1	1287463,26	9094158,26	402488,826	8459517,83	-68,74%	-6,98%
c2-KK-50-5-150-1000-1	332856,88	2397183,88	72263,0444	2088430,04	-78,29%	-12,88%

11. Kapitel: Strafkostenberechnung

Instanz	Vorperiode		Forecast		Vergleich	
	St	GK	St	GK	Verhältnis	Verhältnis
					St	GK
c3-AK-100-10-150-1000-0	582216,029	3214055,03	211444,472	2838083,47	-63,68%	-11,70%
c3-AK-100-5-150-1000-0	535568,865	2824607,87	259895,097	2582304,1	-51,47%	-8,58%
c3-AK-20-5-150-1000-0	65119,8679	935052,868	9459,01296	888749,013	-85,47%	-4,95%
c3-AK-200-10-150-1000-0	1112755,83	5357719,83	476521,319	4764281,32	-57,18%	-11,08%
c3-AK-50-5-150-1000-0	303644,972	1605537,97	97595,9467	1417080,95	-67,86%	-11,74%
c3-KA-100-10-150-1000-0	880195,938	5084602,94	553733,779	4659772,78	-37,09%	-8,36%
c3-KA-100-5-150-1000-0	896417,959	5680521,96	779848,571	5583504,57	-13,00%	-1,71%
c3-KA-20-5-150-1000-0	132989,778	1148659,78	65664,0962	1083980,1	-50,62%	-5,63%
c3-KA-200-10-150-1000-0	1724214,24	9943025,24	1252249,36	9744417,36	-27,37%	-2,00%
c3-KA-50-5-150-1000-0	310905,303	2346600,3	234668,957	2212946,96	-24,52%	-5,70%
c3-KK-100-10-150-1000-0	552998,71	4452870,71	153114,562	4240564,56	-72,31%	-4,77%
c3-KK-100-5-150-1000-0	646802,891	4904177,89	261455,686	4597643,69	-59,58%	-6,25%
c3-KK-20-5-150-1000-0	155951,307	1554497,31	51095,3005	1470594,3	-67,24%	-5,40%
c3-KK-200-10-150-1000-0	1171764,53	8894413,53	354217,829	8058352,83	-69,77%	-9,40%
c3-KK-50-5-150-1000-0	302035,716	2420646,72	80300,2262	2219754,23	-73,41%	-8,30%

Kapitel 12

Analyse der generierten Instanzen

12.1 Analyse anhand verschiedener Metriken

Wir möchten vor der Optimierung abschätzen können, wie gut Forecast im Vergleich zu Vorperiode ist. Dafür wird die Differenz zwischen den echten und prognostizierten Nachfragen mit Hilfe verschiedener Metriken abgeschätzt. Die Ergebnisse des Vergleiches werden durch Programm Metriks.exe in einer Excel-Datei zusammengefasst. Für den Vergleich werden verschiedene Metriken für die Berechnung der Fehler, die bei der Forecast entstehen, benutzt¹⁸¹. Und zwar:

CFE (Cumulative Sum of Forecast Error)	$CFE = \sum_{t=1}^n e_t$
MSE (Mean Square Error)	$MSE = \frac{\sum_{t=1}^n e_t^2}{n}$
MAD (Mean Absolute Deviation)	$MAD = \frac{\sum_{t=1}^n e_t }{n}$
MAPE (Mean Absolute Percentage Error)	$MAPE = \frac{\sum_{t=1}^n e_t/Y_t 100}{n}$
ME (Mean Error)	$ME = \frac{\sum_{t=1}^n e_t}{n}$
RMSE (Root Mean Square Error)	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n e_t^2}$

wobei $e_t = R_t - F_t$, d.h. ein Fehler ist die Differenz zwischen den reellen Daten und Forecast in jedem Zeitpunkt. Darüber hinaus werden auch zusätzlich nur die Fälle betrachtet, bei denen Forecast die reellen Daten unterschätzt, d.h.

$$e'_t = [R_t - F_t]_+ = \begin{cases} 0, & \text{falls } R_t \leq F_t \\ R_t - F_t, & \text{falls } R_t > F_t \end{cases} \quad (12.1)$$

¹⁸¹Siehe Folien zur Vorlesung Forecasting von Prof. Dr.-Ing. B. Noche, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Universität Duisburg – Essen, Abteilung Maschinenbau, Transportsysteme und –logistik.

Um zu wissen, im welchen Verhältnis die Prognosefehler bei der Forecast zu den Fehler bei der Vorperiode stehen, wird folgender Wert berechnet:

$$\frac{Metrik_{Forecast}}{Metrik_{Vorperiode}} - 1 \quad (12.2)$$

Wenn diese Zahl negativ ist, heißt es, dass $Metrik_{Forecast} < Metrik_{Vorperiode}$ ist und somit Forecast besser als Vorperiode ist, da er weniger Prognose-Fehler beinhaltet.

Bei zwei von den drei betrachteten Zeitreihentypen (KK und AK) lieferte die Forecast-Methode im Vergleich zur Vorperiode – Methode deutlich bessere Ergebnisse (Sehe ErgebnisMetriken.xlsx). Das kann man dadurch erklären, dass beide Instanzen einen positiven Trend enthalten (obwohl bei KK-Reihen dieser Trend gering ist). Da die Vorperiode-Methode für die Periode t den Wert der vorherigen Periode ($t - 1$) benutzt, unterschätzt die Vorperiode bei einem Trend die Nachfrage der Kunden und das führt zu größeren Fehlern.

Im Fall der Zeitreihen, die von der Saisonalität abhängige Nachfrage der Kunden repräsentiert, ist die Differenz zwischen zwei Methoden nicht mehr so deutlich, aber auch hier hat Forecast bessere Ergebnisse vorzuweisen.

12.2 Analyse der Ergebnisse nach der Optimierung

Nach der Generierung werden Instanzen optimiert. Jede Instanz wird dabei so oft optimiert, wie es im Parameter „numberOfRuns“ angegeben wird (in unserem Fall war dieser Parameter gleich 10 gesetzt). Nach dem Ende der Optimierung werden zwei Excel-Dateien mit weiteren Informationen für die Analyse erstellt.

Für die Analyse der Ergebnisse jedes einzelnen Falls werden folgende Parameter ausgewählt:

- Gesamtkosten (**GK**)
- Depotkosten (**DK**)
- Routenkosten (**RK**)
- Strafen (**St**),

wobei Strafen als Differenz zwischen Gesamtkosten und der Summe von Depots- und Routenkosten, definiert als ($St = GK - DK - RK$), verstanden werden und entsprechen den nicht erfüllten Nachfragemengen der Kunden.

Alle für die Analyse notwendigen Werte werden in einer neuen Tabelle zusammenge-

fasst (siehe Mustertabelle.xlsx), wobei Abweichungen wie folgt berechnet werden:

$$\text{Abweichung}_{GK} = GK_{\text{Forecast}} / GK_{\text{Vorperiode}} - 1$$

$$\text{Abweichung}_{DK} = DK_{\text{Forecast}} / DK_{\text{Vorperiode}} - 1$$

$$\text{Abweichung}_{RK} = RK_{\text{Forecast}} / RK_{\text{Vorperiode}} - 1$$

$$\text{Abweichung}_{St} = St_{\text{Forecast}} / St_{\text{Vorperiode}} - 1$$

Auch hier, wie in dem Fall der Metriken, bedeuten negative Abweichungen, dass Forecast kleinere Werte im Vergleich zu Vorperiode hat.

An dieser Stelle ist es in erster Linie interessant, ob die Forecast die Vorteile gegenüber der Vorperiode – Methode hat. Wenn man die Gesamtkosten betrachtet, merkt man, dass die bei der Forecast grösser sind als bei der Vorperiode. Das lässt sich dadurch erklären, dass Forecast, die Nachfrage der Kunden laut der Metrikanalyse besser abschätzt, mit größerer Wahrscheinlichkeit zusätzliche Depots öffnen und somit höhere Gesamtkosten haben wird. Diese Vermutung bestätigt auch die Tatsache, dass die Strafen bei Forecast kleiner als bei Vorperiode sind.

Da die Strafen der nicht erfüllten Nachfragemengen der Kunden entsprechen, hat es Sinn einen bestimmten Strafkostensatz (**SKS**) für jede Strafeinheit einzusetzen. Dafür gibt es auch einen betriebswirtschaftlichen Grund, da zu wenig gelieferte Mengen zur eventuellen Beendigung der Geschäftsverbindungen führen kann.

Dabei werden zwei mögliche Ansätze zur Bestimmung des SKS vorgeschlagen. Und zwar:

1. Man führt den SKS als eine feste Zahl **S** ein. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Nachlieferung der entsprechenden Strafen zur Eröffnung der neuen Route führt, und **S** sind die Kosten dieser Eröffnung, wobei die Route mit einem Fahrzeug befahren wird. Zu bemerken ist dabei, dass dieses **S** für alle Instanzen gleich und unabhängig von den Gesamtkosten ist.
2. Man wählt als SKS eine bestimmte Prozentzahl an Gesamtkosten aus. D.h. man berücksichtigt, dass die Gesamtkosten der verschiedenen Instanzen auch verschiedene Ordnungen haben können und somit die Strafkostensätze unterschiedlich groß sein sollten.

Werden die beschriebenen Pauschalzahlungen in Betracht gezogen, ergeben sich neue Gesamtkosten \widetilde{GK} :

$$\widetilde{GK} = DK + RK + St \cdot SKS. \tag{12.3}$$

Um die Ergebnisse der beiden Fälle ermitteln und vergleichen zu können, werden zwei

folgende Größen definiert:

Gesamtverbesserung (**GV**) der Modelle:

$$GV = \widetilde{GK}_{Forecast} / \widetilde{GK}_{Vorperiode} - 1 \quad (12.4)$$

Absolute Gesamtverbesserung (**aGV**)

$$aGV = \widetilde{GK}_{Forecast} - \widetilde{GK}_{Vorperiode} \quad (12.5)$$

Die Ergebnisse für einige Instanzen nach dem Testen der Modelle bei KK-, KA- und AK- Nachfrageläufe sind in den Tabellen (12.2) und (12.3) zusammengefasst. Es lässt sich schließen, dass die Prognose über die künftige Nachfragemenge anhand der Betrachtung der letzten 24 Perioden im Durchschnitt zum deutlichen Kosteneinsparungen führt.

12.3 Strafkostensätze

Im Folgenden werden zwei Varianten zur Bestimmung von Strafkostensätzen vorgeschlagen und Ergebnisse der Berechnungen für beide beigefügt.

1. Man setzt SKS gleich 1000 *GE*. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Nachlieferung der entstehenden Strafen zur Eröffnung der neuen Route führt, und 1000 sind die Kosten dieser Eröffnung, wobei die Route mit einem Fahrzeug befahren wird. Die Ergebnisse für diesen Fall sind in der Tabelle (12.2) dargestellt.

$$\widetilde{GK} = DK + RK + St \cdot SKS \quad (12.6)$$

2. Im zweiten Fall wird nach dem gleichen Prinzip, wie vorher, gehandelt, mit dem Unterschied, dass die Werte der Strafen zu groß für ein Fahrzeug sein können, da die Kapazität jedes Fahrzeuges durch 50 beschränkt ist. In diesem Fall werden die nötige Anzahl von Fahrzeugen für die Nachlieferung und entsprechende SKS nach folgenden Formeln berechnet:

$$N = \left\lceil \frac{\text{Strafen}}{\text{Fahrzeugkapazität}} \right\rceil \quad (12.7)$$

$$SKS = N \cdot 1000 \quad (12.8)$$

$$\widetilde{GK} = DK + RK + SKS \quad (12.9)$$

Die Ergebnisse für diesen Fall sind in der Tabelle (12.3) dargestellt.

Strafen _{Forecast}	1.Fall	2.Fall	
	SKS	N	SKS
38,5	1000,0	1	1000,0
32,8	1000,0	1	1000,0
37,9	1000,0	1	1000,0
270,6	1000,0	6	6000,0
249,8	1000,0	5	5000,0
257,2	1000,0	6	6000,0
64,5	1000,0	2	2000,0
65,7	1000,0	2	2000,0
70,4	1000,0	2	2000,0
70,0	1000,0	2	2000,0
54,3	1000,0	2	2000,0
71,3	1000,0	2	2000,0
35,5	1000,0	1	1000,0
33,1	1000,0	1	1000,0
35,4	1000,0	1	1000,0
66,5	1000,0	2	2000,0
67,6	1000,0	2	2000,0
65,9	1000,0	2	2000,0

Tabelle 12.1: Beispiel zur Bestimmung von SKS

12.4 Zusammenfassung

- Laut der Metrikanalyse liefert Forecast Methode bessere Annäherung an die reellen Daten;
- Gesamtkosten bei Forecast sind höher als bei Vorperiode, die Strafen sind umgekehrt kleiner. Das lässt sich auf Grund der besseren Annäherung an die reellen Daten erklären;
- Man führt zusätzlich einen festen Strafkostensatz ein, um die Rolle der Strafen an den Gesamtkosten zu berücksichtigen;
- Bei dem festen Strafkostensatz (erster Vorschlag für Bestimmung der SKS) lässt sich schnell erreichen, dass die Gesamtverbesserung der Modelle eine negative Zahl annimmt, was bedeutet, dass die Gesamtkosten bei Forecast kleiner sein werden als bei Vorperiode.
- Das gleiche Ergebnis erreicht man, wenn der Strafkostensatz durch die feste Prozentzahl der Gesamtkosten bestimmt wird. Das positive Ergebnis stellt sich bereits mit $SKS = 0,025\% GK$ ein.

- Die Instanzen mit der Saisonalität liefern schlechtere Ergebnisse, was daran liegt, dass sowohl Vorperiode als auch Forecast schlechtere Annäherung an die reellen Daten haben.

Tabelle 12.2: Ergebnisse für Instanzen (Anzahl der Kunden - Anzahl der Depots - Fixkosten für die Nutzung des Fahrzeugs) 20-5-1000, 50-5-1000, 100-5-1000, 100-10-1000, 200-10-1000

Anzahl Kunden	Anzahl Depots	Cluster	Zeitreihe	Abweichung _{GK} (Durchschnitt von 3 Instanzen)	Prozentuale Gesamtverbesserung	Absolute Gesamtverbesserung
20	5	2	KK	-0,71 %	-3,11 %	-41156,20
			S	0,08 %	-4,41 %	-60758,98
			∅	-0,32 %	-3,76 %	-50957,59
		3	KK	-0,02 %	-3,27 %	-49286,93
			S	-1,33 %	-4,02 %	-58933,97
			∅	-0,67 %	-3,65 %	-54110,45
		verstreut	KK	-0,28 %	-5,05 %	-71210,94
			S	-0,40 %	-3,50 %	-53274,00
			∅	-0,34 %	-4,28 %	-62242,82
				-0,44 %	-3,90 %	-55770,29
50	5	2	KK	-0,24 %	-6,77 %	-204063,38
			S	-0,57 %	-4,66 %	-116233,82
			∅	-0,40 %	-5,71 %	-160148,60
		3	KK	-1,90 %	-5,57 %	-171850,86
			S	-1,64 %	-4,09 %	-126526,30
			∅	-1,77 %	-4,83 %	-149188,58
		verstreut	KK	0,29 %	-7,37 %	-113693,58
			S	-0,51 %	-5,91 %	-101427,48
			∅	-0,11 %	-6,64 %	-107560,53
				-0,76 %	-5,73 %	-138965,90
100	5	2	KK	-0,71 %	-4,00 %	-208887,80
			S	0,08 %	-4,39 %	-254130,20
			∅	-0,32 %	-4,19 %	-231509,01
		3	KK	-0,02 %	-2,25 %	-128938,00
			S	-1,33 %	-3,89 %	-213684,60
			∅	-0,67 %	-3,07 %	-171311,27
		verstreut	KK	-0,28 %	-2,33 %	-136009,60
			S			
			∅	-0,28 %	-2,33 %	-136009,60
				-0,42 %	-3,20 %	-179609,95
100	10	2	KK	3,47 %	-1,92 %	-96966,06
			S	1,85 %	-2,38 %	-131721,06
			∅	2,66 %	-2,15 %	-114343,56
		3	KK	1,21 %	-1,15 %	-67635,71
			S	-1,41 %	-1,98 %	-113154,31
			∅	-0,10 %	-1,56 %	-90395,01
		verstreut	KK	-2,06 %	0,26 %	13516,21
			S	1,06 %	-3,75 %	-214072,12
			∅	-0,50 %	-1,74 %	-100277,95
				0,69 %	-1,82 %	-101672,18
200	10	2	KK	1,35 %	-3,66 %	-386268,34
			S	3,48 %	-2,31 %	-233468,41
			∅	2,42 %	-2,98 %	-309868,38
		3	KK	3,04 %	-1,96 %	-221789,49
			S	3,60 %	-1,35 %	-148856,62
			∅	3,32 %	-1,66 %	-185323,05
		verstreut	KK	2,62 %	-2,31 %	-241607,58
			S	2,86 %	-1,54 %	-179461,01
			∅	2,74 %	-1,93 %	-210534,30
				2,83 %	-2,19 %	-224884,15

Tabelle 12.3: Ergebnisse für Instanzen (Anzahl der Kunden - Anzahl der Depots - Fixkosten für die Nutzung des Fahrzeugs) 20-5-1000, 50-5-1000, 100-5-1000, 100-10-1000, 200-10-1000

Anzahl Kunden	Anzahl Depots	Cluster	Zeitreihe	Abweichung _{GK} (Durchschnitt von 3 Instanzen)	Prozentuale Gesamtverbesserung	Absolute Gesamtverbesserung
20	5	2	KK	-0,71 %	-0,76 %	-9663,15
			S	0,08 %	-0,01 %	-595,79
			∅	-0,32 %	-0,38 %	-5129,47
		3	KK	-0,02 %	-0,09 %	-1457,07
			S	-1,33 %	-1,35 %	-18100,64
			∅	-0,67 %	-0,72 %	-9778,86
		verstreut	KK	-0,28 %	-0,37 %	-4624,14
			S	-0,40 %	-0,48 %	-6417,06
			∅	-0,34 %	-0,42 %	-5520,60
				-0,44 %	-0,51 %	-6809,64
50	5	2	KK	-0,24 %	-0,39 %	-11275,18
			S	-0,57 %	-0,66 %	-14049,79
			∅	-0,40 %	-0,53 %	-12662,49
		3	KK	-1,90 %	-1,97 %	-56017,53
			S	-1,64 %	-1,69 %	-47911,72
			∅	-1,77 %	-1,83 %	-51964,62
		verstreut	KK	0,29 %	-0,45 %	-5624,14
			S	-0,51 %	-0,53 %	-7194,84
			∅	-0,11 %	-0,49 %	-6409,49
				-0,76 %	-0,95 %	-23678,87
100	5	2	KK	-0,71 %	1,07 %	46626,1
			S	0,08 %	0,40 %	4036,50
			∅	-0,32 %	0,74 %	25331,27
		3	KK	-0,02 %	1,49 %	81065,50
			S	-1,33 %	0,61 %	29405,70
			∅	-0,67 %	1,05 %	55235,60
		verstreut	KK	-0,28 %	0,54 %	27080,70
			S			
			∅	-0,28 %	0,54 %	27080,70
				-0,42 %	0,77 %	35882,52
100	10	2	KK	3,47 %	3,35 %	155471,44
			S	1,85 %	1,75 %	88660,88
			∅	2,66 %	2,55 %	122066,16
		3	KK	1,21 %	1,17 %	62659,43
			S	-1,41 %	-1,42 %	-72428,62
			∅	-0,10 %	-0,13 %	-4884,59
		verstreut	KK	-2,06 %	-2,02 %	112053,24
			S	1,06 %	0,96 %	51587,60
			∅	-0,50 %	-0,53 %	-30232,82
				0,69 %	0,63 %	28982,92
200	10	2	KK	1,35 %	1,25 %	117224,72
			S	3,48 %	3,35 %	300232,98
			∅	2,42 %	2,30 %	208728,85
		3	KK	3,04 %	2,94 %	291946,63
			S	3,60 %	3,50 %	342691,99
			∅	3,32 %	3,22 %	317319,31
		verstreut	KK	2,62 %	2,52 %	238031,31
			S	2,86 %	2,76 %	293413,99
			∅	2,74 %	2,64 %	265722,65
				2,83 %	2,72 %	263923,60

Kapitel 13

Modellierung der unteren Schranken zur Bestimmung der Güte von heuristischen Lösungen von LRP-Modellen

13.1 Allgemeines

Sinn und Zweck der Bestimmung einer unteren Schranke (= *LowerBound (LB)*)¹⁸² für ein Minimierungsproblem ist die Ermittlung eines Vergleichswerts zur Messung der Güte einer zulässigen, aber nicht optimalen Lösung (= *UpperBound (UB)*)¹⁸³. Eine LB wird insbesondere dann notwendig, wenn große Probleminstanzen eine optimale Lösung, etwa durch Anwendung des Simplex-Algorithmus¹⁸⁴ oder aber durch Verfahren wie dem Branch & Bound¹⁸⁵, nicht bzw. in nicht vertretbarer Zeit ermöglichen.

Das kapazitierte Location Routing Problem (**LRP**), welches als eine Integration des Vehicle Routing Problems (**VRP**) und des Location Allocation Problems (**LAP**) verstanden wird, stellt ein solches – NP schweres – Problem dar. Bereits Instanzen mit mehr als 10 Kunden und mehr als 3 Depots machen eine optimale Lösung in vertretbarer Zeit (... Stunden) nicht realisierbar. Abhilfe schaffen heuristische Lösungsverfahren. Sie ermöglichen eine erhebliche Reduktion der Rechenzeit einerseits, was die Akzeptanz suboptimaler Ergebnisse andererseits legitimiert.

Bei Minimierungsproblemen stellen heuristisch ermittelte Ergebnisse obere Schranken dar. Um eine Aussage über die Qualität der heuristischen Lösung machen zu können, wird die ermittelte obere Schranke (UB) in Relation zur unteren Schranke (LB) gesetzt. Zwingende Voraussetzung für eine zutreffende Beurteilung ist jedoch, dass die ermittelte untere

¹⁸²Vgl. Serafini P. (1985): S.101 [86]

¹⁸³Vgl. Heuer J. (2013): S.75-94 [46]; Vahrenkamp R. et al. (2007): S.49 [93]

¹⁸⁴Vgl. Vahrenkamp R. et al. (2007): S.110 [93]

¹⁸⁵Vgl. Vahrenkamp R. et al. (2007): S.50 [93]

Schranke eine „gute“ untere Schranke darstellt, da jede „schlechte“ untere Schranke das heuristisch ermittelte Ergebnis erheblich verschlechtern kann. Ein fiktives Beispiel soll dies verdeutlichen. Angenommen, man entwickelt eine Heuristik, von der man nicht weiß, dass diese im Durchschnitt nur 4% vom optimalen Zielfunktionswert abweicht. Und angenommen, man konstruiert eine LB, von der man nicht weiß, dass diese im Durchschnitt um 16% vom optimalen Zielfunktionswert abweicht. Dann ergibt dies einen Gap von 20% und verschwämmt die eigentliche Qualitätsgüte der Heuristik. Dieses Beispiel macht somit deutlich, wie bedeutsam eine qualitativ hochwertige LB für die Beurteilung einer Heuristik ist.

Wie bewertet man aber, ob die ermittelte LB „gut“ ist? Dies ist äußerst schwierig, da man zumeist für große Instanzen den optimalen Zielfunktionswert nicht kennt. Schlussfolgerung wäre, dass man sich mit einer „guten“ oberen Schranke behilft. Dies führt aber zu einer Situation, in der sich sozusagen „die Katze selbst in den Schwanz beißt“. Dieses Problem kann in seinem Ausmaß nur dadurch begrenzt werden, indem man die Lücke zwischen oberer und unterer Schranke generell zu verkleinern versucht. Hierzu müssen beide Schranken gut sein.

Die Reduzierung der Größe dieses Gaps ist neben dem wissenschaftlichen Fortschritt und der Fähigkeit, ein Verständnis für Probleme entwickeln und gute Lösungsansätze finden zu können, auch davon abhängig, welcher Gap-Wert akzeptabel ist. Ein allgemein gültiger und wissenschaftlich akzeptierter Richtwert existiert nicht. Es sollte aber trivial sein, dass durchschnittliche Gapgrößen in einem einstelligen Prozentbereich in der Wissenschaft eine breitere Akzeptanz als Werte in einem zweistelligen Prozentbereich finden.

Dem Leser wird bereits an dieser Stelle auffallen, dass die Bestimmung der Güte von zulässigen, aber nicht optimalen Lösungswerten oft Auslegungssache ist und von der Interpretation des Betrachters abhängt. Wie können aber bei Minimierungsproblemen untere Schranken bestimmt werden?

Allgemeine Verfahren zu Bestimmung einer LB bei Minimierungsproblemen

Allgemeingültigen Charakter besitzt der Sachverhalt, dass eine untere Schranke optimal bestimmt werden muss, da sonst eine heuristisch ermittelte Schranke das oben beschriebene Qualitätsbewertungsproblem auf die Bestimmung dieser LB projiziert¹⁸⁶. Zudem kann durch eine heuristische LB-Bestimmung nicht gewährleistet werden, dass die ermittelte untere Schranke auch tatsächlich eine untere Schranke ist.

Die Idee zur optimalen Bestimmung einer unteren Schranke ist unabhängig vom betrachteten mathematischen Problem stets gleich. Man relaxiert das betrachtete Problem, d.h. man erweitert den Lösungsraum durch Auflockern von Restriktionen und ermöglicht so

¹⁸⁶Bei einer heuristischen Bestimmung der LB bräuchte man nämlich neben der oberen Schranke eine weitere untere Schranke für die Festlegung ihrer Qualität

– im Falle eines Minimierungsproblems – kleinere (und somit bessere) Zielfunktionswerte, die aber in der Regel zu einem unzulässigen Ergebnis führen. Diese Methodik lässt bereits den Trade-Off zwischen Qualität und Rechenzeit zur Bestimmung einer unteren Schranke erahnen. Je mehr Restriktionen aufgelockert werden, desto geringer ist die Rechenzeit zu ihrer Bestimmung, desto weiter ist aber auch ihre Entfernung zum Optimum. Analog führt ein vermindertes Auflockern von Restriktionen durchaus zu höheren Rechenzeiten, allerdings auch zu größeren Zielfunktionswerten und somit zu einer genaueren Aussage über die Qualität einer oberen Schranke.

Das Relaxieren von Problemen lässt sich zwei Klassen zuordnen, in modellmodifizierende Verfahren und in problemmodifizierende Verfahren¹⁸⁷.

Modellmodifizierende Verfahren sind Relaxationen, die an der formalen, mathematischen Darstellung des Problems ansetzen und diese verändern ohne das eigentliche Problem zu verändern oder zu spezialisieren¹⁸⁸. Hierunter fallen als wichtigste Relaxationsmöglichkeiten die LP-Relaxation als das Weglassen der Ganzzahligkeitsbedingung, die Lagrange-Relaxation als das Umlagern von Restriktionen in den Zielfunktionsterm und deren Bewertung mit einem Strafkoeffizienten, das Weglassen von Nebenbedingungen oder die Surrogate-Relaxation¹⁸⁹.

Problemmodifizierende Verfahren zeichnen sich dadurch aus, dass sie zu einer Transformation des Gesamtproblems führen. Ein Beispiel hierfür liefert die Bestimmung eines minimalen 1-Baums als untere Schranke für ein symmetrisches Travelling Salesman Problem (**TSP**) oder die optimale Lösung eines TSP, deren Zielfunktionswert eine LB für ein VRP dient.

Das erste Beispiel kann als „verändernd“ verstanden werden, da es das eigentliche Problem (TSP) durch ein anderes Problem mit anderer Zielsetzung (minimaler 1-Baum) – jedoch ähnlicher Problemstruktur – ersetzt.

Das zweite Beispiel kann als „spezialisierend“ interpretiert werden, da TSP als ein Spezialfall des VRP verstanden werden kann, bei dem keine Fahrzeugkapazitäten existieren und lediglich ein Fahrzeug benutzt wird.

An dieser Stelle ist anzumerken, dass die oben beschriebenen Verfahrensarten nicht einander ausschließen müssen. So kann durchaus eine verstärkte Relaxation des VRP erfolgen, indem das für die untere Schranke optimal zu lösende TSP durch Weglassen der Restriktionen zur Verhinderung von Kurzzyklen ebenfalls relaxiert wird. Auch kann ein veränderndes problemmodifizierendes Verfahren gleichzeitig ein spezialisierendes Verfahren sein. Die Grenzen sind fließend und es können unterschiedliche Mischvarianten existieren.

¹⁸⁷Meinung und Bezeichnung der Klassen durch den Autor

¹⁸⁸Zu den Begriffen „verändern“ oder „spezialisieren“ s. Abschnitt zu den problemmodifizierenden Verfahren

¹⁸⁹Vgl. Domschke W. et al. (2005): S.135-136 [30]

Diese Einteilung soll zumindest ein grobes Verständnis für die grundlegenden Möglichkeiten zur Ermittlung einer unteren Schranke für Minimierungsprobleme schaffen.

13.2 Untere Schranken für das klassische, kapazitierte LRP in der Literatur

Die Literatur liefert sehr wenige beziehungsweise Ansätze für die Bestimmung einer unteren Schranke für das klassische kapazitierte Location Routing Problem. Arbeiten, in denen explizit die Bestimmung einer LB erwähnt und erläutert wird, sind die von Albareda-Sambola¹⁹⁰, Barreto¹⁹¹ und Belenguer et al.¹⁹², die in den folgenden Abschnitten durchleuchtet werden¹⁹³.

13.2.1 Untere Schranke 1 (Lower Bound 1) - Dekomposition des LRP in TSP und KP

Albareda-Sambola beschäftigt sich im Rahmen ihrer Dissertation mit einer LRP-Variante, die von der untersuchten kapazitierten Variante dahingehend abweicht, dass die verwendeten Fahrzeuge keine Kapazitätsbeschränkung aufweisen und die Anzahl der aus einem eröffneten Depot führenden Routen auf Eins beschränkt ist. Für diese Problemvariante liefert sie eine untere Schranke, die den problemmodifizierenden Verfahren zugeordnet werden kann. Sie zerlegt das Problem in zwei Teilprobleme, die sie aus der Struktur des Ausgangsproblems ableitet – ein asymmetrisches TSP (**ATSP**) und ein Knapsackproblem (**KP**). Im ersten Schritt wird das Routingproblem durch das Lösen eines asymmetrischen TSP angegangen, um Routingkosten zu ermitteln. Das TSP wird für einen Graphen durchgeführt, der die gesamte Knotenmenge enthält, d.h. sämtliche Kunden und alle potentiellen Standorte, die Bestandteil der optimalen Lösung sein können. Hierfür wird die Distanzmatrix dahingehend modifiziert, dass Distanzen zwischen zwei Depots und Verbindungen, die vom Kunden zum Depot gerichtet sind, mit Null bewertet werden. Die ermittelte kürzeste Rundreise weist eine große Ähnlichkeit mit der Routenstruktur des LRP auf – wie sie Abbildung (13.1) darstellt – und da die Verbindungen mit der Reihenfolge Kunde-Depot, die Bestandteil der kürzesten Rundreise sind, nicht in den Zielfunktionswert eingehen, stellt die ermittelte kürzeste Rundreise eine untere Schranke für die Routingkosten dar.

¹⁹⁰Vgl. Albareda-Sambola M. (2003): S.24-25 [4]

¹⁹¹Vgl. Barreto S.S. (2004): S.140-144 [10]

¹⁹²Vgl. Belenguer J.-M. et al. (2011): S.931-941 [11]

¹⁹³An dieser Stelle sei bereits angemerkt, dass nach persönlichem Wissensstand keine LBs für das dynamische bzw. periodische LRP existieren

Im zweiten Schritt wird ein Knapsackproblem¹⁹⁴ gelöst, das eine untere Schranke für die Eröffnungskosten der Depots liefert. Die Eröffnungskosten werden durch Hinzunahme der kürzesten, aus dem betrachteten Depot zu einem Kunden existierenden Verbindung erweitert. Mit dieser Kostenerweiterung wird die im Vorfeld nicht berücksichtigte Endverbindung vom Kunden zum Depot kompensiert. Durch Hinzunahme der kürzesten Entfernung liefert der optimale Zielfunktionswert des Knapsackproblems, addiert mit dem Zielfunktionswert des ATSPs eine untere Schranke, die für Instanzen mit 10, 20 oder 30 Kunden und 5 bzw. 10 Depots zu durchschnittlichen Abweichungen in Höhe von 0,902% führt¹⁹⁵.

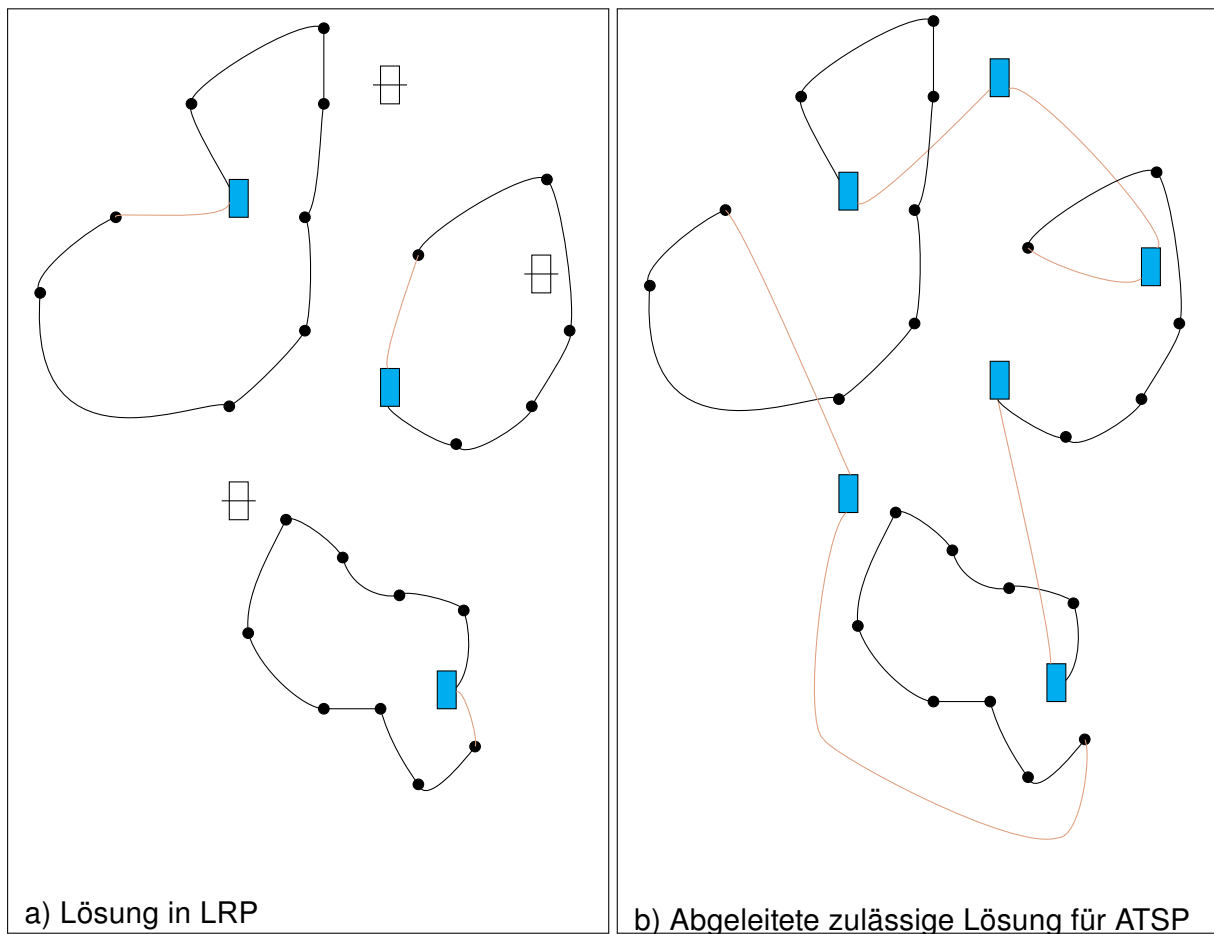


Abbildung 13.1: Ähnlichkeit in Routingstruktur¹⁹⁶

¹⁹⁴Vgl. Kellerer H. et al. (2004): S.1f [51]

¹⁹⁵Vgl. Albareda-Sambola M. (2003): S.27-33 [4]

¹⁹⁶Vgl. Albareda-Sambola M. (2003): S.24 [4]

13.2.2 Untere Schranke 2 (Lower Bound 2) - Zeilengenerierungsverfahren

Barreto beschäftigt sich ebenfalls im Rahmen seiner Dissertation mit dem klassischen LRP. In Anlehnung an Laporte¹⁹⁷ formuliert er das klassische ungerichtete LRP unter anderem mit maximal zwei Indizes und liefert eine Schranke durch ein Zeilengenerierungsverfahren (ZG-Verfahren)¹⁹⁸. In seinem Modell sind jedoch keine Fixkosten für Fahrzeuge integriert.

	Instanz	CSR	CMSN	Gap (%)	CSMS	VAR (%)
1	Gaskell67-21x5	424.9	435.9	2.59	436	0.02
2	Gaskell67-22x5	585.1	591.5	1.09	726.5	22.82
3	Gaskell67-29x5	512.1	512.1	0.00	529.4	3.38
4	Gaskell67-32x5	556.5	571.7	2.73	642.1	12.31
5	Gaskell67-32x5	504.3	511.4	1.41	577.4	12.91
6	Gaskell67-36x5	460.4	470.7	2.24	492.2	4.57
7	Christofides69-50x5	549.4	582.7	6.06	653.9	12.22
8	Christofides69-75x10	744.7	886.3	19.01	952.1	7.42
9	Christofides69-100x10	788.6	889.4	12.78	1080.9	21.53
10	Perl83-12x2	204	204	0.00	204	0.00
11	Perl83-55x15	1074.8	1136.2	5.71	1145.5	0.82
12	Perl83-85x7	1568.1	1656.9	5.66	1701	2.66
13	Perl83-318x4		580680.2		625488.5	7.72
14	Perl83-318x4		747619		744381.8	-0.43
15	Min92-27x5	3062	3062	0.00	4015.6	31.14
16	Min92-134x8		6238		7162.7	14.82
17	Daskin95-88x8	356.4	384.9	8.00	591.5	53.68
18	Daskin95-150x10	43406	46642.7	7.46	48722.5	4.46
19	Or76-117x14	12048.4	12474.2	3.53	20563	64.84
Mittelwert				4.89		14.57

Tabelle 13.1: Rechnendauer und Qualität einer unteren Schranke¹⁹⁹

Tabelle (13.1) zeigt die von Barreto im Rahmen der Anwendung des Zeilengenerierungsverfahrens ermittelten Zielfunktionswerte für die unteren Schranken (s. Spalte mit der Beschriftung „CSR“), die heuristisch berechneten Lösungen (s. Spalten mit den Beschriftungen „CMSN“ und „CSMS“), sowie den sich ergebenden Gap. Der Gap bestimmt sich durch

¹⁹⁷Vgl. Laporte G. (1988): S.163-197 [55]

¹⁹⁸Beim Zeilengenerierungsverfahren (engl. *Cutting plane algorithm*) wird im ersten Schritt das Ausgangsproblem durch Weglassen einer oder mehrerer Nebenbedingungen optimal gelöst. Im zweiten Schritt wird erörtert, ob die gefundene optimale Lösung des relaxierten Problems gegen Restriktionen des Ausgangsproblems verstößt. Falls sie dies tut, werden Nebenbedingungen definiert, die die ermittelten Unzulässigkeiten verbieten und das verschärfte Problem wird erneut gelöst. Falls die gefundene Lösung eine für das Ausgangsproblem zulässige Lösung darstellt, ist eine optimale Lösung gefunden. Andernfalls iteriert das Verfahren, bis eine zulässige Lösung gefunden oder aber eine zeitlich festgelegte Rechenzeitgrenze erreicht ist.

¹⁹⁹Vgl. Barreto S. (2004): S.220 [10]

die Formel $(CMSH - CSR)/CSR$. Verglichen mit Albareda-Sambola sind die Instanzen, die Barreto in seiner Rechenstudie verwendet, deutlich größer. Er erzielt einen durchschnittlichen Gap in Höhe von 4,89%. Nachteil des ZG-Verfahrens ist allerdings die lange Rechenzeit. Tabelle (13.2) illustriert die Rechenzeiten für das ZG-Verfahren in Sekunden in der letzten Spalte und zeigt, dass im ungünstigsten Fall – wie etwa für Instanz 8 – die Bestimmung einer unteren Schranke – 3,5 Tage andauert, um einen akzeptablen Wert zu eruieren. Relaxiert werden die Nebenbedingungen zur Verhinderung von Kurzzyklen sowie die Nebenbedingungen zur Unterdrückung einer Kettenbildung²⁰⁰.

	Instanz	Nr. It.	CSR	T(s)
1	Gaskell67-21x5	254	424,9 *	1944
2	Gaskell67-22x5	29	585,1 *	10
3	Gaskell67-29x5	68	512,1 *	128
4	Gaskell67-32x5	994	556,5	47022
5	Gaskell67-32x5	38	504,3 *	24
6	Gaskell67-36x5	142	460,4 *	503
7	Christofides69-50x5	398	549,4	50797
8	Christofides69-75x10	348	744,7	302457
9	Christofides69-100x10	210	788,6	74754
10	Perl83-12x2	11	204 *	2
11	Perl83-55x15	364	1074,8	54238
12	Perl83-85x7	183	1568,1	86330
13	Perl83-318x4	-	-	-
14	Perl83-318x4	-	-	-
15	Min92-27x5	47	3062 *	23,4
16	Min92-134x8	-	-	-
17	Daskin95-88x8	453	356,4	75791
18	Daskin95-150x10	25	43406	3548
19	Or76-117x14	152	12048,4	40728

Tabelle 13.2: Rechenzeit für die Bestimmung einer LB mit dem ZG-Verfahren²⁰¹

13.2.3 Untere Schranke 3 (Lower Bound 3) - Branch-and-Cut-Verfahren²⁰²

*Belenguer J.M. et al.*²⁰³ bzw. *Prodhon* ermitteln untere Schranken für die von ihnen konstruierten Instanzen mithilfe eines Branch-and-Cut Verfahrens und stellen mit einem herausragenden Verhältnis von Rechenzeit zu Rechenqualität den *State of the art* in der Lösung

²⁰⁰Die Restriktion zur Antizipation von Kettenbildung gewährleistet, dass Start- und Endpunkt einer Route stets das gleiche Depot ist.

²⁰¹Vgl. Barreto S. (2004): S.149 [10]

²⁰²Vgl. Zimmermann H.-J. (2008): S.313 [99]

²⁰³Vgl. Belenguer J.-M. et al. (2011): S.931-941 [11]

eines klassischen kapazitierten LRP dar. Instanzen mit 20 Kunden werden in weniger als einer Sekunde optimal gelöst. Instanzen mit 50 und 100 Kunden werden zwar nicht optimal gelöst, allerdings werden innerhalb von maximal 40 Sekunden Ergebnisse erzielt, die einen durchschnittlichen Gap von 2,73% ergeben²⁰⁴.

Wesensmerkmal des Branch-and-Cut Verfahrens ist die Kombination von Zeilengenerierungs- und Branch-and-Bound Verfahren. Folglich werden nicht nur Nebenbedingungen, sondern auch die Ganzzahligkeit von Entscheidungsvariablen relaxiert, was die Rechenzeit erheblich reduziert. Die Relaxation des Ausgangsproblems wird durch die Integration zusätzlicher Nebenbedingungen, die die Rechenzeit unerheblich verlängern, verschärft. Die darauf folgenden Iterationen stellen eine Kombination von Zeilengenerierung und Lösung ganzzahliger Probleme im Sinne eines Branch-and-Bound Verfahrens dar. An dieser Stelle sei angemerkt, dass die in einer Iteration ermittelten Zielfunktionswerte durchaus obere Schranken darstellen können. Belenguer et al. speichern die im Rahmen des Branch-and-Bound Verfahrens besten ermittelten unteren Schranken ab.

13.3 Untere Schranken, die im Rahmen der Forschungsarbeit ermittelt wurden

Das folgende Kapitel geht der Frage nach, inwiefern eine an dem klassischen, kapazitierten LRP orientierte Modifikation der Verfahren von Albareda-Sambola und Barreto – als Verfahren mit relativ geringem Programmieraufwand – die Ermittlung qualitativ geeigneter unterer Schranken ermöglicht. Bei der an Barreto angelehnten Zeilengenerierung soll zudem erörtert werden, inwiefern die Metrik der Distanzen und die Indexierung von Flussvariablen einen Einfluss auf die Rechenqualität hat.

Eine Aussage über die Qualität der unteren Schranken kann insofern getroffen werden, als dass die ermittelten Zielfunktionswerte mit den von Belenguer et al. errechneten LBs und UBs verglichen werden können, da die von Belenguer et al. konstruierten Instanzen in den Rechenstudien verwendet werden.

13.3.1 Untere Schranke nach Albareda-Sambola (LB A)

Konstruktion der LB

Die erste Idee zur Bestimmung einer geeigneten LB ist es, den von Albareda-Sambola ermittelten Ansatz auf das untersuchte klassische LRP zu übertragen. Hierzu werden die von

²⁰⁴Vgl. <http://prodhonc.free.fr/> [107]

Albareda-Sambola vernachlässigten Fahrzeugkapazitäten berücksichtigt und das Verfahren entsprechend um ein drittes Knapsackproblem erweitert, das eigens für die Bestimmung einer LB für die Routenzahl und somit für die fixen Fahrzeugkosten angedacht ist. Da Albareda-Sambola annimmt, dass maximal eine Tour pro Depot zulässig sei, muss dies durch zusätzliche Routingkosten kompensiert werden. Dies geschieht folgendermaßen: ergibt die Lösung des TSP eine Routenzahl, die geringer als die durch das Knapsackproblem ermittelte LB für die Routenzahl ist, d.h. die Differenz (Routenzahl (KP) – Routenzahl (TSP)) positiv ist, so wird diese Differenz mit der kürzesten existierenden Distanz aus der Menge aller Distanzen zwischen Depots und Kunden und mit dem Faktor zwei (Berücksichtigung von Ausfahrt aus und Einfahrt in das Depot) multipliziert und zu den Gesamtkosten addiert. Gleichung (13.1) stellt dies formal dar.

$$(Routenzahl(KP) - Routenzahl(TSP)) \cdot 2 \cdot \min_{(i,j) \in E: i \in Depots, j \in Kunden} c_{ij} \quad (13.1)$$

E stellt die Menge aller existierenden Verbindungen dar. c_{ij} entspricht der Transportentfernung zwischen Knoten i und Knoten j , wobei die Verbindung (i, j) Element von E sein muss. Term (13.1) ist immer dann der ermittelten unteren Schranke hinzuzufügen, wenn die Differenz $(Routenzahl(KP) - Routenzahl(TSP))$ positiv ist.

Für ein besseres Verständnis sei das Verfahren zur Bestimmung von LB A nochmal schematisch dargestellt. Die Parameter und Entscheidungsvariablen entsprechen den Bezeichnungen, die in der Tabelle (10.3) beschrieben sind.

Verfahren zur Bestimmung von LB A

A LB für Routingkosten

1. Transformation der Distanzmatrix

→ Transformation sämtlicher Transportentfernungen c_{ij} in \hat{c}_{ij}

$$\hat{c}_{ij} = \begin{cases} c_{ij}, & \text{falls } i \in Depots, j \in Kunden \text{ oder } i, j \in Kunden \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

2. Optimale Lösung des TSP

B LB für fixe Standortkosten

3. Transformation der fixen Standortkosten

$$\hat{U}_i = U_i + \min_{(i,j) \in E: j \in Kunden} c_{ij}, \quad \forall i \in Depots$$

4. Optimale Lösung des KP für Standorte

Minimiere:

$$\sum_{i \in Depots} \hat{f}_i y_i \quad (13.2)$$

u.d.N.

$$\sum_i W_i y_i \geq \sum_j d_j \quad (13.3)$$

$$y_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in Depots$$

C LB für fixe Fahrzeugkosten

5. Algorithmische Bestimmung der effektiv nutzbaren Kapazität

a). Sortierung der Kunden nach aufsteigender Nachfragemenge $\{d_i, d_{i+1}, \dots, d_{n-1}, d_n\}$

wobei $d_i \leq d_{i+1} \leq \dots \leq d_n$

b). Setze Fahrzeugresidualkapazität = Fahrzeugkapazität

c). Setze $i = 1$

d). Falls Fahrzeugresidualkapazität $-d_i \leq 0$, gehe zu e)., sonst zu f).

e). Setze Fahrzeugresidualkapazität = Fahrzeugresidualkapazität $-d_i$, setze $i = i + 1$ und wiederhole d).

f). Setze effektive Kapazität = Fahrzeugkapazität - Fahrzeugresidualkapazität

g). Setze $LB_{\text{fixe Fahrzeugkosten}} = F \cdot \frac{\sum_j d_j}{\text{effektive Kapazität}}$

D Zusammenfassung der Lösungen aus A, B und C

Addiere die Lösungen unter 2, 4 und 5 zur LB A.

Falls

$$\frac{\sum_j d_j}{\text{effektive Kapazität}} > \sum_{i \in Depots: y_i=1} y_i \quad (13.4)$$

dann addiere Term (13.1) zu den Ergebnissen unter 2, 4 und 5.

Rechenstudie

Tabelle (13.3) beinhaltet die Abweichungen der LB A von dem von Belenguer et al. besten bekannten ZF-Wert für jede Instanz und die zu ihrer Errechnung benötigten Rechenzeiten.

Die LB ist durch einen prozentualen GAP-Wert quantifiziert, der durch den Quotienten

$$\frac{LB - Prodhon}{Prodhon} \quad (13.5)$$

berechnet wird.

Spalte 1 stellt den von Belenguer et al. instanzspezifisch besten gefundenen Zielfunktionswert dar. Dieser ist für Instanzen mit einer Größe von 20 Kunden optimal. Die besten von Belenguer et al. gefundenen unteren Schranken zeigt die Spalte mit der Überschrift *Prodhon_LB*. Die Spalte mit der Bezeichnung „LB“ bildet den instanzspezifisch ermittelten Zielfunktionswert für die Lower Bound A ab. Die absolute Abweichung (=LB-Prodhon) zum besten Zielfunktionswert ist in der vierten, die prozentuale Abweichung ($= \frac{LB-Prodhon}{Prodhon}$) in der fünften Spalte festgehalten. Die Rechenzeit zur Ermittlung der unteren Schranke ist unter der Bezeichnung „Zeit in Sekunden“ aufgelistet. Die letzten fünf Spalten liefern eine detaillierte Angabe zur Zusammensetzung des ermittelten Ergebnisses. Die Gesamtentfernung gleicht der kürzesten gefundenen Rundreise. Die Standortkosten entsprechen den modifizierten Standortkosten, die unter „Konstruktion der LB“ beschrieben sind und durch die Öffnung der Depots entstehen, die in der letzten Spalte aufgelistet sind. In der darauffolgenden Spalte folgen die variablen Fahrzeugkosten und der Betrag der Zusatzentfernung, um den das TSP aufgewertet wird.

Die prozentualen GAP-Werte für LB A sind zudem in Abbildung (13.2) nochmal mithilfe eines Graphen in blauer Farbe dargestellt. Der graue Verlauf illustriert die prozentualen GAP-Werte, die von Belenguer et al. eruiert wurden. Für Instanzen mit 200 Kunden existieren keine GAP-Werte.

Tabelle (13.4) zeigt den durchschnittlichen prozentualen GAP-Wert für Instanzen mit einer Größe von 20, 50, 100 und 200 Kunden, die sich mittels der Formel $\frac{\sum_{i \in I} (\frac{UB_i - LB_i}{LB_i})}{I}$ ergeben²⁰⁵. Die erste Zeile quantifiziert den durchschnittlichen GAP-Wert für die Instanzen mit 20, 50 und 100 Kunden. Instanzen mit 200 Kunden sind hierbei nicht inkludiert, da hierzu keine Vergleichswerte von Belenguer et al. existieren. Die dritte Spalte beinhaltet den Belenguer et al. ermittelten durchschnittlichen prozentualen GAP-Wert zum Vergleich.

²⁰⁵ I bedeutet hier die Menge der Instanzen

13. Kapitel: Modellierung der unteren Schranken zur Bestimmung der Güte von heuristischen Lösungen von LRP-Modellen

Prodhon	Prodhon_LB	LB	GAP_A (absolut)	GAP_A (in %)	Zeit in Sek.	Gesamtentf.	Standortk.	Fahrzeugk.	Zusatzentf.	Öffnung
coord20-5-1	54793	41438	-13355	-32,23%	0,531	11823	22486	5000	2129	23,24,25
coord20-5-1b	39104	34756	-4348	-12,51%	0,188	13331	17027	3000	1398	23,24
coord20-5-2	48908	41385	-7523	-18,18%	0,405	10578	24001	5000	1806	22,24,25
coord20-5-2b	37542	32552	-4990	-15,33%	0,281	13220	15508	3000	824	22,24
coord50-5-1	90111	62522	-27589	-44,13%	3,168	25415	15608	11000	10499	51,53
coord50-5-1b	63242	50218	-13024	-25,93%	3,151	25415	15608	6000	3195	51,53
coord50-5-2	88298	72785	-15513	-21,31%	0,968	19471	30340	12000	10974	52,53,55
coord50-5-2b	67340	58495	-8845	-15,12%	0,858	19471	30340	6000	2684	52,53,55
coord50-5-2BIS	84055	63483	-20572	-32,41%		12335	19725	11000	20423	52,53,55
coord50-5-2bBIS	51822	41466	-10356	-24,97%		11464	21379	6000	2623	53,54,55
coord50-5-3	86203	58019	-28184	-48,58%	13,726	23776	12105	11000	11138	54,55
coord50-5-3b	61830	45875	-15955	-34,78%	13,646	23776	12105	6000	3994	54,55
coord100-5-1	275993	219982	-56011	-25,46%	12,2	34675	133531	23000	28776	101,102,105
coord100-5-1b	214392	207037	-8134	-15,10%	12,12	34675	133531	11000	7052	101,102,105
coord100-5-2	194598	186917	-23015	-13,41%	51,259	28972	98427	23000	21184	104,105
coord100-5-2b	157173	153827	-12469	-8,62%	51,789	28972	98427	11000	6305	104,105
coord100-5-3	200246	164038	-36208	-22,07%	50,639	29538	87105	23000	24395	102,104
coord100-5-3b	152586	138667	-13919	-10,04%	50,641	29538	87105	11000	11024	102,104
coord100-10-1	290429	231865	-58564	-25,26%	25,285	34791	155465	23000	18609	104,105,110
coord100-10-1b	234641	206714	-27927	-13,51%	25,691	34791	155465	11000	5458	104,105,110
coord100-10-2	244265	226905	-33563	-15,93%	571,151	28025	143335	22000	17342	101,105,106
coord100-10-2b	203988	194628	-15754	-8,37%	570,596	28025	143335	11000	5874	101,105,106
coord100-10-3	253344	222353	-51965	-25,80%	46,784	28139	137065	22000	14175	103,104,110
coord100-10-3b	204597	189309	-24185	-13,41%	47,453	28139	137065	11000	4208	103,104,110
coord200-10-1	479425	479425	-114115	-31,24%	136,626	48833	236825	45000	34652	202,204,206
coord200-10-1b	378773	316205	-62568	-19,79%	136,035	48833	236825	21000	9547	202,204,206
coord200-10-2	450468	390596	-59872	-15,33%	98,215	36596	276933	45000	32067	204,208,210
coord200-10-2b	374435	344315	-30120	-8,75%	98,483	36596	276933	21000	9786	204,208,210
coord200-10-3	472898	472898	-115042	-32,15%	3155,78	42691	235172	44000	35993	204,206,210
coord200-10-3b	364178	309623	-54555	-17,62%	3150,35	42691	235172	21000	10760	204,206,210

Table 13.3: Rechenstudie zur LB A

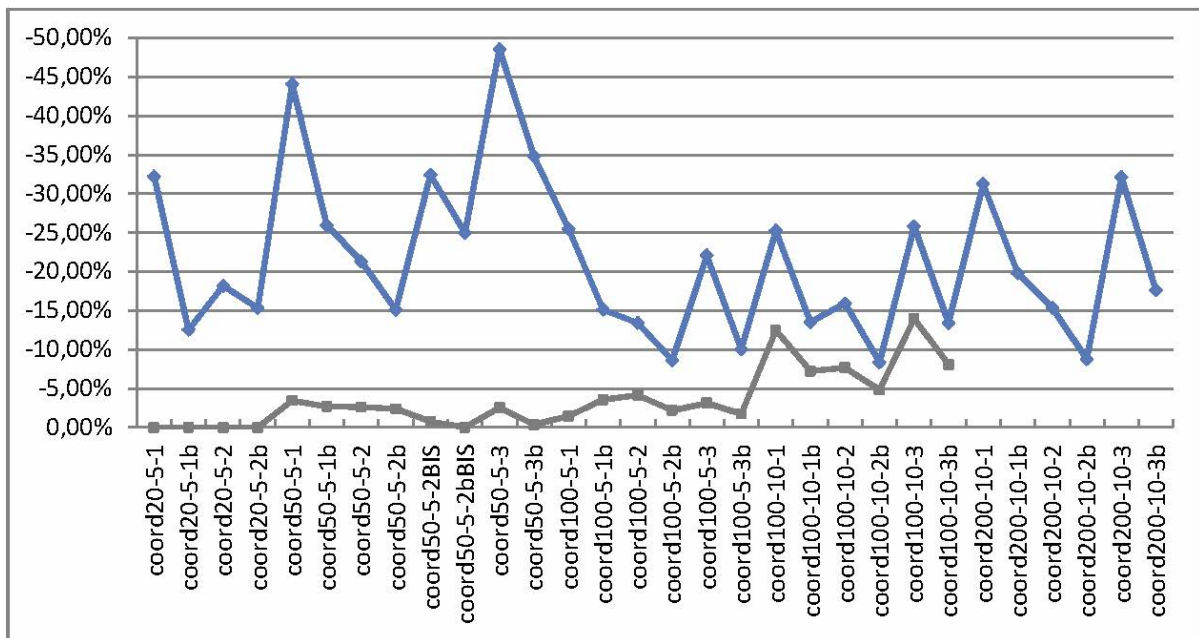


Abbildung 13.2: Instanzspezifischer Verlauf des GAP-Werts für LB A (in blau) und für die LB nach Belenguer et al. (in grau) (Eigene Darstellung)

Durchschnittliche untere Schranken nach Instanzen	LB A	LB nach Belenguer et al.
∅ LB	-21,77 %	-3,54 %
∅ LB 20	-19,56 %	0,00 %
∅ LB 50	-30,90 %	-1,84 %
∅ LB 100	-16,42 %	-5,86 %
∅ LB 200	-20,81 %	-

Tabelle 13.4: Instanzspezifische durchschnittliche GAP-Werte für LB A

13.3.2 Dekomposition - Lower Bound

Konstruktion der LB

Charakteristisch für die Generierung dieser LB ist die Grundidee, dass das Hauptproblem zerlegt wird in seine Teilprobleme Location Allocation Problem (**LAP**) und Vehicle Routing Problem (**VRP**) bzw. Travelling Salesman Problem (**TSP**)²⁰⁶ und diese bzw. ihre Relaxationen hintereinander gelöst werden. Entsprechend der beiden Dekompositionsmöglichkeiten

²⁰⁶Rundreiseproblem

in VRP und TSP ergeben sich bereits zwei Varianten. Unterschiedliche modellmodifizierende Relaxationsverfahren eröffnen hier natürlich ein weites Feld von Subvarianten, von denen jedoch nur die Implementierten beschrieben werden.

Allen Varianten ist gleich, dass das LAP das erste zu lösende Problem bildet. Die Bestimmung der Standortkosten wird – unabhängig von der Routenbildung – zuerst angegangen. Hierfür wird der vorliegende Graph mit der Knotenmenge $V = S \cup J$, der eine Vereinigung einer Submenge potentieller Depotstandorte S und der Menge sämtlicher Kundenpunkte J darstellt, betrachtet. Jede Submenge stellt eine Menge zulässiger Depotkombinationen dar. Zulässig bedeutet in diesem Fall, dass jede dieser Submengen eine Kombination von Depots aufweisen muss, deren Kapazitätsgrenzen ausreichen, um die Gesamtnachfrage $\sum_j d_j$ zu befriedigen. Für jede zulässige Submenge von Depots ergibt sich ein unterschiedlicher Graph, auf den das LAP angewendet wird. Die Transportentfernung geht mit einer einfachen Bewertung in den Zielfunktionsterm ein. Auf eine doppelte Bewertung wird bewusst verzichtet, da dies nur dann von Vorteil wäre, wenn Pendeltouren zu jedem Kunden stattfinden sollten. Eine optimale Lösung bei **LTL**²⁰⁷-Transporten wird aber höchstwahrscheinlich nicht vollständig aus Pendeltouren bestehen. Die Restriktionen dienen der Einhaltung von Depotkapazitätsgrenzen und garantieren eine Nachfragebefriedigung sämtlicher Kunden. Das LAP wird optimal gelöst. Die Menge der Kunden, die einem Depot zugeordnet werden sollen, soll hier als Kundengruppe bezeichnet werden. Die Anzahl der Kundengruppen entspricht folglich der Anzahl der geöffneten Depots.

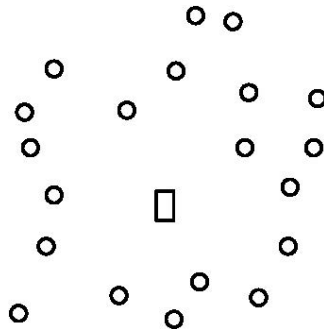


Abbildung 13.3: Graph mit einem Depot und 20 Kundenknoten (Eigene Darstellung)

Die weitere Vorgehensweise nach dem Lösen des LAP ist vom Prinzip gleich. Jede Kundengruppe bildet ein für sich eigenes Tourenplanungssubproblem. Also unabhängig davon, ob ein VRP oder ein TSP im Anschluss an das LAP gelöst wird – es wird für jede durch das LAP ermittelte Kundengruppe ein separates Problem gelöst. Dies ist auch der Grund bevor nun die beiden Varianten VRP und TSP separat voneinander erläutert werden. An

²⁰⁷LTL steht für Less Than Truckload und meint den typischen Sammelladungsverkehr, in dem gewöhnlich der Ladungsträger Sendungen mehrerer Versender bzw. Empfänger beinhaltet.

dieser Stelle erfolgt nun die oben bereits angedeutete Begründung, weshalb für jede zulässige Teilmenge von Depots ein LAP gelöst und für jede Kundengruppe dieser Lösungen ein separates VRP bzw. TSP gelöst wird. Dahinter steht folgende Überlegungskette: Angenommen, für den in Abbildung (13.3) dargestellten Graphen ist ein VRP zu lösen. Eine mögliche optimale Lösung könnte so wie in der Abbildung (13.4) und Abbildung (13.5) in dargestellten Graphen aussehen.

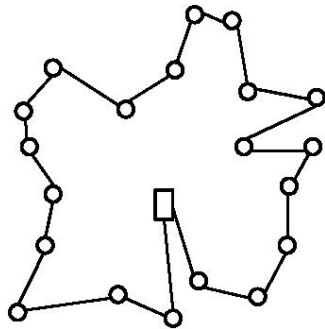


Abbildung 13.4: Graph nach optimaler Lösung des TSP (Eigene Darstellung)

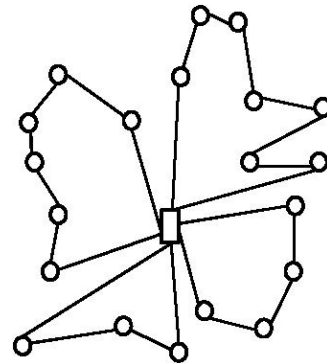


Abbildung 13.5: Graph nach optimaler Lösung des VRP (Eigene Darstellung)

13.3.3 Untere Schranken nach Zeilengenerierungsverfahren (LB B)

Das Zeilengenerierungsverfahren (engl. *cutting plane algorithm*) stellt ein Schnittebenenverfahren dar. Im ersten Schritt wird das LRP durch Weglassen von Restriktionen relaxiert. Hierbei handelt es sich in der Regel um Nebenbedingungen zur Verhinderung von Kurzzyklen. Im zweiten Schritt wird das relaxierte Problem gelöst und es wird geprüft, ob das Ergebnis des relaxierten Problems gegen Restriktionen des Ausgangsproblems verstößt. Im Falle eines Verstoßes wird eine Zeile (=Nebenbedingung) generiert, die die für das Ausgangsproblem unzulässige Lösung verhindert. Falls das Ergebnis des relaxierten Problems zulässig für das Ausgangsproblem ist, ist eine optimale Lösung gefunden und das Verfahren endet. Andernfalls folgt in einem dritten Schritt die optimale Lösung des um die generierten Zeilen erweiterten Problems und Schritt zwei beginnt erneut. Das Zeilengenerierungsverfahren ist ein iteratives Verfahren, das erst endet, sobald der optimale Zielfunktionswert für das Ausgangsproblem zulässig oder eine vorgegebene Rechenzeitgrenze erreicht ist.

Gegenstand dieses Kapitels ist unter anderem die Entwicklung von zwei alternativen Zeilengenerierungsverfahren und deren Vergleich hinsichtlich des Verhältnisses von Rechenqualität und Rechenzeit. Beide Alternativen unterscheiden sich im Wesentlichen durch

die Anzahl der Indizes, die eine Flussvariable²⁰⁸ kennzeichnen, und die Symmetrie der Distanzen. Die erste Variante ist ein Zeilengenerierungsverfahren, das auf das statische LRP in Form eines Modells mit 3 Indizes und asymmetrischen Distanzen abstellt, während ein Modell mit 2 Indizes und symmetrisch unterstellten Distanzen Grundlage für die zweite Variante ist. Beide Varianten werden im Folgenden erklärt und die Ergebnisse der Rechenstudien dargestellt.

LB B1 - Zeilengenerierungsverfahren bei 3 Indizes und asymmetrischen Distanzen

Lower Bound B1 wird durch ein Zeilengenerierungsverfahren ermittelt, das auf ein Modell mit Flussvariablen mit drei Indizes ausgelegt ist²⁰⁹. Mit der Variable x_{ijk} wird festgelegt, mit welchem Fahrzeug k die Verbindung von i nach j befahren wird. Eine Asymmetrie von Distanzen bedeutet, dass eine Entfernung von Knoten i zum Knoten j nicht zwingend der Länge des Rückwegs von Knoten j nach Knoten i entsprechen muss.

Das Zeilengenerierungsverfahren wird auf das LRP - Modell angewandt und ist im folgenden Abschnitt schematisch dargestellt. Das Ausgangsproblem wird relaxiert, indem die Bedingung zur Verhinderung von Subtours (s. Ungleichung (13.11)) entfällt. Als Rechenzeitgrenze dient eine Rechendauer von 7200 Sekunden (= 2 Stunden).

Algorithmus ZG-Verfahren bei 3 Indizes und asymmetrischen Distanzen:

1. Relaxation des Ausgangsproblems (Entfernung von (13.11))
2. Löse das relaxierte Problem
Falls das Ergebnis unter 2. Kurzzyklen enthält und das Verfahren weniger als 2 Stunden andauert, dann gehe zu Schritt 3.
Falls das Ergebnis unter 2. Kurzzyklen enthält und das Verfahren länger als 2 Stunden andauert, dann gehe zu Schritt 4.
Falls das Ergebnis unter 2. keine Kurzzyklen beinhaltet, dann gehe zu Schritt 4.
3. Füge Restriktionen zur Verhinderung der unter 2. gefundenen Kurzzyklen ein und gehe zu Schritt 2.
4. Beende das Zeilengenerierungsverfahren.

²⁰⁸Als Flussvariable wird hier die Entscheidungsvariable bezeichnet, die eine Auskunft darüber gibt, welche Kanten bzw. Pfeile von einem Fahrzeug befahren werden.

²⁰⁹Vgl. Belenguer J.-M. et al. (2011): S.931-941 [11]

LRP-Modell

Entscheidungsvariablen

- $x_{ijk} = 1$, falls die Verbindung (i, j) mit dem Fahrzeug k befahren wird
 $= 0$, sonst
 $y_i = 1$, falls Depot i errichtet und betrieben wird
 $= 0$, sonst
 $f_{ij} = 1$, falls Kunde j Depot i zugeordnet wird
 $= 0$, sonst

Parameter:

- V Menge aller Knoten, d.h. eine Vereinigung aus der Menge aller Depots I und der Menge sämtlicher Kunden J
 I Menge aller Depots
 J Menge aller Kunden
 K Menge aller Fahrzeuge (homogene Fahrzeugflotte)
 c_{ij} Fahrkosten zwischen i und j
 O_i Kosten der Eröffnung des Depots $i \in I$
 W_i Kapazität des Depots $i \in I$
 d_j Nachfrage des Kunden j
 Q Kapazität des Fahrzeugs $k \in K$
 F Fixkosten für die Nutzung des Fahrzeugs $k \in K$
 S Teilmenge der Menge aller Kunden $S \subseteq J$

Zielfunktion:

$$\text{Min} \quad \sum_{i \in I} O_i y_i + \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} c_{ij} x_{ijk} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} F x_{ijk} \quad (13.6)$$

u.d.N.:

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in V} x_{ijk} = 1, \quad \forall j \in J \quad (13.7)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{i \in V} d_j x_{ijk} \leq Q, \quad \forall k \in K \quad (13.8)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ijk} - \sum_{j \in V} x_{jik} = 0, \quad \forall k \in K, \quad \forall i \in V \quad (13.9)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ijk} \leq 1, \quad \forall k \in K \quad (13.10)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ijk} \leq |S| - 1, \quad \forall S \subseteq J, \quad \forall k \in K \quad (13.11)$$

$$\sum_{u \in J} x_{iuk} + \sum_{u \in V \setminus \{j\}} x_{ujk} \leq 1 + f_{ij}, \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J, \quad \forall k \in K \quad (13.12)$$

$$\sum_{j \in J} d_j f_{ij} \leq W_i y_i, \quad \forall i \in I \quad (13.13)$$

$$\sum_{j \in J} x_{jik} - \sum_{j \in J} x_{ijk} = 0, \quad \forall k \in K, \quad \forall i \in I \quad (13.14)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in V, \quad \forall j \in V, \quad \forall k \in K \quad (13.15)$$

$$y_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I \quad (13.16)$$

$$f_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J \quad (13.17)$$

Rechenstudie ZG-Verfahren bei 3 Indizes und asymmetrischen Distanzen:

Aufgrund inakzeptabler unterer Schranken wurde die Rechenzeitgrenze für das Zeilengenerierungsverfahren bei 3 Indizes und asymmetrischen Distanzen von 7200 Sekunden erhöht. Dennoch: die Rechenstudie zeigt, dass bereits bei kleinen Instanzen (20 Kunden und 5 Depots) nach durchschnittlich etwa 24 Stunden Rechenzeit qualitativ mangelhafte untere Schranken mit zweistelligem GAP-Wert erzielt werden. Bei Instanzen mit mindestens 50 Kunden kommt es zu einem Abbruch des Zeilengenerierungsverfahrens aufgrund eines Speicherplatzmangels von AMPL, sodass für diese Instanzen keine Lower Bounds ermittelt wurden. Es wird jedoch vermutet, dass sich die GAP-Werte im Durchschnitt verschlechtern. Eine Auflistung von Rechenqualität und Rechendauer für Instanzen mit 20 Kunden und 5 Depots zeigt die Tabelle (13.5). Zum Zwecke eines Vergleichs zeigt die dritte Spalte von links die Qualität der von Belenguer et al. ermittelten unteren Schranken. Die durchschnittliche Rechenzeit beim Branch-and-Cut-Verfahren von Belenguer et al. beträgt etwa 1,35 Sekunden.

Instanz	GAP	GAP lt. Belenguer et al.	Rechenzeit in Sekunden
coord20-5-1	32,21 %	0,00 %	98 802,0
coord20-5-1b	11,08 %	0,00 %	72 638,5
coord20-5-2	19,89 %	0,00 %	201 720,0
coord20-5-2b	16,32 %	0,00 %	75 479,4

Tabelle 13.5: Rechenstudie zur LB B1

LB B2 - Zeilengenerierungsverfahren bei 2 Indizes und symmetrischen Distanzen

Das Zeilengenerierungsverfahren zur Ermittlung der Lower Bound B2 für das statische LRP in Form eines Modells, das der Flussvariablen x_{ij} lediglich zwei Indizes zuordnet, ist in seiner Implementierung komplexer. Wie viele Touren aus einem Depot i zu fahren sind, kennzeichnet hier eine zusätzliche ganzzahlige Entscheidungsvariable v_i . Auf das LRP - Modell angewandt²¹⁰, werden sowohl die Restriktionen zur Verhinderung von Kettenbildung mit genau vier Knoten und mit mehr als vier Knoten (Restriktionen (13.23) und (13.24)), als auch die Nebenbedingung zur Antizipation von Subtouren (Restriktion (13.25)) relaxiert. Kapazitätsrestriktionen werden durch die Nebenbedingungen (13.20) bis (13.22) und (13.25) eingehalten. Ein Wegfall der Restriktion (13.25) kann folglich automatisch zu Zyklen führen, die keine Subzyklen darstellen müssen, jedoch in ihrer Kapazitätsbetrachtung unzulässig sein können.

Eine weitere Vereinfachung des Modells stellt die Annahme symmetrischer Distanzen dar. Die Entfernung zwischen zwei Knoten i und j ist aufgrund einer euklidischen Entfernungsmetrik stets identisch mit der Entfernung zwischen denselben Knoten j und i . Die Annahme symmetrischer Distanzen führt dazu, dass lediglich die Hälfte aller Entscheidungsvariablen betrachtet werden muss.

Das Zeilengenerierungsverfahren ist im folgenden Abschnitt Algorithmus „ZG-Verfahren bei 2 Indizes und symmetrischen Distanzen“ abgebildet und der Algorithmus wird im LRP – Modell detailliert dargestellt.

Algorithmus ZG-Verfahren bei 2 Indizes und symmetrischen Distanzen:

Input:

Koordinaten und Nachfragemengen der Kunden
Koordinaten, Kapazitätsgrößen und Einrichtungskosten der Depots
Kapazitätsgrößen und fixe Kosten der Fahrzeuge

ZG-Verfahren:

1. Relaxation des Ausgangsproblems
(=Ausgangsproblem ohne Restriktionen (13.23), (13.24), (13.25)).
2. Lösung des relaxierten Problems
Überprüfung, ob unzulässige Touren existieren, die
 - (a) eine Kette bilden,

²¹⁰In Anlehnung: Barreto S. S. (2004): S.125-130 [10]. Der Zielfunktionsterm ist durch eine Integration von fixen Fahrzeugkosten erweitert.

- (b) Subtouren bilden (d.h. nur Kunden in einer Tour enthalten), und
- (c) die Fahrzeugkapazitäten übersteigen.

Falls unzulässige Touren existieren und Rechenzeit unter 2 Stunden, dann Schritt 3.

Falls unzulässige Touren existieren und Rechenzeit länger als 2 Stunden, dann Schritt 4.

Falls keine unzulässigen Touren existieren, dann Schritt 4.

3. Modifikation des Ausgangsproblems bei Existenz von unzulässigen Touren durch entsprechende Zeilengenerierung und Rückkehr zu Schritt 2.
4. Beendigung des Zeilengenerierungsverfahrens.

Output:

Lower Bound bzw. optimales Ergebnis

LRP-Modell

Entscheidungsvariablen:

x_{jh} = 1, falls die Verbindung (j, h) befahren wird, $j, h \in J$
= 0, sonst

x_{ij} = 2, falls die Verbindung (i, j) eine Rundreise darstellt, $i \in I, j \in J$
= 1, falls die Verbindung (i, j) befahren wird, $i \in I, j \in J$
= 0, sonst

y_i = 1, falls Depot i errichtet und betrieben wird
= 0, sonst

v_i Anzahl der Touren, die in i starten

Parameter:

I Menge aller Depots

J Menge aller Kunden

c_{jh} Fahrkosten zwischen den Kunden j und h , $j, h \in J$

c_{ij} Fahrkosten zwischen dem Depot i und dem Kunde j , $i \in I, j \in J$

O_i Kosten der Eröffnung des Depots $i \in I$

W_i Kapazität des Depots $i \in I$

d_j Nachfrage des Kunden $j \in J$

Q Kapazität des Fahrzeugs $k \in K$ ²¹¹

F Fixkosten für die Nutzung des Fahrzeugs $k \in K$

Zielfunktion:

$$\text{Min} \sum_{i \in I} O_i y_i + \sum_{i \in I, j \in J} c_{ij} x_{ij} + \sum_{j, h \in J: j \neq h} c_{jh} x_{jh} + \sum_{i \in I} F v_i \quad (13.18)$$

u.d.N.:

$$\sum_{j \in J: j \neq n} x_{jn} + \sum_{h \in J: n \neq h} x_{nh} + \sum_{i \in I} x_{ni} = 2, \quad \forall n \in J \quad (13.19)$$

$$v_i \leq \frac{W_i}{Q} y_i, \quad \forall i \in I \quad (13.20)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 2v_i, \quad \forall i \in I \quad (13.21)$$

$$\sum_{i \in I} v_i \geq \left\lceil \frac{\sum_{j \in J} d_j}{Q} \right\rceil \quad (13.22)$$

$$x_{i_1 j_1} + 3x_{j_1 i_2} + x_{j_2 i_2} \leq 4, \quad \forall j_1, j_2 \in J; i_1, i_2 \in I: j_1 \neq j_2, i_1 \neq i_2 \quad (13.23)$$

$$x_{i_1 j_1} + 2 \left(\sum_{j, h \in S / \{j_1, j_{|S|}\}: j \neq h} x_{jh} \right) + x_{j_{|S|} i_2} \leq 2(|S| + 2) - 5, \\ \forall S \subset J: |S| \geq 3, j_1, \dots, j_{|S|} \in S; i_1, i_2 \in I, i_1 \neq i_2 \quad (13.24)$$

$$\sum_{j, h \in S: j \neq h} x_{jh} \leq |S| - \left\lceil \frac{\sum_{j \in S} d_j}{Q} \right\rceil, \quad \forall S \subset J: 2 \leq |S| \leq (|J| - 2) \quad (13.25)$$

$$x_{jh} \in \{0, 1\}, \quad \forall j, h \in J: j \neq h \quad (13.26)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1, 2\}, \quad \forall i \in I, j \in J \quad (13.27)$$

$$y_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I \quad (13.28)$$

$$v_i \in \mathbb{Z}_0^+, \quad \forall i \in I \quad (13.29)$$

Rechenstudie ZG-Verfahren bei 2 Indizes und symmetrischen Dinstanzen:

Tabelle (13.6) illustriert Rechendauer und Rechenergebnisse für das Zeilengenerierungsverfahren zur Bestimmung von LB - B2.

²¹¹K = Menge aller Fahrzeuge

Die Vereinfachung des Modells zum statischen kapazitierten LRP durch symmetrische Distanzen und eine Reduzierung der Flussvariablenindizes auf zwei Stück scheint zu einer erheblichen Verbesserung des Verhältnisses von Rechenergebnis und Rechenzeit im Gegensatz zum ZG-Verfahren für LB - B1 zu führen.

Prodhon		Prodhon_LB	LB	GAP_B2 (absolut)	GAP_B2 (in %)	Zeit in Sek.
coord20-5-1	54793	54793	51763	-3030	-5,85%	7210,69
coord20-5-1b	39104	39104	39104	0	0,00%	141,10
coord20-5-2	48908	48908	48502	-406	-0,84%	7242,43
coord20-5-2b	37542	37542	37542	0	0,00%	0,64
coord50-5-1	90111	87109,64	75926	-14185	-18,68%	7278,7
coord50-5-1b	63242	61595,22	55828	-7414	-13,28%	7458,61
coord50-5-2	88298	86055,01	80491	-7807	-9,70%	7789,04
coord50-5-2b	67340	65787,75	53540	-13800	-25,78%	7265,31
coord50-5-2BIS	84055	83439	71486	-12569	-17,58%	7290,02
coord50-5-2bBIS	51822	51822	51228	-594	-1,16%	7431,6
coord50-5-3	86203	84075,08	76827	-9376	-12,20%	7438,23
coord50-5-3b	61830	61607,4	56557	-5273	-9,32%	7395,68
coord100-5-1	275993	272082,37	231118	-44875	-19,42%	5663,07 ^{A212}
coord100-5-1b	214392	207037,38	191521	-22871	-11,94%	3832,49 ^A
coord100-5-2	194598	186916,59	173531	-21067	-12,14%	2768,06 ^A
coord100-5-2b	157173	153827,05	142173	-15000	-10,55%	877,99 ^A
coord100-5-3	200246	194202,03	174037	-26209	-15,06%	1939,68 ^A
coord100-5-3b	152586	149985,58	140536	-12050	-8,57%	1898,8 ^A
coord100-10-1	290429	258242,64	248533	-41896	-16,86%	3978,24 ^A
coord100-10-1b	234641	218825,96	206065	-28576	-13,87%	4927,23 ^A
coord100-10-2	244265	226904,99	219831	-24434	-11,11%	4186,18 ^A
coord100-10-2b	203988	194627,72	192754	-11234	-5,83%	2364,39 ^A
coord100-10-3	253344	222353,23	220264	-33080	-15,02%	7783,43
coord100-10-3b	204597	189308,5	183038	-21559	-11,78%	2606,36 ^A
coord200-10-1	479425	-	385595	-93830	-24,33%	106,58 ^A
coord200-10-1b	378773	-	313160	-65613	-20,95%	5,695 ^A
coord200-10-2	450468	-	410732	-39736	-9,67%	9860,36
coord200-10-2b	374435	-	347227	-27208	-7,84%	1417,35 ^A
coord200-10-3	472898	-	384877	-88021	-22,87%	491,58 ^A
coord200-10-3b	364178	-	316581	-47597	-15,03%	47,39 ^A

Tabelle 13.6: Rechenstudie zur LB B2

²¹²A = Abbruch des Verfahrens

Jedoch auch hier kommt es zu einem Abbruch des Verfahrens aufgrund fehlenden Speicherplatzes in AMPL²¹³, allerdings erst ab Instanzen mit 100 Kunden. Die Instanzen mit 200 Kunden sind mithilfe des GUROBI-Solvers gelöst. Eine Lösung mithilfe des CPLEX-Solvers führt bei einigen Instanzen zu einem noch früheren Abbruch.

In Abhängigkeit der Größe der Instanzen ergeben sich die in der Tabelle (13.7) aufgelisteten durchschnittlichen GAP-Werte $\left(\frac{\sum_{i \in I} \left(\frac{UB_i - LB_i}{LB_i}\right)}{I}\right)$ in Prozent²¹⁴.

Durchschnittliche prozentuale GAP-Werte	Anzahl Instanzen I	nach ZG für LB B2	nach Belenguer et al.
∅ GAP-Wert	24	11,11%	3,54%
∅ GAP-Wert 20er	4	1,67%	0,00%
∅ GAP-Wert 50er	8	13,46%	1,84%
∅ GAP-Wert 100er	12	12,68%	5,86%
∅ GAP-Wert 200er	6	16,78%	—

Tabelle 13.7: Instanztypspezifische durchschnittliche prozentuale GAP-Werte

Auch an dieser Stelle sind die prozentualen GAP-Werte für LB B1 und LB B2 durch einen grünen und einen blauen Graphen in Abbildung (13.6) visualisiert. Der graue Verlauf illustriert die prozentualen GAP-Werte, die von Belenguer et al. eruiert wurden. Tabelle (13.8) ermöglicht einen erneuten Vergleich.

Durchschnittliche untere Schranken nach Instanzen	LB B1	LB B2	LB nach Belenguer et al.
∅ LB	-11,11%	-19,98%	-3,54%
∅ LB 20	-1,67%	-19,98%	0,00%
∅ LB 50	-13,46%	—	-1,84%
∅ LB 100	-12,68%	—	-5,86%
∅ LB 200	-16,78%	—	—

Tabelle 13.8: Instanztypspezifische durchschnittliche GAP-Werte für LB B1 und LB B2

²¹³A Mathematical Programming Language

²¹⁴I bedeutet hier die Menge aller Instanzen

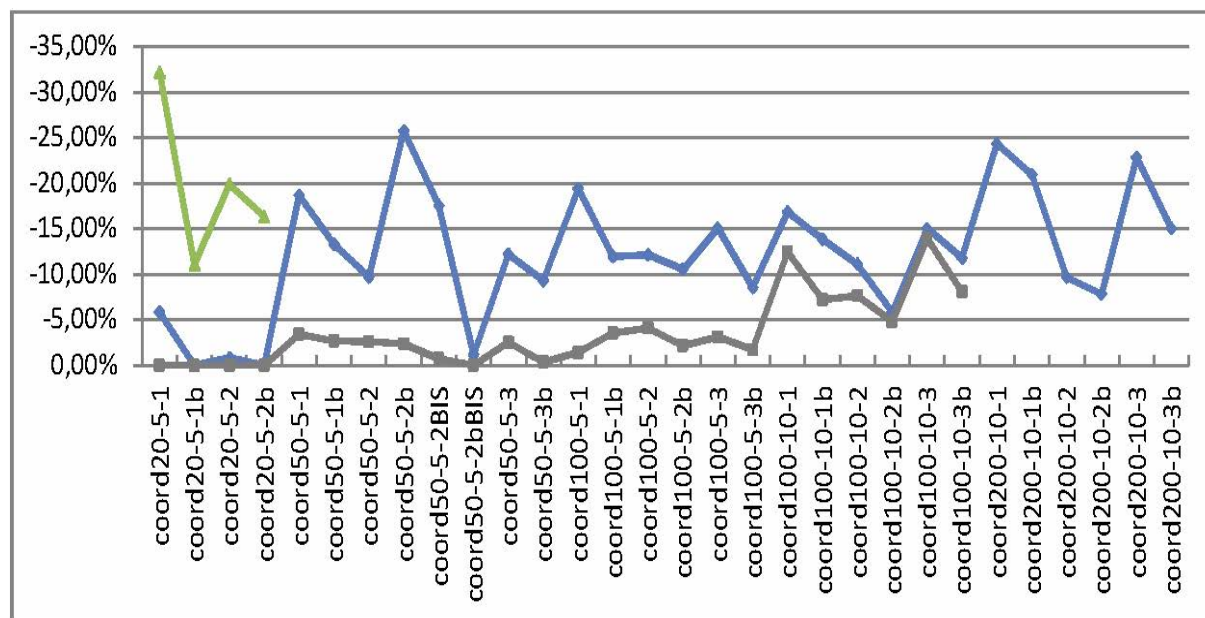


Abbildung 13.6: Instanzspezifischer Verlauf des GAP - Werts für LB B1 (in grün), LB B2 (in blau) und für die LB nach Belenguer et al. (in grau)

13.4 Untere Schranken für die Varianten des dynamischen kapazitierten LRP

Für jede der vier Varianten des dLRPs wurde das in Kapitel 13.3.3 erwähnte Zeilengenerierungsverfahren dahingehend modifiziert, dass es um die periodische Betrachtung erweitert wurde. Die Restriktionen, die Gegenstand des ZG-Verfahrens sind, bleiben jedoch die gleichen: die Restriktionen zur Verhinderung von Ketten mit genau vier und mit mehr als vier Knoten, sowie die Restriktion zur Verhinderung von Subtouren durch unerlaubte Zyklen wie Kundenzyklen, d.h. Zyklen, die lediglich Kunden, jedoch keine Depots enthalten, oder aber Zyklen, die die Kapazität von Fahrzeugen übersteigen.

Betrachtet werden vier bereits im Kapitel 10 vorgestellten Varianten des dynamischen LRPs: *ddmdLRPpconfig_P*, *dsmDLRPpconfig*, *ddmdLRPsconfig* und *ddmdLRPpconfig_M*.

13.4.1 Periodische Standort- und Tourenentscheidung bei isolierter Periodenbetrachtung

⇒ Periodische Standort- und Tourenentscheidung bei isolierter Periodenbetrachtung

Die Variante **ddmdLRPpconfig_P** stellt eine Ausprägung des dLRP dar, in dem Standort- und Tourenentscheidungen ohne Prognosewerte zu Beginn jeder Periode getroffen werden. Hierbei wird jede Periode isoliert für sich betrachtet und anhand des aufgetretenen Vergan-

genheitswerts in der Vorperiode optimiert. Nach Vergleich der tatsächlich aufgetretenen Nachfragewerte der betrachteten Periode fallen Strafkosten bei Übersteigen von Touren- und Depotkapazitäten an.

Die Variante **dsmdLRPpconfig** stellt das Pendant hierzu dar, bei dem anhand von Prognosewerten optimiert wird. Auch hier wird das ermittelte Ergebnis mit der tatsächlich eingetretenen Nachfrage verglichen und es fallen Strafkosten bei Nichteinhaltung von Touren- und Depotkapazitäten an.

Das ZG-Verfahren ist für alle drei Varianten das gleiche. Die vom ZG-Verfahren betroffenen Nebenbedingungen sind die Nebenbedingungen (13.35), (13.36) und (13.37).

ddmdLRPpconfig_P bzw. dsmdLRPpconfig²¹⁵

Entscheidungsvariablen

x_{jh} = 1, falls die Verbindung (j, h) befahren wird, $j, h \in J$
= 0, sonst

x_{ij} = 2, falls die Verbindung (i, j) eine Rundreise darstellt, $i \in I, j \in J$
= 1, falls die Verbindung (i, j) befahren wird, $i \in I, j \in J$
= 0, sonst

y_i = 1, falls Depot i betrieben wird
= 0, sonst

v_i Anzahl der Touren, die in i starten

Parameter:

I Menge aller Depots

J Menge aller Kunden

c_{jh} Fahrkosten zwischen den Kunden j und h , $j, h \in J$

c_{ij} Fahrkosten zwischen dem Depot i und dem Kunde j , $i \in I, j \in J$

O_i Kosten der Eröffnung des Depots $i \in I$

U_i Fixkosten für den Betrieb des Depots $i \in I$

C_i Kosten der Schließung des Depots $i \in I$

W_i Kapazität des Depots $i \in I$

d_j Nachfrage des Kunden $j \in J$

²¹⁵Dynamisches LRP, bei dem die Nachfrage einer Periode eines Zeithorizonts H erst zu Beginn ebendieser Periode bekannt ist. Die Standortentscheidung und Tourenwahl finden zu Beginn einer Periode statt.

Q Kapazität des Fahrzeugs $k \in K$ ²¹⁶

F Fixkosten für die Nutzung des Fahrzeugs $k \in K$

Zielfunktion:

$$\text{Min} \quad \sum_{i \in I} O_i y_i + \sum_{i \in I} U_i y_i + \sum_{i \in I} C_i y_i + \sum_{i \in I, j \in J} c_{ij} x_{ij} + \sum_{j, h \in J: j \neq h} c_{jh} x_{jh} + \sum_{i \in I} F v_i \quad (13.30)$$

u.d.N.:

$$\sum_{j \in J: j \neq n} x_{jn} + \sum_{h \in J: n \neq h} x_{nh} + \sum_{i \in I} x_{ni} = 2, \quad \forall n \in J \quad (13.31)$$

$$v_i \leq \frac{W_i}{Q} y_i, \quad \forall i \in I \quad (13.32)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 2v_i, \quad \forall i \in I \quad (13.33)$$

$$\sum_{i \in I} v_i \geq \left\lceil \frac{\sum_{j \in J} d_j}{Q} \right\rceil \quad (13.34)$$

$$x_{i_1 j_1} + 3x_{j_1 j_2} + x_{j_2 i_2} \leq 4, \quad \forall j_1, j_2 \in J; i_1, i_2 \in I: j_1 \neq j_2, i_1 \neq i_2 \quad (13.35)$$

$$x_{i_1 j_1} + 2 \left(\sum_{j, h \in S: \{j_1, j_{|S|}\}: j \neq h} x_{jh} \right) + x_{j_{|S|} i_2} \leq 2(|S| + 2) - 5, \\ \forall S \subset J: |S| \geq 3, j_1, \dots, j_{|S|} \in S; i_1, i_2 \in I, i_1 \neq i_2 \quad (13.36)$$

$$\sum_{j, h \in S: j \neq h} x_{jh} \leq |S| - \left\lceil \frac{\sum_{j \in S} d_j}{Q} \right\rceil, \quad \forall S \subset J: 2 \leq |S| \leq (|J| - 2) \quad (13.37)$$

$$x_{jh} \in \{0, 1\}, \quad \forall j, h \in J: j \neq h \quad (13.38)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1, 2\}, \quad \forall i \in I, j \in J \quad (13.39)$$

$$y_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I \quad (13.40)$$

$$v_i \in \mathbb{Z}_0^+, \quad \forall i \in I \quad (13.41)$$

In jeder Periode wird das klassische (statische) LRP gelöst. Abhängig vom Betriebszustand jedes einzelnen Depots findet eine Veränderung der Ausprägungen der Kostenarten dieses Depots statt (siehe Tabelle (13.9)).

²¹⁶K = Menge aller Fahrzeuge

Ausgangszustand in t_0	$y_i = 0$		
Kosten für	Eröffnung O_i	Betrieb U_i	Schließung C_i
Kostenstruktur in t_0	0	0	0
Kosten bei Öffnung von y_i in t_1	O_i	U_i	0
Modifikation der Kosten für t_2	0	U_i	C_i
Kosten bei Betrieb von y_i in t_2	0	U_i	0
Kosten bei Schließung von y_i in t_2	0	0	C_i

Tabelle 13.9: Änderung der Kostenarten für jedes einzelne Depot

13.4.2 Einmalige Standortentscheidung zu Beginn des Planungshorizonts unter Kenntnis der Nachfrage aller Perioden

⇒ einmalige Standortentscheidung zu Beginn des Planungshorizonts unter Kenntnis der Nachfrage aller Perioden, periodische Tourenentscheidung.

In dem linearen Modell für diese Variante des dLRP sind die Restriktionen (13.47), (13.48) und (13.49) die vom ZG-Verfahren betroffenen Nebenbedingungen.

ddmdLRPsconfig²¹⁷

Entscheidungsvariablen

x_{jht} = 1, falls die Verbindung (j, h) in Periode t befahren wird, $j, h \in J$
 = 0, sonst

x_{ijt} = 2, falls die Verbindung (i, j) in Periode t eine Rundreise darstellt, $i \in I, j \in J$
 = 1, falls die Verbindung (i, j) in Periode t befahren wird, $i \in I, j \in J$
 = 0, sonst

y_i = 1, falls Depot i betrieben wird
 = 0, sonst

v_{it} Anzahl der Touren, die von Depot i in Periode t starten

Parameter:

I Menge aller Depots

J Menge aller Kunden

t betrachtete Periode eines Planungshorizonts H

H Planungshorizont, beinhaltet die Perioden $t = 1, \dots, |H|$

c_{jh} Fahrkosten zwischen den Kunden j und h , $j, h \in J$

c_{ij} Fahrkosten zwischen dem Depot i und dem Kunde j , $i \in I, j \in J$

²¹⁷Dynamisches LRP, bei dem die Nachfrage aller Perioden eines Zeithorizonts H zu Beginn eben dieses Zeithorizonts bekannt ist. Die Standortentscheidung findet einmalig zu Beginn des Zeithorizonts H , d.h. zu Beginn der ersten Periode statt. Die Tourenwahl wird in jeder Periode neu entschieden.

- O_i Kosten der Eröffnung des Depots $i \in I$
 U_i Fixkosten für den Betrieb des Depots $i \in I$
 W_i Kapazität des Depots $i \in I$
 d_{jt} Nachfrage des Kunden $j \in J$ in Periode t
 Q Kapazität des Fahrzeugs $k \in K$ ²¹⁸
 F Fixkosten für die Nutzung des Fahrzeugs $k \in K$

Zielfunktion:

$$\text{Min} \sum_{i \in I} O_i y_i + \sum_{i \in I} |H| U_i y_i + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in H} c_{ij} x_{ijt} + \sum_{j, h \in J: j \neq h} \sum_{t \in H} c_{jh} x_{jht} + \sum_{i \in I} \sum_{t \in H} F v_{it} \quad (13.42)$$

u.d.N.:

$$\sum_{j \in J: j \neq n} x_{jnt} + \sum_{h \in J: n \neq h} x_{nht} + \sum_{i \in I} x_{nit} = 2, \quad \forall n \in J, t \in H \quad (13.43)$$

$$v_{it} \leq \frac{W_i}{Q} y_i, \quad \forall i \in I, t \in H \quad (13.44)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ijt} = 2v_{it}, \quad \forall i \in I, t \in H \quad (13.45)$$

$$\sum_{i \in I} v_{it} \geq \lceil \frac{\sum_{j \in J} d_{jt}}{Q} \rceil, \quad \forall t \in H \quad (13.46)$$

$$x_{i_1 j_1 t} + 3x_{j_1 j_2 t} + x_{j_2 i_2 t} \leq 4, \quad \forall j_1, j_2 \in J; i_1, i_2 \in I: j_1 \neq j_2, i_1 \neq i_2; \forall t \in H \quad (13.47)$$

$$x_{i_1 j_1 t} + 2 \left(\sum_{j, h \in S: \{j_1, j_{|S|}\}: j \neq h} x_{jht} \right) + x_{j_{|S|} i_2 t} \leq 2(|S| + 2) - 5, \quad \forall S \subset J: |S| \geq 3, j_1, \dots, j_{|S|} \in S; i_1, i_2 \in I, i_1 \neq i_2; \forall t \in H \quad (13.48)$$

$$\sum_{j, h \in S: j \neq h} x_{jht} \leq |S| - \lceil \frac{\sum_{j \in S} d_{jt}}{Q} \rceil, \quad \forall S \subset J: 2 \leq |S| \leq (|J| - 2), \forall t \in H \quad (13.49)$$

$$x_{jht} \in \{0, 1\}, \quad \forall j, h \in J: j \neq h, \forall t \in H \quad (13.50)$$

$$x_{ijt} \in \{0, 1, 2\}, \quad \forall i \in I, j \in J, \forall t \in H \quad (13.51)$$

$$y_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I \quad (13.52)$$

$$v_{it} \in \mathbb{Z}_0^+, \quad \forall i \in I, \forall t \in H \quad (13.53)$$

²¹⁸K = Menge aller Fahrzeuge

13.4.3 Periodische Standortentscheidung zu Beginn jeder Periode unter Kenntnis der Nachfrage aller Perioden des gesamten Planungshorizonts

⇒ periodische Standortentscheidung zu Beginn jeder Periode unter Kenntnis der Nachfrage aller Perioden des gesamten Planungshorizonts, sowie periodische Tourenentscheidung.

In dem linearen Modell für diese Variante des dLRPs sind die Restriktionen (13.59), (13.60) und (13.61) die vom ZG-Verfahren betroffenen Nebenbedingungen.

ddmdLRPconfig_M²¹⁹

Entscheidungsvariablen

- x_{jht} = 1, falls die Verbindung (j, h) in Periode t befahren wird, $j, h \in J$
= 0, sonst
- x_{ijt} = 2, falls die Verbindung (i, j) in Periode t eine Rundreise darstellt, $i \in I, j \in J$
= 1, falls die Verbindung (i, j) in Periode t befahren wird, $i \in I, j \in J$
= 0, sonst
- w_{it} = 1, falls Depot i in Periode t eröffnet wird
= 0, sonst
- y_{it} = 1, falls Depot i in Periode t betrieben wird
= 0, sonst
- z_{it} = 1, falls Depot i in Periode t geschlossen wird
= 0, sonst
- v_{it} Anzahl der Touren, die von Depot i in Periode t starten

Parameter:

- I Menge aller Depots
 J Menge aller Kunden
 t betrachtete Periode eines Planungshorizonts H
 H Planungshorizont, beinhaltet die Perioden $t = 1, \dots, |H|$
 c_{jh} Fahrkosten zwischen den Kunden j und h , $j, h \in J$
 c_{ij} Fahrkosten zwischen dem Depot i und dem Kunde j , $i \in I, j \in J$
 O_i Kosten der Eröffnung des Depots $i \in I$

²¹⁹Dynamisches LRP, bei dem die Nachfrage aller Perioden eines Zeithorizonts H zu Beginn eben dieses Zeithorizonts bekannt ist. Die Standortentscheidung während des gesamten Zeithorizonts H , d.h. zu Beginn jeder Periode stattfinden. Die Tourenwahl wird ebenfalls in jeder Periode neu entschieden.

- U_i Fixkosten für den Betrieb des Depots $i \in I$
 C_i Kosten der Schließung des Depots $i \in I$
 W_i Kapazität des Depots $i \in I$
 d_{jt} Nachfrage des Kunden $j \in J$ in Periode t
 Q Kapazität des Fahrzeugs $k \in K$ ²²⁰
 F Fixkosten für die Nutzung des Fahrzeugs $k \in K$

Zielfunktion:

Min:

$$\sum_{i \in I} \sum_{t \in H} O_i w_{it} + \sum_{i \in I} \sum_{t \in H} U_i y_{it} + \sum_{i \in I} \sum_{t \in H} C_i z_{it} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in H} c_{ij} x_{ijt} + \sum_{j, h \in J: j \neq h} \sum_{t \in H} c_{jh} x_{jht} + \sum_{i \in I} \sum_{t \in H} F v_{it} \quad (13.54)$$

u.d.N.:

$$\sum_{j \in J: j \neq n} x_{jnt} + \sum_{h \in J: n \neq h} x_{nht} + \sum_{i \in I} x_{nit} = 2, \quad \forall n \in J, t \in H \quad (13.55)$$

$$v_{it} \leq \frac{W_i}{Q} y_{it}, \quad \forall i \in I, t \in H \quad (13.56)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ijt} = 2v_{it}, \quad \forall i \in I, t \in H \quad (13.57)$$

$$\sum_{i \in I} v_{it} \geq \lceil \frac{\sum_{j \in J} d_{jt}}{Q} \rceil, \quad \forall t \in H \quad (13.58)$$

$$x_{i_1 j_1 t} + 3x_{j_1 j_2 t} + x_{j_2 i_2 t} \leq 4, \quad \forall j_1, j_2 \in J; i_1, i_2 \in I: j_1 \neq j_2, i_1 \neq i_2; \forall t \in H \quad (13.59)$$

$$x_{i_1 j_1 t} + 2 \left(\sum_{j, h \in S: \{j_1, j_{|S|}\}: j \neq h} x_{jht} \right) + x_{j_{|S|} i_2 t} \leq 2(|S| + 2) - 5, \quad \forall S \subset J: |S| \geq 3, j_1, \dots, j_{|S|} \in S; i_1, i_2 \in I, i_1 \neq i_2; \forall t \in H \quad (13.60)$$

$$\sum_{j, h \in S: j \neq h} x_{jht} \leq |S| - \lceil \frac{\sum_{j \in S} d_{jt}}{Q} \rceil, \quad \forall S \subset J: 2 \leq |S| \leq (|J| - 2), \forall t \in H \quad (13.61)$$

$$y_{i(t-1)} - y_{it} - z_{it} \leq 0, \quad \forall i \in I, t \in H \quad (13.62)$$

$$y_{it} - y_{i(t-1)} - w_{it} \leq 0, \quad \forall i \in I, t \in H \quad (13.63)$$

$$x_{jht} \in \{0, 1\}, \quad \forall j, h \in J: j \neq h, \forall t \in H \quad (13.64)$$

²²⁰K = Menge aller Fahrzeuge

$$x_{ijt} \in \{0, 1, 2\}, \quad \forall i \in I, j \in J, \forall t \in H \quad (13.65)$$

$$w_{it} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I, \forall t \in H \quad (13.66)$$

$$y_{it} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I, \forall t \in H \quad (13.67)$$

$$z_{it} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I, \forall t \in H \quad (13.68)$$

$$v_{it} \in \mathbb{Z}_0^+, \quad \forall i \in I, \forall t \in H \quad (13.69)$$

Exkurs: Funktionsweise der Restriktionen (13.62) und (13.63)

Grundidee der Modellierung bzw. Integration einer Öffnung und Schließung von Depots ist, für jede dieser Aktivitäten eine Binärvariable einzuführen und diese mit dem (gegenwärtigen) Betriebszustand des betrachteten Depots in Relation zu setzen, um eine Konsistenz zu gewährleisten. Konsistenz meint beispielsweise das Ausschließen einer Depotöffnung für einen Standort, der bereits geöffnet ist (oder analog die Schließung eines Standorts in einer Periode, in der sich dieser bereits in einem geschlossenen Zustand befindet). Hierzu muss in einem ersten Schritt für jede Aktivität separat untersucht werden, welche Ausprägungskonstellationen für die Entscheidungsvariable y_{it} in zwei aufeinander folgenden Perioden denkbar sind (zur Erinnerung: y_{it} legt fest, ob ein Standort i in einer Periode t betrieben wird oder nicht). In einem zweiten Schritt ist zu überlegen, welche dieser Konstellationen eine Öffnung oder Schließung kennzeichnet und wie diese Konstellation durch eine lineare Ungleichung eindeutig von den anderen Konstellationen isoliert werden kann. Beide Schritte seien im Folgenden am Beispiel der Depotschließung erläutert.

Konstellation	$y_{i,t-1}$	$y_{i,t}$
1	0	0
2	1	0
3	1	1
4	0	1

Tabelle 13.10: Ausprägungskonstellationen der binären Betriebszustandsvariable am Beispiel der Depotschließung

Tabelle (13.10) illustriert alle denkbaren Kombinationen, die der Betriebszustand eines Depots i in zwei aufeinander folgenden Perioden $t - 1$ und t annehmen kann. Eine „1“ markiert einen Betrieb des Depots i in der betrachteten Periode, eine „0“ einen geschlossenen Zustand.

Für die Modellierung einer Schließung entfallen die Ausprägungskonstellationen 1 und 3, da sie symbolisieren, dass ein Depot, das in $t - 1$ geschlossen (geöffnet) war, in Periode t ebenfalls geschlossen (geöffnet) bleibt, d.h. keine Schließung vorgenommen wird. Konstellation 4 kennzeichnet ebenfalls keine Schließung, da ein in Periode $t - 1$ geschlossenes

Depot in der unmittelbar darauffolgenden Periode t geöffnet wird. Folglich handelt es sich um einen Öffnungsvorgang.

Lediglich Kombination 2 (**grün** markiert) bildet die Aktivität einer Schließung ab, da sie dem Übergang des Depotzustand von „geöffnet“ in $t - 1$ zu „geschlossen“ in t gleicht. z_{it} – Binärvariable zur Kennzeichnung einer Depotschließung – muss entsprechend in t den Wert „1“ annehmen. Die lineare Ungleichung $y_{i,t-1} - y_{it} \leq z_{it}$ lässt z_{it} genau bei nur dieser zweiten Konstellation „1“ werden. Kombination 4 wird durch die Ungleichung ausgeschlossen, weil z_{it} keine negativen Werte annehmen kann. Für die Konstellationen 1 und 3 nimmt z_{it} lediglich den Null-Wert an, da dieser größer-gleich der Differenz von Null ist und eine Realisation von Eins zu einer Vergrößerung/Verschlechterung des Zielfunktionsterms aufgrund des positiven Koeffizienten C_i führen würde.

Restriktion (13.63) lässt sich für die Modellierung des Falls der Depoteröffnung analog konstruieren.

Kapitel 14

Methodenvergleich im dynamischen LRP: Forecast-Gesamtoptimierung vs. Vorperiodische Optimierung vs. Optimierung mit realen Bedarfen

14.1 Forecast vs. Vorperiode

„These: Durch zusammenhängende Betrachtung der letzten 24 Perioden lässt sich die zukünftige Nachfrage durchschnittlich genauer abschätzen als die Abschätzung anhand der Vorperiode. Insgesamt lassen sich so Kosten einsparen.“

Im Fokus dieser Arbeit steht die Untersuchung des Einsatzes von Forecast Methoden zur Lösung von dynamischen Location - Routing Problemen. Dementsprechend gilt für das Szenario des Tests, dass es mehrere Perioden gibt, in denen die Kundennachfrage variiert und unbekannt ist. Die Depots können in jeder Periode geöffnet oder geschlossen werden, ihre Kapazität ist beschränkt und bleibt gleich. Es stehen beliebig viele Fahrzeuge zur Verfügung, die ebenfalls eine beschränkte Kapazität vorweisen.

Ausgangssituation:

Man befindet sich in Periode T_0 und hat beliebig viele, aber eine fixe Anzahl an Kunden sowie eine bestimmte fixe Anzahl an möglichen Standorten für Depots, von denen die Kunden beliefert werden können.

Problemstellung:

Man kennt die genauen Bedarfe für T_1 nicht, muss aber bereits in T_0 die Fahrzeuge entsenden, um rechtzeitig liefern zu können. Das bedeutet, dass man die Beladung der Fahrzeuge also die Liefermenge nicht kennt bzw. schätzen muss. Dabei werden verschiedene Szenarien betrachtet:

Szenario 1 (Vorperiode):

Im ersten Szenario, in dem kein Forecast zum Einsatz kommt, ist die Nachfrage der Kunden der aktuellen Periode nicht bekannt, dafür aber die Nachfrage aus der letzten Periode. Es wird davon ausgegangen, dass sich die Nachfrage der aktuellen Periode nicht wesentlich von der Nachfrage der letzten Periode unterscheiden kann, so dass anhand der Nachfragewerte der letzten Periode die Touren für die aktuelle Periode geplant werden. Demzufolge wird Nachfrage mit dem in dieser Lösung verwendeten heuristischen Lösungsverfahren optimiert.

Im Laufe der Periode, nachdem die Fahrzeuge bereits entsandt wurden, werden die Nachfragen der aktuellen Periode bekannt. Diese können nun mit den geplanten Nachfragen verglichen werden. Im optimalen Fall stimmen die geplanten und tatsächlichen Nachfragen überein, dann entstehen keine weiteren Kosten für das Unternehmen. Sollte der geplante Wert der Nachfrage höher sein, als der tatsächliche, so kann die Nachfrage des Kunden komplett befriedigt werden und es fallen ebenfalls keine direkten Kosten in Form von Strafzahlungen an. Es sind aber tatsächlich bereits indirekte Kosten in Form von Opportunitätskosten²²¹ entstanden durch die verschwendete Kapazität des Fahrzeuges, das auf dieser Route eingesetzt wurde. Sollte der geplante Wert geringer als der tatsächliche sein, so kann die Nachfrage des Kunden nicht vollständig befriedigt werden und es werden Strafkosten in Höhe von xxx € fällig, die zu den Gesamtkosten zu addieren sind. Dieses Prinzip wird für alle Kunden in jeder der 24 Perioden, in den ausgeliefert wird, so angewandt und die Kosten der einzelnen Perioden zu Gesamtkosten addiert.

Szenario 2 (Forecast):

Es sind die Nachfragen der letzten 24 Perioden aller Kunden bekannt anhand derer die Prognosewerte für die folgenden 24 Perioden in der Zukunft ermittelt werden.

²²¹Vgl. Conway E. (2011): S.18-21 [21]

Vergleich der Modelle:

Grundsätzlich wird zunächst darin unterschieden, ob die Nachfrage der aktuellen Periode nur anhand einer Periode abgeschätzt wird oder ob mehrere Perioden der Vergangenheit zur Errechnung eines Prognosewertes auf Zeitreihenbasis bilden. Diese beiden Möglichkeiten werden im Folgenden mit Fall 1 für die Einbeziehung nur einer Periode zur Prognose und mit Fall 2 für die Prognose anhand der Zeitreihe mehrerer Perioden, bezeichnet.

Im Fall 1 wird die Routenplanung nur anhand der Nachfrage der letzten Periode aufgestellt. Demzufolge entspricht die Liefermenge in T1 der Nachfrage des Kunden in T0. Führt man diese Prozedur über mehrere Perioden durch, so ergeben sich beispielsweise folgende Nachfrage- und Liefermengenverläufe.

Fall 1:

Merkmale	Perioden					
Zeit:	T0	T1	T2	T3	T4	T5
Nachfrage:	13	14	16	11	12	15
Liefermenge:	/	13	14	16	11	12
Fehlmenge:	/	-1	-2	+5	-1	-3
Nachliefern:	/	JA	JA	NEIN	JA	JA

Tabelle 14.1: Periodenweise Nachfragen- und Liefermengenverläufe Fall 1

Für die Betrachtung von Fall 2 werden die gesammelten Informationen über Nachfragemengen der letzten Perioden genutzt und mit Hilfe der Zeitreihenentwicklung einen *Prognosewert (Forecast)* für zukünftige Nachfragemenge entwickelt, die an die Kunden geliefert werden muss.

Fall 2:

Merkmale	Perioden					
Zeit:	T0	T1	T2	T3	T4	T5
Nachfrage:	13	14	16	11	12	15
Liefermenge:	/	14	14	14	14	14
Fehlmenge:	/	0	-2	+3	+2	-1
Nachliefern:	/	NEIN	JA	NEIN	NEIN	JA

Tabelle 14.2: Periodenweise Nachfragen- und Liefermengenverläufe Fall 2

Anmerkungen:

Sowohl zu viel gelieferte Mengen, als auch zu wenig gelieferte Mengen sind schlecht. Jedoch sind zu viel gelieferte Mengen nur schlecht, weil sie Kapazitäten verbrauchen, die anderen Kunden nicht mehr zur Verfügung stehen und somit (in gewisser Weise) die Routenbildung beeinflussen.

Zu wenig gelieferte Mengen sind jedoch, aus betriebswirtschaftlicher Sicht gesehen, schlechter, weil sie den Kunden verärgern können und somit zur Beendigung der Geschäftsverbindungen führen können. Des Weiteren drohen Imageschäden etc., das soll aber hier nicht der Knackpunkt sein. In jedem Fall müssen zu wenig gelieferte Mengen härter ins Gewicht fallen.

Sanktionierung:

Bisher gibt es zwei Vorschläge, die zu wenig gelieferte Nachfrage zu sanktionieren. Einmal wird ein zusätzliches Fahrzeug entsendet, was die fehlenden Mengen nachliefert, und auf den entstehenden Transportkosten bleiben wir sitzen.

Zum anderen gibt es die Möglichkeit, dass im Falle von zu wenig gelieferten Mengen pauschal eine Strafzahlung geleistet werden muss (s. Kapitel 11).

Vergleichbarkeit:

Zunächst einmal muss man die prognostizierten Werte durch die realen Werte für jeden Kunden in der aktuellen Periode ersetzen. Dann muss geschaut werden, welchem Kunden zu wenig geliefert worden ist und wie viel zusätzliche Kosten dadurch anfallen (Pauschalzahlung oder Nachlieferung). Diese Kosten müssen zu den durch die ursprüngliche Lösung ermittelten Kosten addiert werden und die sich dadurch ergebenden sind die wirklichen Gesamtkosten der aktuellen Periode.

Testdesign:

Es besteht die Intention, dass man durch den Einsatz der Prognose für den dynamischen Fall insgesamt über alle Perioden immer näher am realen Nachfragewert der Periode ist als mit reiner Verwendung der Werte der Vorperiode. Das spart dann noch einmal Kosten dadurch, dass seltener Nachlieferungen bzw. Strafzahlungen geleistet werden müssen und andererseits die zur Verfügung stehende Kapazität der Fahrzeuge effizienter genutzt wird. Also, insgesamt durch den Einsatz von Prognosewerten weniger Kosten verbraucht werden. Das gilt es zu beweisen.

Um das zu beweisen, müssen die Nachfragewerte der Prognose durch die realen ersetzt und die zusätzlich entstehenden Kosten addiert werden. Wenn das geschehen ist,

sollte der Beweis nicht mehr schwer zu erbringen sein. Es müssen verschiedene Arten von Nachfrageverläufen (Einfluss von Trends und Saisonalitäten) getestet werden und ein geeignetes Maß für eine pauschale Strafzahlung bei Unterschreitung der realen Nachfrage gefunden werden. Schließlich müssen die erzielten Ergebnisse der beiden Methoden (Fall 1 und Fall 2) ermittelt und miteinander verglichen werden.

14.2 Parametrierung von AdL(e)R[©]

Insgesamt wurden 90 Instanzen untersucht (Generierung der Instanzen s. Kapitel 7). Eine Beispielinstantz: $c0 - AK - 200 - 10 - 150 - 1000$ (Anzahl Cluster/ Additiver Trend, keine Saisonalität/ 200-Anzahl Kunden/ 10-Anzahl Depots/ 150-Kapazität Fahrzeug/ 1000 Kosten einer Fahrstrecke). Zum Vergleich der Modelle kommt das Optimierungstool AdL(e)R[©] zum Einsatz. Die Funktionsweise basiert auf den Ausführungen des Kapitels 8. Bevor mit dem Vergleich einzelner Fälle begonnen wird, müssen die entsprechenden Parameter im AdL(e)R[©] eingestellt werden:

eta	= 0.025
probabilityOfGroupMutation	= 0
probabilityOfRouteMutation	= 0.33
probabilityOfClientMutation	= 0.33
probabilityOfNoise	= 0.5
probabilityOfCrossOver	= 0.8
populationSize	= 300
maxNumberOfIndividuals	= 5000
maxNumberOfIndividualsWithoutImprovement	= 2500
usingSubsets	= <i>false</i>
numberOfRuns	= 10
depotStayOpenPercentage	= 1.00
depotOpeningPercentage	= 1.00
depotClosingPercentage	= 0.00
regret	= 0

Die einzelnen Parameter haben folgende Bedeutungen:

eta (η):

Faktor zur Steuerung des Rauschenanteils in der Einfüge-Heuristik. Er kann Werte von 0 bis 1 annehmen. In dieser Arbeit wird mit 0,025 gerechnet.²²²

²²²Vgl. Ropke S. et al. (2006): S.465 [77]

probabilityOfGroupMutation:

Wahrscheinlichkeit eines Austausches innerhalb einer Gruppe (Kunde, Tour, Depot) nach einer vorher durchgeführten Berechnung.

probabilityOfRouteMutation:

Wahrscheinlichkeit eines Austausches einer Route nach einer vorher durchgeführten Berechnung.

probabilityOfClientMutation:

Wahrscheinlichkeit eines Austausches eines Kunden nach einer vorher durchgeführten Berechnung.

probabilityOfNoise:

Wahrscheinlichkeit für die Anwendung des Rauschens in der Einfüge-Heuristik.

probabilityOfCrossOver:

Wahrscheinlichkeit für die Anwendung des Crossover-Operators, der den Suchraum mit höherer durchschnittlicher Güte wesentlich schneller erreicht und durchschreitet als bei einer rein zufälligen Suche.²²³

MaxNumberOfIndividuals:

Definiert die maximale Anzahl der Individuen. Der Algorithmus wird unterbrochen, sobald 5000 Lösungen berechnet wurden und das Ergebnis wird abgespeichert.

MaxNumberOfIndividualsWithoutImprovement:

Definiert das zweite Abbruchkriterium. Wurden in den letzten 2500 Berechnungen keine Verbesserungen erzielt, wird der Algorithmus ebenfalls beendet, da in dieser Berechnung wahrscheinlich keine bessere Lösung gefunden werden kann.

usingSubsets:

Regelt die Anzahl der zu öffnenden Depots.

²²³Vgl. Schöneburg E. et al. (1994): S.198 [81]

NumberOfRuns:

Legt die Anzahl der Wiederholungen, die die Software durchläuft, fest.

depotStayOpenPercentage:

Gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit welcher das gleiche Depot in der nächsten Periode offen bleibt.

depotOpeningPercentage:

Gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit welcher ein Depot in einer Periode eröffnet wird.

depotClosingPercentage:

Gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit welcher ein Depot in einer Periode geschlossen wird.

regret:

Wahrscheinlichkeit für die Anwendung der Regret-Heuristik. Wert 0 bedeutet, dass die Regret-Heuristik nach einem Zufallsprinzip zur Anwendung kommt.

14.3 LRP-Modellenvergleich anhand von Szenarien

Gemäß den in Kapitel 10 vorgestellten Modelle werden mithilfe vom **AdL(e)R[©]** - Optimierungstools folgende Szenarien angewendet:

Szenario 0:

Statisches LRP mit deterministischen Nachfragen: **sdmdLRPsconfig**.

Szenario 1:

Vorperiode: Dynamisch-deterministisches LRP mit periodischer Standortkonfiguration, einperiodischer Informationsnutzung: **sdmdLRPpconfig_P**

Szenario 2:

Forecast: Dynamisch-stochastisches LRP mit einmaliger Standortkonfiguration: **dsmdLRPpconfig**

Szenario 3:

Dynamisch-deterministisches LRP mit periodischer Standortkonfiguration, mehrperiodischer Informationsnutzung: **ddmdLRPpconfig _ M**

Szenario 4:

Dynamisch-deterministisches LRP mit einmaliger Standortkonfiguration: **ddmdLRPsconfig**

Zur besseren Verständnis der weiter unten aufgeführten Pseudo-Codes:

Population => hat eine Menge n von Individuen

Individual => hat eine Menge von Gruppen

Group => hat ein Depot und eine Menge von Routen

Route => hat eine Menge von Kundenbedarfen

Szenario 0 betrachtet das zuvor formulierte statische LRP-Modell: *sdmdLRPsconfig*. Im ersten Schritt wird das Optimierungstool **AdL(e)R[©]** entsprechend der obigen Ausführung parametrisiert und die für ein statisches LRP generierten Instanzen eingelesen. Anschließend wird eine Population aus n Individuen erstellt. Anhand der Einfüge-Heuristik wird zuerst das erste Depot und die ersten Routen ausgewählt und dann nach und nach Depots eröffnet bis alle Bedarfe den entsprechenden Depots zugeordnet sind.

Im nächsten Schritt werden mit Hilfe des Tournament-Selection (Wettkampfselektion) die besten „Elternteile“ anhand der niedrigsten Gesamtkosten ausgewählt. Daraufhin wird mit 80% -er Wahrscheinlichkeit das erste Kind mit dem 2-Point Crossover Operator erstellt und mit 20% -er Wahrscheinlichkeit auf die gleiche Weise die Routen getauscht. Ferner werden mit Hilfe der Mutations-Operatoren Gruppen bzw. Routen oder Kunden ausgesucht, die zu entfernen sind. Diese Schritte werden solange wiederholt bis einer der beiden Abbruchkriterien erfüllt sind: Entsprechend der Eingabeparametern *MaxNumberOfIndividuals* die Anzahl der Lösungen (in unserem Fall 5000) erreicht wurden oder aber, *MaxNumberOfIndividualsWithoutImprovement* falls in den letzten Berechnungen (in unserem Fall 2500) keine Verbesserungen mehr erzielt wurden. Abschließend werden die Lösungen mit denen aus der Anfangspopulation verglichen. Diese müssen besser sein als die schlechteste aus der Anfangspopulation. Damit wird die sog. Steady state²²⁴ (s. Seite 195) erreicht. Das bedeutet, dass die Anzahl der Lösungen immer gleich bleibt.

Pseudo-Code für dieses Szenario sieht folgendermaßen aus:

Parameters ← parameters.txt

LRP Problem Instances ← Prodhon-Instanzen

²²⁴Vgl. Gerdes I. et al. (2004): S.85 [38]

{Pseudo-Code Basic}

popsize \leftarrow desired population size

$P \leftarrow \{ \}$

for Population times **do**

$P \leftarrow P \cup \{ \text{new random individual} \}$

Best $\leftarrow \square$

for each individual $P_i \in P$ **do**

AssessFitness(P_i)

if Best = \square or Fitness(P_i) < Fitness(Best) **then**

Best $\leftarrow P_i$

{ Parent $P_a \leftarrow$ SelectWithTournament (P)

Parent $P_b \leftarrow$ SelectWithTournament (P) }

$P \leftarrow$ population

t tournament size, $t \geq 1$

Best individual picked at random from P with tournament

for i from 2 to t **do**

Next \leftarrow individual picked at random from P with tournament

if Fitness(Next) < Fitness(Best) **then**

Best \leftarrow Next

return Best

α ²²⁵ random value from 0 to 1

if $\alpha \leq P_{Two-Point\ Crossover}$ (P – Propability)

{ Children $C_a, C_b \leftarrow$ Two-Point Crossover(Copy(P_a), Copy(P_b)) }

else

{ Children $C_a, C_b \leftarrow$ CrossOverRouteExchange(Copy(P_a), Copy(P_b)) }

β ²²⁶ random value from 0 to 1

if $\beta \leq P_{Mutation\ close\ group}$

$C_a \leftarrow$ MutateCloseGroup (C_a)

$C_b \leftarrow$ MutateCloseGroup (C_b)

else

if $\beta \leq P_{Mutation\ close\ group} + P_{Mutation\ close\ route}$

$C_a \leftarrow$ MutateCloseRoute (C_a)

$C_b \leftarrow$ MutateCloseRoute (C_b)

else

$C_a \leftarrow$ MutateRemoveOneClient (C_a)

²²⁵Vgl. Luke S. (2013): S.42 [58]

²²⁶Ebenda


```
 $C_b \leftarrow \text{MutateRemoveOneClient}(C_b)$   
  
 $\text{AssessFitness}(C_a)$   
if  $\text{Fitness}(C_a) < \text{Fitness}(\text{Best})$  then  
   $\text{Best} \leftarrow C_a$   
   $\text{AssessFitness}(C_b)$   
if  $\text{Fitness}(C_b) < \text{Fitness}(\text{Best})$  then  
   $\text{Best} \leftarrow C_b$   
  { Individual  $P_d$   $\text{SelectForWorst}(P)$   
  Individual  $P_e$   $\text{SelectForSecondWorst}(P)$  }  
if  $\text{Fitness}(C_a) < \text{Fitness}(P_d)$  then  
   $P \leftarrow P \cup C_a$   
   $P \leftarrow P - P_d$   
if  $\text{Fitness}(C_b) < \text{Fitness}(P_e)$  then  
   $P \leftarrow P \cup C_b$   
   $P \leftarrow P - P_e$   
return Best
```

Als nächstes Szenario wird das *sdmdLRPpconfig_P* Modell untersucht. Zur Vergleichszwecken läuft das **AdL(e)R**[©] - Tool mit den gleichen Eingabeparametern. Die Instanzen werden für das Vorperiode Problem generiert und eingelesen. Im Anschluss werden die gleichen Schritte wie im *Szenario 0* wiederholt.

Pseudo-Code für das *Szenario 1* sieht folgendermaßen aus:

```
Parameters  $\leftarrow$  parameters.txt  
PLRP Instances  $\leftarrow$  generierte Instanzen für Vorperiode  
Weiter mit Pseudo-Code Basic für jede Periode  
  update with real demand after optimization
```

Als nächstes *Szenario 2* wird das *dsmdLRPpconfig* Modell untersucht. Zur Vergleichszwecken läuft das **AdL(e)R**[©] - Tool mit den gleichen Eingabeparametern. Die Instanzen werden für das Vorperiode Problem eingelesen. Im Anschluss werden für jede Periode (insgesamt 24) die gleichen Schritte wie im *Szenario 0* wiederholt. Anschließend werden die Optimierungsergebnisse mit den realen Bedarfen verglichen.

Pseudo-Code für das *Szenario 2* sieht folgendermaßen aus:

```
Parameters  $\leftarrow$  parameters.txt
```

PLRP Forecasted Problem Instances \leftarrow generierte Instanzen für Vorperiode
Weiter mit Pseudo-Code Basic für jede Periode
update with real demand after optimization

Als nächstes *Szenario 3* wird das *ddmdLRPpconfig* _ *M* untersucht. Zur Vergleichszwecken läuft das **AdL(e)R[©]** - Tool mit den gleichen Eingabeparametern. Die Instanzen werden für das Prognose (Forecast) Problem eingelesen. Im Anschluss werden für jede Periode (insgesamt 24) die gleichen Schritte wie im *Szenario 1* wiederholt. Anschließend werden die Optimierungsergebnisse mit den realen Bedarfen verglichen.

Pseudo-Code für das *Szenario 3* sieht folgendermaßen aus:

Parameters \leftarrow parameters.txt
PLRP Real Problem Instances
Weiter mit Pseudo-Code Basic für jede Periode

Als *Szenario 4* wird die *ddmdLRPsconfig* untersucht. Zur Vergleichszwecken läuft das **AdL(e)R[©]** - Tool mit den gleichen Eingabeparametern. Die Instanzen werden für die realen Bedarfe eingelesen. Ferner werden die geöffneten Depots aus dem *Szenario 3* als Initiallösung übernommen (preselect Depots). Im Anschluss werden für jede Periode (insgesamt 24) die gleichen Schritte wie im *Szenario 0* wiederholt (mit dem Unterschied allerdings, dass diesmal nur noch ein Crossover-Operator zu 100% (*crossoverRouteExchangeFixedDepots*) zur Anwendung kommt).

```
if (scenario ==4)
  read Parameters
  read PLRP Real Problem Instances
  preselect depots
  popsize  $\leftarrow$  desired population size
  P  $\leftarrow$  { }
for Population times do
  P  $\leftarrow$  P  $\cup$  {new random individual } - sequential _ insert _ fixedDepots
  Best  $\leftarrow$   $\square$ 
for each individual  $P_i \in P$  do
  AssessFitness( $P_i$ )
if Best =  $\square$  or Fitness( $P_i$ ) < Fitness(Best) then
  Best  $\leftarrow$   $P_i$ 
  { Parent  $P_a \leftarrow$  SelectWithTournament (P)
```

```
Parent  $P_b \leftarrow \text{SelectWithTournament}(P)$  }
P  $\leftarrow$  population
t tournament size,  $t \geq 1$ 
Best individual picked at random from P with tournament
for i from 2 to t do
    Next  $\leftarrow$  individual picked at random from P with tournament
if Fitness(Next) < Fitness(Best) then
    Best  $\leftarrow$  Next
return Best
    { Children  $C_a, C_b \leftarrow \text{Crossover}(\text{Copy}(P_a), \text{Copy}(P_b))$  }
apply crossoverRouteExchangeFixedDepots
if Fitness( $C_a$ ) < Fitness(Best) then
    Best  $\leftarrow C_b$ 
    AccessFitness( $C_b$ )
if Fitness( $C_b$ ) < Fitness(Best) then
    Best  $\leftarrow C_b$ 
    {  $C_a \leftarrow \text{Mutate}(C_a)$ 
       $C_b \leftarrow \text{Mutate}(C_b)$ 
      AssessFitness( $C_a$ ) }
     $\beta^{227}$  random value from 0 to 1
if  $\beta \leq P_{\text{Mutation close group}}$ 
    apply mutation close group
else
if  $\beta \leq P_{\text{Mutation close group}} + P_{\text{Mutation close route}}$ 
    apply mutation close route
else
    apply mutation remove one client
if Fitness( $C_a$ ) < Fitness(Best) then
    Best  $\leftarrow C_a$ 
    AssessFitness( $C_b$ )
if Fitness( $C_b$ ) < Fitness(Best) then
    Best  $\leftarrow C_b$ 
    { Individual  $P_d \leftarrow \text{SelectForWorst}(P)$ 
      Individual  $P_e \leftarrow \text{SelectForSecondWorst}(P)$  }
if Fitness( $C_a$ ) < Fitness( $P_d$ ) then
    P  $\leftarrow P \cup C_a$ 
```

²²⁷Vgl. Luke S. (2013): S.42 [58]

```
P ← P - Pd
if Fitness(Cb) < Fitness(Pe) then
  P ← P ∪ Cb
  P ← P - Pe
return Best
```

14.4 Auswertung der Ergebnisse

Vergleich der Fälle:

0.Fall: Statisches LRP mit deterministischen Nachfragen: **sdmdLRPsconfig**

1.Fall: Vorperiode: Dynamisch-stochastisches LRP mit periodischer Standortkonfiguration, einperiodischer Informationsnutzung: **dsmdLRPpconfig**

2.Fall: Forecast: Dynamisch-stochastisches LRP mit periodischer Standortkonfiguration, einperiodischer Informationsnutzung: **dsmdLRPpconfig**

3.Fall: Dynamisch-deterministisches LRP mit periodischer Standortkonfiguration, mehrperiodischer Informationsnutzung: **ddmdLRPpconfig_M**

4.Fall: Dynamisch-deterministisches LRP mit einmaliger Standortkonfiguration: **ddmdLRPsconfig**

Die Ergebnisse der Studie sind im [Anhang A.5](#) vorgestellt.

Die zu Beginn dieses Kapitels geäußerte Vermutung, dass der Fall 2 (Forecast) gegenüber dem Fall 1 (Vorperiode) besser abschneidet, kann bestätigt werden. Alle Instanzen liefern insgesamt um ca. 30 Mln.€ geringere Gesamtkosten, was insbesondere daran liegt, dass die Strafkosten insgesamt niedriger ausgefallen sind.

Allgemeiner Fazit:

- Allgemein:
 - 3.Fall (Dynamisch-deterministisches LRP mit periodischer Standortkonfiguration, mehrperiodischer Informationsnutzung: **ddmdLRPpconfig_M**) ist günstiger
 - 74 von insgesamt 90 untersuchten Instanzen haben die minimalen Gesamtkosten (GK) ergeben.
- Fahrzeugkapazität:
 - Bei größeren Fahrzeugen (150) sind die GK geringer als bei kleinen Fahrzeugen (70)
 - Bei Fall 2 –8% geringere Kosten als Fall 4!

- Depots
 - Bei 10 Depots höhere Kosten, als bei 5
 - Je weniger Depots, desto geringer der Unterschied zwischen Fall 4 und Fall 3, weil es weniger Auswahl an Konfigurationen für die Standorte gibt.
- Kunden
 - Je mehr Kunden, desto höher sind die Kosten, außer beim 3.Fall ($200 < 100$)
 - Beim Vergleich: je mehr Kunden, desto größer der Unterschied (in %)
- Cluster
 - Am günstigsten mit 2 Clustern
 - Am teuersten „verstreut“
- Zeitreihen
 - Aufgrund besserer Prognosen schneidet Fall 2 insgesamt im Vergleich zum Vorperioden Fall 1 besser ab.
 - Die Zeitreihe AK ist um 5% günstiger als der 4. Fall

Zusammenfassung:

Die Rechenergebnisse zeigen, dass das dynamisch-deterministisches LRP mit periodischer Standortkonfiguration und mehrperiodischer Informationsnutzung aufgrund seiner höchsten Flexibilitätsausprägung insgesamt am günstigsten ist. Bei den Instanzen mit 5 Depots ist manchen Fällen der 4. Fall mit einmaliger Depotkonfiguration besser. Hier liegt die Vermutung nah, dass der Algorithmus schneller die optimale Depotkonfiguration gefunden hat und somit mehr Zeit für die optimale Routenfindung hat.

Die Ergebnisse zeigen außerdem, dass bei größerer Anzahl von Depots höhere Kosten entstehen. Bei 10 Depots sind jedoch mehr Kunden zu bedienen, als bei 5 Depots. Werden die Kosten bei gleicher Anzahl der Kunden (100 Kunden) verglichen, sind in diesem Fall 10 Depots günstiger als 5.

Beim Kundenvergleich wächst hingegen der Unterschied mit der Anzahl der Kunden. Wenn wir aber genauer betrachtet, fällt auf, dass:

- Bei 1. und 2. Fall:

Mit zunehmender Anzahl der Kunden der Unterschied dann am größten ist, wenn die Anzahl der Depots gleich bleibt und die Fahrzeugkapazität 70 ME beträgt. Bei der Fahrzeugkapazität 150 in den Fällen mit 200 und 100 Kunden ist das Gegenteil der Fall. Bei 200 Kunden ist der Unterschied zum 3.Fall kleiner, als bei 100 Kunden.

- Bei 4. Fall:

Der kleinste Unterschied ist bei 100 Kunden und 5 Depots.

Wenn man die Resultate nach Anzahl der Cluster vergleicht, sieht man, dass am günstigsten der Fall mit 2 Clustern ist (alle Kunden werden an 2 Standorten platziert). Und am teuersten ist der Fall mit 0 Clustern (alle Kunden werden an einem Standort platziert, Standort Kunde = Standort Depot)

Bei dem Vergleich der Ergebnisse nach Fahrzeugkapazität fällt auf, dass die größere Fahrzeuge (150) insgesamt günstiger sind als die Kleinen mit 70 ME Kapazität. Hier werden weniger Fahrzeuge eingesetzt und insgesamt weniger Touren gefahren. Beim Vergleich der Scenarios wartet die größte Überraschung, nämlich dass der 2. Fall um 8% geringere Kosten liefert als der Fall 4. Hier fühlt sich der Autor in der These bestätigt, dass die Möglichkeit der dynamischen Konfiguration der Depots günstigen Einfluss auf die Gesamtkosten hat. Und, obwohl die Nachfrage nur periodenweise bekannt ist, im Vergleich zu 24 Perioden im Fall 4 fallen insgesamt geringere Kosten an. Somit ist die Qualität der Prognosen auch als sehr gut zu beurteilen.

Ein ähnliches Ergebnis erwartet uns beim Vergleich der Ergebnisse nach Zeitreihen. Die Zeitreihe mit einem additiven Trend und keiner Saisonalität ist um 5% günstiger als der Fall 4. Auch hier ist die Flexibilität bei der periodischen Standortwahl stärker ins Gewicht fällt als die Kenntnis über die Nachfragen des Gesamtplanungshorizontes.

Kapitel 15

Fazit und Vorschläge für weitere Forschungsarbeiten

In der heutigen Zeit hängt der wirtschaftliche Erfolg vieler Unternehmen nicht allein von den Verkaufszahlen ihrer Produkte und dem damit verbundenen Umsatz ab. Bei nahezu identischen Produkten entscheidet heutzutage immer häufiger der bessere Service den Wettbewerb. Dabei kann ein individueller Kundenservice bei der Kaufentscheidung sogar wichtiger sein als ein günstiger Preis. Die Logistikbranche hat das verstanden und reagiert mit neuen Serviceangeboten auf die gewachsenen Kundenansprüche. So trägt z. B. ein exzellenter Lieferservice zur Kundenzufriedenheit und deutlicher Differenzierung vom Wettbewerb bei. Nicht nur die Lieferzeit, sondern auch die Zuverlässigkeit, die Qualität und die Flexibilität der Lieferung spielen dabei eine wichtige Rolle.²²⁸

Lange Zeit galt, dass in hoch entwickelten Volkswirtschaften immer weniger Gütermengen für das makrologistische System erzeugt werden und das Transportaufkommen daher langsamer ansteigt als das Wirtschaftswachstum. Heute ist aufgrund der zunehmenden zwischenbetrieblichen Arbeitsteilung durch verstärktes Outsourcing in einigen hoch entwickelten Ländern von einer gegenläufigen Entwicklung auszugehen. Die Transportintensität, also die Transportleistung je produzierter Mengeneinheit, steigt für viele Güterarten an. Einzelne Teile oder Komponenten des Produktes werden auf unterschiedlichen Stufen der Wertschöpfungskette, z. B. durch Zwischenwerksverkehre, mehrfach transportiert.²²⁹ Die dadurch bereits etablierten Versorgungssysteme werden auf ihre Leistungsfähigkeit bzw. Effizienz hin überprüft und ggf. neu strukturiert. Dabei werden diejenigen Belieferungskonzepte in den Vordergrund treten, die ohne Änderung der bestehenden Strukturen, die noch kostensparenderen Alternative bieten können.

²²⁸<http://www.dhl-discoverlogistics.com/cms/de/course/origin/characteristics/service.jsp> [109]

²²⁹Vgl. Aberle G. (2003): S.1ff [1]

Die noch vor einigen Jahren mit Argwohn betrachteten kombinierten Standort- und Tourenplanungskonzepte, weil diese eine exakte Lösung von realen Problematiken innerhalb einer angemessenen Zeit schwierig machte²³⁰, gewinnen heutzutage immer mehr an Bedeutung, was vor allem an rasanter Entwicklungen der Computertechnologien und der Einführung schnellerer Prozessoren liegt. NP-schwere Optimierungsansätze, zu denen zweifelsohne auch PLRP gehören, lassen sich mittlerweile trotz ihrer Komplexität auf reale Probleme anwenden.

Als eingehende Analyse wurden in dieser Arbeit die statischen Methoden der kombinierten- und der sukzessiven Standort- und Tourenplanung miteinander verglichen. Als Vergleichsinstanzen wurden die modifizierte Prodon-Instanzen verwendet. Als Gesamtergebnis konnten die meisten Instanzen bei einem LRP niedrigere Gesamtkosten aufweisen als bei den sukzessiven Verfahren. Allerdings könnte dabei noch Folgendes optimiert werden: Es werden nur so viele Fahrzeuge eingesetzt, dass die Kapazität ausreicht, um die Nachfrage der Kunden bedienen zu können. Eventuelle Einsparungen durch das Einsetzen von einem weiteren Fahrzeug werden nicht berücksichtigt. Des Weiteren werden so viele Depots eröffnet, dass die Nachfrage der Kunden bedient werden kann. Eventuelle Einsparungen durch ein weiteres Depot werden auch hier nicht berücksichtigt. Es soll außerdem überlegt werden, ob zeitliche Restriktionen für die Fahrzeuge eingeführt werden sollten, da die Lenkzeiten der Fahrer eingehalten werden müssen. Die Implementierung einer begrenzten und heterogenen Fahrzeugflotte könnte ebenfalls in Erwägung gezogen werden.

Die simultane Betrachtung von strategischen und taktischen Problemstellungen gepaart mit stochastischen Nachfragen machen die dynamischen LRP erst recht interessant für Logistikdienstleister. Es kommt in diesem Fall insbesondere auf die Qualität und Genauigkeit der Prognosen an. Im Rahmen dieser Arbeit konnte u.a. gezeigt werden, dass relativ einfache Verfahren der exponentiellen Glättung bessere Ergebnisse liefern als kompliziertere Methoden. Das von Hyndman aufgezeigte automatische Prognoseverfahren auf Basis von Glättungsmethoden integriert eine Vielzahl von Methoden, um einen flexiblen Einsatz entsprechend verschiedener Zeitreihencharakteristiken zu gewährleisten. Entsprechend dieser Erkenntnis erschien der Einsatz des ETS-Systems von Hyndman in dieser Arbeit als vorteilhafter gegenüber den komplexen ARIMA-Verfahren. Für weitere Forschungsarbeiten wäre es trotzdem von Interesse, die ARIMA-Methoden zu implementieren. Allerdings ist die Implementierung eines ARIMA-Verfahrens grundsätzlich mit einem erheblich höheren Aufwand verbunden.²³¹ Im Rahmen der Modellauswahl sind komplexe statistische Prozeduren erforderlich, wie beispielsweise Tests zur Bestimmung der Einheitswurzel, zur Überprüfung der Stationaritätsbedingung und zur Erfassung der Zeitreihencharakteristik. Die Implementierung eines solch komplexen mathematischen Modells ist mit erheblichen Risiken im Rah-

²³⁰Vgl. Nagy G. et al. (2007): S.650 [63]

²³¹Vgl. Wildemann H. (2004): S.77 [97]

men einer Modellvalidierung verbunden, da bereits kleine Systemfehler zu einer erheblichen Absenkung der Prognosegüte führen können.²³²

Das im Zuge dieser Arbeit entwickelte Optimierungstool **AdL(e)R**[©] nutzt die genetischen Algorithmen zur Lösung von Optimierungsproblemen. Genetische Algorithmen gehören, wie im Kapitel 8 erläutert, zu den evolutionären Verfahren. Diese bieten zum einen die Möglichkeit, aus einer zuvor definierten Anzahl der Populationen (*PopulationSize*) eine Menge von Lösungen zu finden, mit denen der n -dimensionale Lösungssuchraum besser durchsucht werden kann, um mögliches lokale Minimum zu umgehen. Zum anderen bietet uns die Anwendung von einem *explorativer*²³³ Variationsoperator, wie Two-Point-Crossover den Vorteil, dass die Chromosomlänge erheblich kleiner ist im Vergleich z.B. zu einem One-Point-Crossover. Die angewendete Tournament-Selection (*Wettkampfselection*)²³⁴ zeichnet sich dadurch aus, dass die Chromosomen zufällig aus einer Population gewählt werden und nicht streng von der Fitness bestimmten Wahrscheinlichkeit. Damit lässt sich der Lösungssuchraum weiter eingrenzen. Die angewandte Steady State Reproduktion sorgt dafür, dass nur die für die Anwendung eines genetischen Operators notwendige Anzahl von Chromosomen zufällig gezogen wird. Auf sie wird der entsprechende Operator angewendet und die veränderten Chromosomen werden unverzüglich wieder in die Originalpopulation eingesetzt.²³⁵ Das aufeinander angepasste „Zusammenspiel“ der im **AdL(e)R**[©] eingesetzten explorativen und exploitativen Operatoren (*Mutationen*) lieferte gute und nachvollziehbare Ergebnisse bei durchgeführten Optimierungsschritten. Eine weitere Verbesserung der Ergebnisse bei größeren Instanzen könnte man beim Einsatz von evolutionären Algorithmen, wie hybride genetische Algorithmen (*memetic algorithms*), erwarten. Bei memetic algorithms wird ein genetischer Algorithmus mit einer lokalen Suche verbunden. Diese lässt sich für jedes Individuum parallel durchführen, da für eine Suche keine Informationen außer der Probleminstanz und dem Individuum benötigt werden. Außerdem wird bei hybriden genetischen Algorithmen ein Diversifikationsmechanismus eingeführt: Falls die Individuen in der Population zu ähnlich sind, wird das beste Individuum der Population beibehalten und alle anderen mutiert und dann lokal optimiert.²³⁶

Im weiteren Verlauf der Arbeit wurden zwei alternativen Zeilengenerierungsverfahren zur Bestimmung der unteren Schranken (=Lower Bounds) für die Beurteilung der Güte von heuristischen Lösungen bei einem statischen kapazitierten LRP-Modell mit Benchmark-Lösungen verglichen. Die im AMPL erfolgte Programmierung lieferte jedoch leider noch keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Erst nach erfolgter Relaxation von festgelegten Restriktionen konnten bessere GAPs erreicht werden. Einstellige Werte wurden jedoch nur

²³²Vgl. Bobb L.-M. (2008): S.108 [14]

²³³Vgl. Luke S. (2013): S.22 [58]

²³⁴Vgl. Gerdes I. et al. (2004): S.84 [38]

²³⁵Vgl. Gerdes I. et al. (2004): S.85 [38]

²³⁶Vgl. Blom S. (2003): S.10 [13]; Prodhon C. et al. (2008): S.1ff [72]; Sörensen K. et al. (2004): S.1ff [87]

noch für Instanzen mit 20 Kunden erreicht werden. Für weitere Instanzen liegen die GAPs im unteren zweistelligen Bereich. Außerdem brach der Algorithmus aufgrund des fehlenden Speicherplatzes in AMPL frühzeitig ab. Somit wurden die unteren Schranken nur noch für Instanzen bis 100 Kunden ermittelt. Die Instanzen mit 200 Kunden wurden mithilfe des GUROBI-Solvers gelöst. Für weitere Forschungsarbeiten wurden ferner die Zeilengenerierungsverfahren für Modelle der dynamischen LRP modifiziert. Die zur Verfügung stehenden Rechenkapazitäten reichten allerdings noch nicht aus, um diese abschließend zu bewerten. Als Lösungsvorschlag gilt hier, die Programmierung in einer anderen Programmiersprache, wie z.B. C++, vorzunehmen, um die „guten“ unteren Schranken auch für dynamische Modelle zu errechnen.

Anschließend wurden erstmalig die mathematischen Modelle der dynamischen LRP (PLRP) formuliert und mithilfe der zuvor generierten Instanzen miteinander verglichen. Dabei wurden Zeitreihen mit KK- (kein Trend, keine Saisonalität), KA- (kein Trend, additive Saisonalität) und AK- (additiver Trend, keine Saisonalität) getestet.

Zum einen hat sich die Vermutung bestätigt, dass die Gesamtkosten im Forecast-Fall (Bedarfsprognose über 24 Monate) erheblich geringer ausfallen als beim Vorperiode-Fall (Nachfrage der letzten Periode bekannt). Das liegt in erster daran, dass die Prognosen mit integrierten Zeitreihen genauer ausfallen und somit für zu wenig gelieferten Mengen geringere Strafen anfallen. Allerdings werden je nach Zeitreihe auch die Ergebnisse mit unterschiedlichen Ausprägungen ausfallen.

Zum anderen lieferte das dynamisch-deterministische LRP-Modell mit periodischer Konfiguration der Standorte aufgrund seiner höchsten Flexibilitätsausprägung im allgemeinen Vergleich bei 74 von 90 getesteten Instanzen die besten Lösungen bzw. Lösungen mit geringsten Kosten. Beim *ddmdLRPconfig_M* kann die Entscheidung darüber, welche Depots betrieben werden in jeder Periode des Planungshorizonts getroffen werden. Somit ist die Standortentscheidung diskret. Die Option der periodischen Zusammenstellung der Depots gibt dem Netzwerkplaner eine größere Flexibilität. Die Kundennachfragen sind für jede Periode gegeben (deterministisch) und variieren zwischen den einzelnen Perioden. Allerdings führt in den Fällen mit unbekanntem Bedarfsnachfragen die Integration des ETS-Systems von Hyndman zu besseren Standortentscheidungen

Abschließend lässt sich sagen, dass die Betrachtung der dynamischen LRP mit stochastischen Nachfragen trotz des im Vergleich zu anderen Methoden erhöhten Planungsaufwandes und somit evtl. verbundenen höheren Kosten für die Zukunft sehr gute Planungsalternativen und praktische Anwendungen bietet. Mit der weiteren Entwicklung der EDV-Unterstützung werden heuristische Lösungen in akzeptabler Rechenzeit auf immer größere Instanzen, sprich Depots, Kunden, Bedarfe anzuwenden sein. Mit der Verbesserung und Implementierung von genaueren Prognoseverfahren wird auch die Betrachtung längerer Planungsperioden möglich sein. Einer der Praxisanwendungen würde z.B. die Er-

weiterung der Probleminstanzen auf den Umwelt-Faktor zur Berechnung des anfallenden CO_2 -Ausstoßes. Dabei ist es denkbar, die Zielfunktion durch die Reduzierung der Summe der gefahrenen Strecken zu ersetzen.

Denkbar für einen praktischen Ansatz wäre auch die Einführung unterschiedlicher Fahrzeugtypen, Zeitfenster und Erweiterung der Probleminstanzen um zusätzliche Faktoren, wie Gewicht, Volumen oder Anzahl der Parkplätze bei Belieferung von z.B. Schnellrestaurants etc.

Literaturverzeichnis

- [1] **Aberle G. (2003):** *Transportwirtschaft: Einzelwirtschaftliche und gesamtwirtschaftliche Grundlagen*, In: Wolls Lehr- und Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften, Woll A. (Hrsg.), 4.Auflage, München, Wien, Oldenbourg Verlag.
- [2] **Adam D. (2001):** *Produktionsmanagement*, 9.Auflage, Wiesbaden, Betriebswirtschaftlicher Verlag, Dr. Th. Gabler.
- [3] **Ahn J. (Februar/2008):** *The Generalized Location Routing Problem with Profits for Planetary Surface Exploration and Terrestrial Applications*, Hg. v. Massachusetts Institute of Technology, PhD.
- [4] **Albareda-Sambola M. (2003):** *Models and Algorithms for Location – Routing and Related Problems*, Universitat Politecnica de Catalunya, PhD.
- [5] **Angelelli E., Speranza M.G. (2002):** *The periodic vehicle routing problem with intermidate facilities*, In: European Journal of Operational Research (137 (2)), S.33–247.
- [6] **Armstrong J.-S., Lusk E.-J. (1983):** *Commentary on the Makridakis Time Series Competition (M-Competition)*, In: International Journal of Forecasting, Vol.2.
- [7] **Assimakopoulos V., Nikokopoulos K. (2000):** *The theta model: a decomposition approach to forecasting*, In: International Journal of Forecasting, Vol.16.
- [8] **Balakrishnan A., Ward J.E., Wong R.T. (1987):** *Integrated Facility Location and Vehicle Routing Models. Recent Work and Future Prospects*, In: American Journal of Mathematical and Management Science, Vol.7, S.35–61.
- [9] **Baldacci R., Mingozzi A., Wolfler C.R. (2011):** *An Exakt Method for the Capacitated Location-Routing Problem*, In: Operations Research, Vol.59, No.5, S.1284-1296.
- [10] **Baretto S.S. (2004):** - *Análise e Modelização de Problemas de localização-distribuição* (Analysis and modelization of location-routing problems)(in Portuguese), University of Aveiro, campus universitário de Santiago, Aveiro, Portugal, PhD thesis.
- [11] **Belenguer J.-M., Benavent E., Prins C., Prodhon C., Wolfer C.R. (2011):** *A Branch-and-Cut method for the Capacitated Locatio-Routing Problem*, In: Computers & Operations Research, Vol.38, S.931–941.

- [12] **Betz G. (2004):** *Prediction or Prophecy: The Boundaries of Economic Foreknowledge and Their Socio-Political Consequences*, Wiesbaden, Deutscher Universitätsverlag.
- [13] **Blom S. (2003):** *Memetischen Algorithmen - Ein Überblick, Seminar im Rahmen der Projektgruppe 431 Metaheuristiken*, Universität Dortmund
- [14] **Bobb L.-M. (2008):** *A Markov Chains based transition matrices approach to forecasting airline seat demand*, The City University of New York, ProQuest LLC, Dissertation.
- [15] **Bruns A.D. (1998):** *Zweistufige Standortplanung unter Berücksichtigung von Tourenplanungsaspekten*, Universität St. Gallen, Dissertation.
- [16] **Christofides N., Beasley J.E. (1984):** *The Period Routing Problem*, In: *Networks*, Vol.14, S.237–256.
- [17] **Christofides N., Mingozzi A., Toth P. (1979):** *The Vehicle Routing Problem*, In: *Combinatorial Optimization*, S.315–338.
- [18] **Clarke G., Wright J.W. (1964):** *Scheduling vehicles from a central delivery depot to a number of delivery points*, In: *ORQ* (12), S.568–581.
- [19] **Clemen T. (2001):** *Simple versus complex methods*, In: *International Journal of Forecasting*, Vol.15.
- [20] **Coene S., Arnout A., Spieksma F.C.R. (2008):** *The Periodic Vehicle Routing Problem: A Case Study*, Katholieke Universiteit Leuven, Faculty of Business and Economics, S.1-15 Online verfügbar unter https://feb.kuleuven.be/public/n05012/KBI_0828.pdf, zuletzt geprüft am 10.12.2014.
- [21] **Conway E. (2011):** *50 Schlüsselideen Wirtschaftswissenschaft*, Spektrum Akademischer Verlag
- [22] **Cordeau J.F., Gendreau M., Laporte G. (1997):** *A Tabu Search Heuristic for Periodic and Multi-Depot Vehicle Routing Problem*, In: *Networks* (30), S.105–119.
- [23] **Crone S.F. (2010):** *Neuronale Netze zur Prognose und Disposition im Handel*, Wiesbaden, Gabler Verlag.
- [24] **Dantzig G.B., Ramser R.H. (1959):** *The Truck Dispatching Problem*, In: *Management Science*, Vol.6, S.80–91.
- [25] **DeLurgio S.A. [SR.] (1998):** *Forecasting Principles and Applications*, New York, Irwin McGraw-Hill.
- [26] **Domschke W., Scholl A. (2010):** *Logistik: Rundreisen und Touren*, 5.Auflage, München: Oldenbourg (2).

- [27] **Domschke W. (Hg.) (1997):** *Logistik: Rundreisen und Touren*, 4.Auflage, 3 Bände, München: Oldenbourg (2).
- [28] **Domschke W. (Hg.) (2007):** *Logistik: Transport*, 5.Auflage, 3 Bände, München: Oldenbourg (1).
- [29] **Domschke W., Drexl A. (Hg.) (1996):** *Logistik: Standorte*, 4.Auflage, 3 Bände, München: Oldenbourg (3).
- [30] **Domschke W., Drexl A. (2005):** *Einführung in Operation Research*, Springer (Lehrbuch).
- [31] **Duhamel C., Lacomme P., Prins C., Prodhon C. (2008):** *A Memetic Approach for the Capacitated Location Routing Problem*, In: EU/MEeting 2008, Vol.37, S.1912–1923.
- [32] **Duhamel C., Lacomme P., Prins C., Prodhon C. (2010):** *A GRASPxELS approach for the capacitated location-routing problem*, In: Computers & Operations Research, Vol.37, S.1912–1923.
- [33] **Eckey H.F., Kosfeld R., Türck M. (2008):** *Deskriptive Statistik: Grundlagen.- Methoden – Beispiele*, 5.Auflage, Wiesbaden, Gabler Verlag.
- [34] **Engle G. (1980):** *Simultane Standort- und Tourenplanung*, Bundeswehr Hamburg, Köln. Wirtschafts- Organisationswissenschaften.
- [35] **Falkenauer E. (1998):** *Genetic Algorithms and Grouping Problems*, Wiley.
- [36] **Fitzsimmons J.A., Fitzsimmons M.J. (2006):** *Service Management*, New York, McGraw-Hill/Irwin.
- [37] **Gendreau M., Laporte G., Seguin R. (1995):** *An Exact Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands and Customers*, In: Transportation Science (29 (2)), S.143–155.
- [38] **Gerdes I., Klawonn F., Kruse R. (2004):** *Evolutionäre Algorithmen*, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden
- [39] **Goldberg D.E. (1989):** *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, The University of Alabama: Addison-Wesley.
- [40] **Grünert T., Irnich S. (2005):** *Optimierung im Transport. Grundlagen*, 2 Bände, Aachen, Shaker.
- [41] **Guerra I., Murino T., Romano E. (2007):** *A Heuristic Algorithm for the Constrained Location-Routing Problem*, International Journal of Systems Applications, Engineering & Development, Vol.1, No.4
- [42] **Günther H.-O., Tempelmeier H. (2009):** *Produktion und Logistik*, 8.Auflage, Berlin, Springer.
- [43] **Hansmann K.-W. (2006):** *Industrielles Management*, 8.Auflage, München, Oldenbourg.

- [44] **Hassanzadeh A., Dadgostari F., Zolfagharinia H. (2009):** *Location-Routing Problem*, In: Farahani R.Z., Hekmatfar M. (Hrsg.): *Facility Location: Concepts, Models, Algorithms and Case Studies*, Berlin/Heidelberg, S.395-419.
- [45] **Herpes S. (2009):** *Dynamische Losgrößenplanung bei stochastischer Nachfrage*, Köln, Kölner Wissenschaftsverlag.
- [46] **Heuer J. (2013):** *Das Multiprocessor Scheduling-Problem mit reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten*, Springer Verlag, Taschenbuch
- [47] **Holland J.H. (1975):** *Adaptation in Natural and Artificial Systems. Introductory Analysis with Applications to Biology, control and Artificial Intelligence*, The University of Michigan Press.
- [48] **Hyndman R.-J., Koehler A.-B., Snyder R.-D., Grose S. (2000):** *A State Space Framework for Automatic Forecasting Using Exponential Smoothing Methods*, Working Paper, Monash University, Department of Econometrics and Business Statistics.
- [49] **Hyndman R.-J., Billah B. (2003):** *Unmasking the Theta method*, In: *International Journal of Forecasting*, Vol.19.
- [50] **Hyndman R.-J., Koehler A.B., Ord J.K., Snyder R.D. (2008):** *Forecasting with Exponential Smoothing, The State Space Approach*, Berlin, Springer Verlag.
- [51] **Kellerer H., Pferschi U., Pisinger D. (2004):** *Knapsack Problems*, München, Wien, Springer Verlag
- [52] **Klaus P.; Krieger W. (2008):** *Gabler Lexikon Logistik. Management logistischer Netzwerke und Flüsse*, 4.Auflage, Wiesbaden, Gabler, S.427
- [53] **Kost B. (2003):** *Optimierung mit Evolutionsstrategien*, Frankfurt, Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutsch GmbH.
- [54] **Laporte G., Dejax P.J. (1989):** *Dynamic Location-Routing Problems*, In: *Journal of the Operational Research Society* (40(5)), S.471–482.
- [55] **Laporte G. (Hg.) (1988):** *Vehicle Routing: Methods and Studies. Location-Routing Problems*, In: Bruce L., Golden und Arjang Assad (Hg.), Amsterdam, Elsevier Science Publishers, S.163-197
- [56] **Laporte G., Louveaux F., Mercure H. (1989):** *Models and exact solutions for a class of stochastic location-routing problems*, In: *European Journal of Operational Research*, Vol.39, S.71–78.
- [57] **Laporte G., Nobert Y., Arpin D. (1986):** *An exact algorithm for solving a capacited Location-Routing Problem*, In: *Annals of Operations Research*, Vol.6, S.293-310

- [58] **Luke, Sean (2013)**: *Essential of Metaheuristics*, 2. Auflage, George Mason University, URL: <http://cs.gmu.edu/~sean/book/metaheuristics/Essentials.pdf>
- [59] **Makridakis S., Hibon M. (2000)**: *The M3 Competition: results, conclusions and implications*, In: International Journal of Forecasting, Vol.16.
- [60] **Mertens P., Backert K. (1980)**: *Vergleich und Auswahl von Prognoseverfahren für betriebswirtschaftliche Zwecke*, In: Zeitschrift für Operations Research, Band 24.
- [61] **Min H., Jayaraman V., Srivastava R. (1998)**: *Combined location-routing problems: A synthesis and future research directions*, In: European Journal of Operational Research, Vol.108, S.1–15.
- [62] **Nadizadeh A., Sahraeian R., Ali S., Homayouni S.M. (2011)**: *Using greedy clustering method to solve capacitated location-routing problem*, In: African Journal of Business Management, Vol.5, No.17, S.7499–7506
- [63] **Nagy G., Salhi S. (2007)**: *Location Routing: Issues, models and methods*, In: European Journal of Operational Research, Vol.177, S.649–672
- [64] **Pankratz G. (2005)**: *A Grouping Genetic Algorithm for the Picking and Delivery Problem with Time Window*, In: OR Spectrum, Band 27, S.21–41
- [65] **Papageorgiou M., Leibold M., Buss M. (2012)**: *Optimierung: Statische, dynamische, stochastische Verfahren für die Anwendung*, Berlin, Heidelberg, Springer Verlag
- [66] **Pearson K. (1905)**: *The Problem of the Random Walk*, In: Nature 72, Nr.1865 online: www.nature.com/nature/journal/v72/n1865/pdf/07229460.pdf
- [67] **Pfeifer T., Schmitt R. (2006)**: *Autonome Produktionszellen: Komplexe Produktionszelle flexibel automatisieren*, Berlin, Gabler Verlag
- [68] **Pirkwieser S., Raidl G R. (2010)**: *Variable Neighborhood Search Coupled with ILP-based Very Large Neighborhood Searches for the (Periodic) Location-Routing Problem*, In: Günther R. u.a. (Hg.): Hybrid Metaheuristics, Wien, S.174-189
- [69] **Prins C., Prodhon C., Ruiz A., Soriano P., Wolfler C.R.(2007)**: *Solving the Capacitated Location-Routing Problem by a Cooperative Lagrangean Relaxation-Granular Tabu Search Heuristic*, In: Transportation Science, Vol.41, No.4, S.470–483
- [70] **Prins C., Prodhon C., Wolfler C.R. (2006)**: *Solving the capacitated location-routing problem by GRASP Complemented by a learning process and path relinking*, In: 4OR - A Quarterly Journal of Operations Research, Vol.4, No.3, S.221–238
- [71] **Prodhon C. (2007)**: *A Metaheuristic for the Periodic Location-Routing Problem*, In: Operations Research Proceedings, S.159–164

- [72] **Prodhon C., Prins C. (2008)**: *A Memetic Algorithm with Population Management (MAIPM) for the Periodic Location-Routing Problem*, In: Lecture Notes in Computer Science (5296), S.43–57
- [73] **Prodon C. (2009)**: *An ELSxPath Relinking Hybrid for the Periodic Location-Routing Problem*, In: Lecture Notes in Computer Science (5818), S.15–29.
- [74] **Prodhon C. (2011)**: *A hybrid evolutionary algorithm for the Periodic Location-Routing Problem*, In: European Journal of Operational Research, 210(2), S.204-212
- [75] **Reeves C. (2010)**: *Handbook of Metaheuristics*, Second Edition: Springer (International Series in Operations Research & Management Science), Vol.146, S.109-140.
- [76] **Renaud J., Laporte G., Boctor F.F. (1996)**: *A Tabu Search Heuristic for the Multi-Depot Vehicle Routing Problem*, In: Computers & Operations Research, Vol.23, No.3, S.229–235.
- [77] **Ropke S., Pisinger D. (2006)**: *An adaptive large neighborhood search heuristic for the pickup and delivery problem with time windows*, In: Transportation Science, Vol.40, No.4, S.455–472.
- [78] **Salhi S., Rand G.K. (1989)**: *The effect of ignoring routes when locating depots*, In: European Journal of Operational Research, Vol.39, S.150–156.
- [79] **Schipior D. (2013)**: *Transport- und Tourenplanung. Verfahren und Software zur Lösung komplexer Tourenplanungsprobleme*, Hamburg, Diplomica Verlag GmbH.
- [80] **Schira J. (2005)**: *Statische Methoden der VWL und BWL*, 2.Auflage, München, Pearson Studium.
- [81] **Schöneburg E., Heinzmann F., Feddersen S. (1994)**: *Genetische Algorithmen und Evolutionsstrategien. Eine Einführung in Theorie und Praxis der simulierten Evolution*, 1.Auflage, Addison-Wesley.
- [82] **Schulte G. (1996)**: *Material- und Logistikmanagement*, München, R. Oldenbourg.
- [83] **Schulte G. (2001)**: *Material- und Logistikmanagement*, 2. wesentlich erweiterte und verbesserte Auflage, München, Wien, R. Oldenbourg.
- [84] **Schulte C.-S. (2005)**: *Logistik: Wege zur Optimierung der Supply Chain*, 4.Auflage, München, Verlag Franz Vahlen.
- [85] **Secomandi N. (2001)**: *A Rollout Policy for the Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands*, In: Operations Research (49(5)), S.796–802.
- [86] **Serafini P. (1985)**: *Mathematics of multi objective optimization. A unified approach for scalar and vector optimization*, In: International Center for Mechanical Sciences, No.289, S.101

- [87] **Sörensen K., Sevaux M. (2004):** *MA/PM: Memetic algorithms with population management*, online: <http://uahost.uantwerpen.be/eume/workshops/hybrid/A045Revised.pdf> letzter Zugriff am 08.12.2014
- [88] **Sule D.R. (2001):** *Logistics of Facility Location and Allocation*, New York, Marcel Dekker Inc.
- [89] **Tan C., Beasley J.E. (1984):** *A Heuristic Algorithm for the Period Vehicle Routing Problem*, In: *International Journal of Management Science* (12(5)), S.497–504.
- [90] **Tempelmeier H. (2005):** *Bestandsmanagement in Supply Chains*, Köln, Norderstedt, Books on Demand.
- [91] **Tempelmeier H. (2008):** *Materiallogistik: Modelle und Algorithmen für die Produktionsplanung und -steuerung in Advanced Planning Systems*, 7.Auflage, Berlin, Springer.
- [92] **Toth P., Vigo D. (2002):** *The Vehicle Routing Problem*, In SIAM: Society for Industrial and Applied Mathematics
- [93] **Vahrenkamp R., Mattfeld D.C. (2007):** *Logistiknetzwerke: Modelle für Standortwahl und Tourenplanung*, 1.Auflage, Wiesbaden, Gabler Verlag.
- [94] **Vahrenkamp R., Siepermann C. (2007):** *Logistik: Management und Strategien*, 6. überarbeitete und erweiterte Auflage, München, Oldenbourg.
- [95] **Vahrenkamp R. (2003):** *Quantitative Logistik für das Supply Chain Management*, 1.Auflage, München, Oldenbourg.
- [96] **Wendt O. (1995):** *Tourenplanung durch Einsatz naturanaloger Verfahren: Integration von Genetischen Algorithmen und Simulated Annealing*, Wiesbaden, Gabler Verlag.
- [97] **Wildemann H. (2004):** *Zeitschrift für Betriebswirtschaftslehre*, Wiesbaden, Gabler Verlag.
- [98] **Wu T.-H., Low C., Bai J.-W. (2002):** *Heuristic solutions to multi-depot location- routing problems*, In: *Computer & Operations*, Band.29, S.1393–1415.
- [99] **Zimmermann H.-J. (2008):** *Operations Research: Methoden und Modelle. Für Wirtschaftsingenieure, Betriebswirte, Informatiker*, 2.Auflage, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden
- [100] **Zwerenz K. (2006):** *Statistik: Datenanalyse mit Excel und SPSS*, 3.Auflage, München, Oldenbourg Verlag.

Internetquellen:

- [101] <http://de.statista.com/themen/733/transport-und-logistik/#chapter2>, zuletzt geprüft am 15.07.2013
- [102] <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/6346/umfrage/anteil-der-logistikkosten-an-den-gesamtkosten>, zuletzt geprüft am 15.07.2013
- [103] <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/12195/umfrage/anteil-der-lkw-am-gueterverkehr-in-deutschland/>, zuletzt geprüft am 15.07.2013
- [104] Orklaert.de. Online verfügbar unter <http://www.orklaert.de/konstruktionsheuristiken.php>, zuletzt geprüft am 20.11.2014.
- [105] <http://comopt.ifi.uni-heidelberg.de/software/TSPLIB95/>, zuletzt geprüft am 03.12.2014
- [106] Barreto S.S.: http://sweet.ua.pt/~iscf143/_private/SergioBarretoHomePage.htm, zuletzt geprüft am 03.12.2014
- [107] Prodhon C.: <http://prodhonc.free.fr/homepage>, zuletzt geprüft am 03.12.2014
- [108] Dorronsoro D.B.: <http://neo.lcc.uma.es/radi-aeb/WebVRP/> umgezogen auf: <http://www.bernabe.dorronsoro.es/vrp/>, zuletzt geprüft am 03.12.2014
- [109] <http://www.dhl-discoverlogistics.com/cms/de/course/origin/characteristics/service.jsp>, zuletzt geprüft am 05.12.2014
- [110] <http://prodhonc.free.fr/Instances/Format.txt>, zuletzt geprüft am 09.12.2014

Anhang A

A.1 Eingabemaske Excel - Tool (Eigene Darstellung)

Variablen		
Objekt	Min	Max
Kapazität je Transportmittel	70	150
Kapazität je Depot 5	4	6
Kapazität je Depot 10	4	6
Kapazität je Depot 20	4	6
Kapazität je Depot 40	4	6
Bedarf Kunden	10	20
Eröffnungskosten je Depot	8000	15000
Kosten je Transportstrecke	1000	
Kosten	0	

Kunden				
Cluster	Achse	Min	Max	
1	X	1	10	
1	Y	1	50	
2	X	1	50	
2	Y	40	50	
3	X	40	50	
3	Y	1	50	
4	X	1	50	
4	Y	1	10	

Kunden zurücksetzen

Depots				
Cluster	Achse	Min	Max	
1	X	1	50	
1	Y	1	50	
2	X	1	50	
2	Y	1	50	
3	X	1	50	
3	Y	1	50	
4	X	1	50	
4	Y	1	50	

Depots zurücksetzen

A.2 Modell - Instanzen von Caroline Prodhon (Eigene Darstellung)

		200-10-3 200-10-3b	200-10-2 200-10-2b	200-10-1 200-10-1b	100-10-3 100-10-3b	100-10-2 100-10-2b	100-10-1 100-10-1b
Kunden Depots		200 10	200 10	200 10	100 10	100 10	100 10
Fahrzeugkapazität		70 (200-10-3) 150 (200-10-3b)	70 (200-10-2) 150 (200-10-2b)	70 (200-10-1) 150 (200-10-1b)	70 (100-10-3) 150 (100-10-3b)	70 (100-10-2) 150 (100-10-2b)	70 (100-10-1) 150 (100-10-1b)
Transportkosten		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Depots: Eröffnungskosten	1	87.724	113.643	106.139	53.307	46.382	55.929
	2	119.186	122.606	71.504	48.198	54.917	53.094
	3	113.217	119.472	113.683	49.141	51.287	53.842
	4	82.534	74.099	88.508	43.129	49.367	47.865
	5	120.402	115.071	81.410	59.724	44.212	47.995
	6	79.185	126.029	76.197	57.221	50.457	57.991
	7	106.119	116.192	124.443	44.009	55.271	55.903
	8	104.138	92.628	112.616	52.429	52.516	51.308
	9	104.138	124.463	107.240	50.925	48.721	49.140
	10	104.138	109.765	102.347	43.853	57.295	59.082
Depots: Koordinaten (x,y) & Kapazitäten (K)	1	x y K 14 28 980	x y K 9 18 910	x y K 9 36 1.190	x y K 13 47 490	x y K 2 45 490	x y K 2 10 490
	2	29 35 910	7 39 910	39 46 910	14 2 420	27 37 560	18 44 420
	3	1 28 1.050	22 18 980	46 20 910	43 14 490	38 16 560	49 8 420
	4	12 30 1.120	30 22 1.260	42 8 1.050	23 46 560	41 10 490	24 29 490
	5	43 34 1.050	43 28 980	41 3 980	17 33 560	41 40 490	18 24 560
	6	14 26 980	46 6 980	47 6 1.190	23 8 560	16 11 560	14 12 490
	7	30 43 980	3 39 1.260	33 37 1.120	13 4 420	17 12 560	4 39 490
	8	7 32 1.050	46 36 980	25 24 1.120	19 27 560	45 45 490	32 30 490
	9	4 28 1.190	38 26 980	10 2 1.190	24 40 490	21 32 420	7 29 420
	10	6 34 1.120	34 33 910	12 46 1.050	27 15 490	21 47 490	40 48 560
Kunden: Koordinaten (x,y) & Nachfrage (N)	1	x y N 7 11 11	x y N 4 24 18	x y N 18 4 16	x y N 9 5 12	x y N 21 13 16	x y N 12 38 14
	2	18 14 11	17 17 13	49 45 16	3 17 16	12 24 18	32 17 19
	3	24 15 13	22 22 17	14 4 11	17 14 17	12 25 15	29 12 16
	4	5 5 20	19 10 18	25 17 15	12 21 19	25 25 19	25 20 18
	5	4 11 16	17 28 18	10 1 14	14 4 20	24 7 14	2 30 16
	6	2 18 12	24 20 15	10 28 12	4 10 11	25 12 18	31 46 14
	7	11 8 11	11 15 16	50 12 19	12 11 11	3 21 13	5 13 18
	8	12 3 19	7 19 12	46 49 13	7 14 11	12 1 11	13 36 12
	9	21 19 12	9 19 14	42 16 18	12 19 13	9 6 13	38 6 14
	10	14 9 18	24 6 11	39 50 17	2 11 19	16 8 13	29 11 20
	11	25 17 12	1 17 12	11 23 19	15 20 12	24 9 16	38 47 19
	12	25 16 15	20 8 17	50 12 14	8 13 18	14 8 13	9 47 20
	13	11 19 19	7 10 17	32 12 11	9 15 14	5 21 18	11 18 19
	14	12 4 15	15 8 12	43 50 20	4 12 16	19 17 19	17 31 18
	15	21 16 15	7 19 18	10 8 15	5 21 19	25 8 16	19 6 19
	16	12 2 18	9 9 17	49 37 12	19 3 20	11 15 20	12 7 18
	17	23 17 19	12 24 12	23 8 16	14 10 15	20 5 20	5 14 20
	18	20 18 12	8 24 16	18 28 19	12 4 18	19 13 15	40 36 20
	19	18 20 19	22 13 19	35 42 15	11 11 14	25 10 15	9 45 19
	20	20 7 11	7 8 20	6 39 11	2 12 19	3 23 17	24 43 15
	21	8 6 18	19 15 14	5 12 12	9 15 14	2 8 17	48 45 19
	22	5 8 16	22 4 15	50 48 14	24 10 16	1 3 18	50 13 18
	23	9 18 13	15 28 17	39 36 12	13 21 19	19 6 17	8 43 12
	24	20 2 20	18 13 13	22 3 14	16 16 16	3 14 15	42 23 19
	25	12 3 13	19 21 20	20 14 13	16 1 13	24 21 11	43 14 20
	26	22 17 15	2 15 16	41 47 10	14 10 18	1 24 13	43 6 19
	27	12 8 16	23 8 18	8 36 20	6 17 15	6 15 49	4 11
	28	3 16 18	8 9 19	3 23 11	14 10 19	20 27 11	35 41 16
	29	12 6 16	23 11 15	44 24 20	21 13 11	26 2 18	31 42 20
	30	24 1 14	11 16 18	26 4 19	16 4 13	9 16 13	19 24 17
	31	16 18 11	24 20 12	9 20 14	2 38 18	23 16 17	26 29 15
	32	4 12 14	10 27 16	18 41 13	11 47 16	6 20 20	43 47 19
	33	13 15 11	16 16 18	5 34 13	1 44 13	20 2 11	37 36 19
	34	16 13 18	20 28 16	12 13 16	10 36 19	4 19 12	30 3 11
	35	9 2 11	5 27 17	25 3 20	12 47 14	22 8 19	8 34 20
	36	2 7 15	18 22 15	28 3 20	17 36 15	3 12 16	18 40 12
	37	17 11 17	17 11 12	28 22 17	3 40 14	25 8 18	40 10 14
	38	16 16 14	1 1 20	2 10 20	12 38 17	12 26 16	4 27 19
	39	6 11 20	4 23 14	18 1 18	20 33 15	4 17 17	24 26 12
	40	7 14 17	23 7 20	50 17 13	6 32 17	21 16 16	41 17 20
	41	1 5 17	16 27 19	16 17 19	1 47 15	22 11 12	36 22 12
	42	17 12 18	13 18 13	48 8 11	15 42 16	21 24 14	6 6 20
	43	8 11 17	2 3 12	17 47 15	23 36 11	7 5 18	39 40 15
	44	12 4 11	10 25 18	4 12 16	7 40 19	3 8 20	18 29 16
	45	19 3 13	6 9 15	7 21 19	8 34 17	22 4 16	20 3 13
	46	7 6 18	11 26 13	43 43 12	13 38 16	24 14 16	27 3 15
	47	13 18 11	19 24 17	50 16 14	12 42 12	4 24 15	8 26 18
	48	7 17 19	8 2 12	40 11 18	7 44 20	25 14 12	13 37 19
	49	8 17 20	13 21 13	16 37 14	13 30 15	1 28 19	9 6 12
	50	8 14 16	22 25 20	30 16 13	21 44 18	12 9 11	3 28 19

		200-10-3			200-10-2			200-10-1			100-10-3			100-10-2			100-10-1		
		200-10-3b			200-10-2b			200-10-1b			100-10-3b			100-10-2b			100-10-1b		
Kunden: Koordinaten (x,y) & Nachfrage (N)	51	7	5	19	14	15	17	49	7	16	20	47	16	43	48	11	5	50	18
	52	21	2	15	13	12	12	46	6	13	18	30	13	34	24	12	5	28	20
	53	21	14	13	2	27	12	8	3	12	24	40	18	27	25	15	40	5	13
	54	7	10	16	12	28	17	8	2	20	5	37	17	48	26	14	16	28	17
	55	25	18	16	18	11	17	32	28	18	10	36	16	25	32	13	46	41	17
	56	14	5	20	14	27	16	35	39	20	16	36	17	34	48	12	36	46	11
	57	21	13	13	15	16	17	48	31	16	12	37	15	27	33	12	50	47	16
	58	22	5	15	9	1	15	8	6	20	10	49	16	45	24	12	29	41	16
	59	6	8	16	8	28	20	32	39	17	23	49	12	45	26	12	31	2	17
	60	19	2	20	9	12	15	18	45	20	11	38	13	28	44	13	30	11	16
	61	11	5	17	6	18	16	41	2	18	36	11	15	38	42	19	44	17	18
	62	14	16	14	10	3	15	7	36	16	47	22	12	42	26	14	1	3	16
	63	7	18	11	22	23	13	36	6	13	28	25	13	25	41	15	25	26	18
	64	25	16	13	5	26	16	5	40	17	44	24	13	28	33	15	49	11	19
	65	15	9	14	15	9	11	42	23	18	44	24	18	36	33	14	34	6	18
	66	14	38	15	6	19	18	15	16	16	50	34	17	38	28	16	30	12	17
	67	12	41	11	21	25	11	27	49	14	48	16	17	39	45	13	15	17	16
	68	20	47	16	18	16	14	38	28	20	39	11	15	42	31	11	30	40	13
	69	14	43	11	7	22	13	7	32	14	49	29	15	43	28	19	16	35	16
	70	13	46	15	23	23	16	4	26	18	43	29	16	29	43	20	31	42	15
	71	6	38	15	25	22	18	39	11	12	46	40	20	29	26	19	4	17	11
	72	4	35	14	24	5	15	4	5	12	30	25	12	29	42	19	3	50	15
	73	6	35	13	24	28	14	20	13	20	41	28	15	38	34	18	25	33	13
	74	20	30	14	22	14	15	12	29	17	32	31	13	46	28	11	43	30	16
	75	14	34	11	13	16	14	3	21	15	27	24	12	30	24	18	30	38	18
	76	18	45	20	21	4	11	33	23	16	42	18	14	50	30	13	37	49	15
	77	22	45	13	12	22	12	1	19	18	46	19	17	44	26	19	26	30	11
	78	9	31	14	3	1	11	28	17	16	26	24	16	45	49	16	21	47	14
	79	6	48	19	17	26	15	26	22	18	32	23	14	49	43	19	22	8	12
	80	8	42	16	11	16	14	23	9	11	28	30	17	50	27	11	22	17	16
	81	23	34	12	24	4	20	2	50	19	37	37	15	43	33	11	29	43	17
	82	8	50	16	14	22	20	7	8	14	36	22	18	29	49	15	3	42	17
	83	15	37	17	23	9	17	42	1	20	48	38	13	40	37	15	33	8	12
	84	13	30	14	16	9	14	49	44	17	31	22	13	36	31	16	31	20	14
	85	20	31	20	1	10	18	22	35	12	33	27	13	46	45	17	44	32	14
	86	2	43	14	26	18	13	23	49	12	26	27	18	49	46	11	14	39	15
	87	3	48	16	21	14	16	1	22	19	29	19	16	45	41	13	6	35	19
	88	14	47	12	16	10	18	50	41	16	26	23	18	28	36	17	9	34	16
	89	21	45	13	17	17	16	15	21	18	34	21	12	43	50	20	7	1	19
	90	5	31	15	1	2	16	48	27	12	47	12	13	45	48	17	49	32	12
	91	7	34	13	18	23	14	42	27	20	43	17	15	48	27	18	22	1	16
	92	20	46	14	22	2	17	4	38	16	36	39	14	33	24	20	50	21	11
	93	15	40	14	4	10	15	24	24	16	29	18	16	48	33	20	45	11	11
	94	17	42	12	6	28	15	10	36	15	39	12	16	39	38	18	36	45	14
	95	11	32	18	15	28	13	37	26	18	46	14	18	45	49	13	25	4	17
	96	2	30	12	21	22	20	24	38	12	34	24	11	27	26	20	50	18	15
	97	23	40	20	8	3	12	46	27	13	40	14	14	33	44	14	21	50	17
	98	1	39	15	8	24	11	40	50	15	47	21	19	33	29	11	32	49	20
	99	1	47	19	25	20	11	30	11	12	33	27	11	32	46	12	38	1	15
	100	14	37	18	2	16	15	46	14	11	41	33	18	40	35	11	43	28	12
	101	14	48	20	26	29	20	29	40	13									
	102	3	47	19	36	45	20	42	1	19									
	103	14	48	19	34	41	12	39	12	15									
	104	3	50	15	41	43	19	41	13	18									
	105	9	50	15	32	46	12	50	16	16									
	106	4	35	16	47	27	13	47	15	14									
	107	3	43	12	29	33	16	13	19	12									
	108	14	31	17	49	49	17	9	22	17									
	109	5	45	16	30	46	16	28	21	11									
	110	20	42	19	33	38	12	5	5	14									
	111	16	44	16	31	32	13	45	5	17									
	112	4	44	13	38	29	19	10	38	18									
	113	11	31	18	30	27	11	8	14	17									
	114	14	40	19	47	49	19	46	14	16									
	115	19	35	20	33	33	16	37	4	18									
	116	7	46	19	31	49	11	18	39	17									
	117	3	44	12	38	49	11	39	27	16									
	118	5	30	19	44	26	11	33	27	11									
	119	1	50	14	46	46	17	34	5	14									
	120	2	33	18	35	30	15	12	24	17									
	121	19	43	15	29	27	17	27	8	16									
	122	6	34	12	30	31	11	38	24	16									
	123	8	47	17	31	31	19	42	36	11									
	124	7	44	15	26	34	12	46	45	16									
	125	12	36	13	30	47	17	16	16	17									
	126	12	49	13	48	36	12	6	50	19									
	127	5	45	16	37	46	18	32	22	20									
	128	7	46	18	30	30	16	2	6	20									
	129	10	36	14	44	31	19	5	25	20									
	130	3	43	17	42	32	18	49	37	14									
	131	35	39	18	37	28	17	18	33	17									
	132	26	31	15	45	50	16	21	9	14									

		200-10-3			200-10-2			200-10-1			100-10-3			100-10-2			100-10-1		
		200-10-3b			200-10-2b			200-10-1b			100-10-3b			100-10-2b			100-10-1b		
Kunden: Koordinaten (x,y) & Nachfrage (N)	133	47	28	11	32	27	15	48	29	14									
	134	32	24	11	34	34	17	14	35	12									
	135	45	40	16	38	29	16	20	3	20									
	136	42	16	13	44	44	17	19	18	14									
	137	50	36	11	30	24	20	28	12	16									
	138	34	22	19	48	35	13	43	45	15									
	139	48	13	16	37	30	18	11	43	20									
	140	32	16	19	36	44	14	32	16	17									
	141	37	29	15	33	26	20	22	17	18									
	142	49	24	11	32	47	13	6	11	14									
	143	27	26	20	31	48	19	39	17	20									
	144	50	30	19	49	25	19	42	30	18									
	145	49	11	13	41	36	12	36	22	13									
	146	34	18	19	47	37	20	20	19	17									
	147	32	18	17	49	38	20	33	25	11									
	148	26	28	19	41	47	11	34	2	11									
	149	33	16	13	48	36	17	29	27	13									
	150	43	21	16	39	49	11	49	48	16									
	151	42	26	16	25	36	17	44	35	19									
	152	47	40	17	48	44	17	41	26	18									
	153	34	15	15	50	50	20	20	41	16									
	154	48	38	11	41	44	14	31	37	18									
	155	38	32	18	40	36	13	11	31	18									
	156	44	15	11	45	27	15	6	33	19									
	157	31	25	16	36	26	12	16	31	14									
	158	44	29	18	46	28	11	39	44	11									
	159	49	17	17	40	38	18	14	9	14									
	160	48	39	13	27	38	15	40	37	17									
	161	34	29	13	31	44	16	34	22	16									
	162	33	23	18	41	31	15	26	23	16									
	163	34	27	17	39	36	14	2	35	18									
	164	36	21	12	30	40	19	5	36	14									
165	29	30	13	40	38	16	45	7	12										
166	33	27	12	42	32	17	47	3	16										
167	28	23	19	50	43	15	7	6	17										
168	45	38	12	37	40	19	22	20	17										
169	29	32	15	42	39	11	50	13	15										
170	40	36	16	48	43	18	15	21	14										
171	35	16	15	35	40	18	40	18	16										
172	44	30	12	31	35	13	25	33	20										
173	27	22	15	27	40	20	48	20	20										
174	47	33	11	43	50	15	36	17	12										
175	30	15	20	46	27	17	15	39	11										
176	36	29	17	39	37	20	31	43	11										
177	28	13	19	43	30	17	14	41	12										
178	37	40	16	25	46	13	26	30	16										
179	31	17	16	30	33	20	2	44	12										
180	32	13	13	34	25	20	2	19	12										
181	32	31	17	29	27	15	35	5	12										
182	32	35	18	44	31	17	11	50	13										
183	33	23	18	32	45	11	20	47	16										
184	30	27	14	39	36	11	32	11	14										
185	49	20	14	30	34	12	2	44	13										
186	40	38	13	32	27	13	6	33	14										
187	38	36	11	47	49	19	4	48	14										
188	33	38	17	33	33	15	19	43	12										
189	35	18	18	36	33	13	50	46	19										
190	43	39	18	50	31	14	26	14	20										
191	44	29	18	33	42	11	4	28	13										
192	48	36	13	39	34	14	16	3	16										
193	44	35	20	42	24	19	24	49	12										
194	42	29	16	50	38	12	29	31	17										
195	30	32	12	25	30	17	17	11	12										
196	36	17	14	33	45	20	14	44	13										
197	41	24	12	29	48	13	25	8	16										
198	28	28	13	49	48	12	40	4	17										
199	27	21	18	47	49	14	1	18	11										
200	50	32	15	39	28	20	7	47	13										

		100-5-3 100-5-3b	100-5-2 100-5-2b	100-5-1 100-5-1b	50-5-3 50-5-3b	50-5-2BIS	50-5-2bBIS
Kunden Depots		100 5	100 5	100 5	50 5	50 5	50 5
Fahrzeugkapazität		70 (100-5-3) 150 (100-5-3b)	70 (100-5-2) 150 (100-5-2b)	70 (100-5-1) 150 (100-5-1b)	70 (50-5-3) 150 (50-5-3b)	70	150
Transportkosten		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Depots: Eröffnungskosten	1	50.636	44.362	41.688	13.462	5.853	7.541
	2	43.715	58.290	45.698	13.833	5.709	7.062
	3	54.000	57.995	45.977	10.659	5.366	5.973
	4	42.574	52.453	52.810	5.128	8.566	5.985
	5	44.572	44.251	45.504	5.583	5.397	5.716
	6						
	7						
	8						
	9						
	10						
Depots: Koordinaten (x,y) & Kapazitäten (K)		x y K	x y K	x y K	x y K	x y K	x y K
	1	13 11 770	2 19 700	1 13 770	12 39 350	15 46 350	15 32 300
	2	37 19 840	37 22 770	46 4 700	12 24 420	7 30 350	34 13 300
	3	1 24 770	32 42 770	2 3 770	38 29 350	21 9 350	13 49 300
	4	20 2 770	3 40 770	13 19 770	32 43 420	8 15 350	10 10 300
	5	19 39 770	11 12 840	3 37 770	37 46 420	25 5 350	23 49 300
	6						
	7						
	8						
	9						
10							
Kunden: Koordinaten (x,y) & Nachfrage (N)		x y N	x y N	x y N	x y N	x y N	x y N
	1	10 4 15	12 5 11	31 6 18	4 20 12	11 2 16	12 2 16
	2	1 3 16	20 17 16	36 20 17	22 7 11	10 15 14	14 14 12
	3	4 18 17	7 16 18	9 19 14	18 21 13	10 10 18	13 6 20
	4	17 9 16	18 9 18	47 42 11	20 2 14	14 7 12	12 13 16
	5	3 10 14	21 3 19	28 20 15	21 7 15	6 2 14	12 14 12
	6	21 20 18	18 21 11	38 43 16	25 11 11	3 7 11	10 11 11
	7	17 20 16	4 18 12	41 4 11	16 9 16	5 6 15	12 4 16
	8	3 21 12	14 3 13	36 30 12	4 21 18	9 14 14	3 8 12
	9	25 1 20	3 9 14	4 10 14	1 12 19	9 14 12	1 14 13
	10	15 8 15	2 6 18	43 16 19	25 3 14	3 15 13	3 12 19
	11	2 20 17	8 20 17	33 45 17	22 18 20	7 6 18	8 14 12
	12	19 8 12	21 28 17	39 30 16	4 2 19	9 4 17	5 6 16
	13	17 6 18	20 5 13	6 40 20	22 21 13	6 15 18	15 6 19
	14	3 2 14	13 3 17	50 20 13	17 16 14	3 2 13	9 15 20
	15	12 6 16	15 9 17	48 14 11	7 11 20	7 5 17	1 9 11
	16	9 2 13	18 10 13	34 34 17	14 36 20	10 7 11	14 5 13
	17	7 9 19	20 8 17	49 3 17	14 37 17	10 12 14	11 15 19
	18	2 18 13	14 24 15	26 14 19	16 40 15	4 7 15	7 5 15
	19	1 9 18	4 9 20	28 44 12	5 50 19	7 7 16	8 10 19
	20	12 18 20	17 9 11	21 38 13	19 40 16	2 14 14	12 15 14
	21	6 12 15	15 2 16	34 11 20	12 40 15	1 15 18	9 8 17
	22	19 8 20	19 4 18	41 32 14	13 47 11	15 11 16	12 13 13
	23	4 12 11	15 11 14	44 46 13	5 38 17	4 9 17	9 3 19
	24	9 7 19	4 3 18	27 48 16	15 36 12	11 12 15	12 15 16
	25	20 19 17	21 5 15	2 36 13	3 41 15	10 13 13	15 8 16
	26	9 7 16	19 3 14	34 32 16	25 41 17	46 38 11	46 44 16
	27	12 15 11	6 13 20	50 27 18	12 49 13	38 50 16	44 47 11
	28	25 13 20	17 28 20	36 26 14	6 43 15	45 49 18	38 40 17
	29	25 20 12	17 7 17	16 17 13	12 46 15	37 42 17	47 38 14
	30	20 8 15	22 17 15	8 10 11	14 32 12	41 37 17	38 47 13
	31	15 43 20	5 14 19	45 28 16	50 11 20	49 47 18	48 44 14
	32	16 45 12	17 1 17	49 11 19	47 19 20	50 41 13	43 41 17
	33	8 35 19	18 13 14	28 10 20	29 18 11	42 36 20	45 39 14
	34	14 45 14	4 21 17	9 10 16	37 36 15	48 37 16	37 50 20
	35	7 46 13	8 10 13	39 50 19	49 40 18	48 40 13	39 46 13
	36	25 35 15	7 5 19	33 31 14	26 19 16	42 39 12	43 40 15
	37	5 45 20	10 24 15	20 8 16	27 33 20	45 39 13	49 40 14
	38	17 30 11	10 9 14	39 48 18	47 18 11	41 36 12	46 46 19
	39	2 45 11	6 21 11	29 3 11	28 40 18	40 38 16	45 46 20
	40	21 44 20	5 4 15	43 32 19	39 34 12	41 44 18	36 46 19
	41	14 44 12	8 19 19	34 9 12	44 32 19	45 50 17	46 44 16
	42	19 38 16	9 14 14	42 40 16	29 31 11	48 44 19	39 45 18
	43	6 44 11	14 6 17	25 49 20	45 20 12	48 39 20	36 50 15
	44	14 43 13	12 28 11	27 4 12	26 37 15	36 48 18	40 40 13
	45	21 34 18	24 8 12	29 37 12	34 24 15	50 37 19	42 50 13
	46	4 42 11	25 20 16	28 32 13	27 39 18	46 37 18	44 41 11
	47	12 38 16	10 14 11	42 8 12	33 38 12	48 39 11	50 41 19
	48	2 40 11	26 4 13	18 22 18	29 26 12	40 44 15	38 41 17
	49	17 46 16	25 22 20	20 33 20	30 20 13	39 49 16	48 45 20
50	11 32 14	26 14 12	28 48 20	40 13 15	41 36 15	39 38 19	

		100-5-3 100-5-3b			100-5-2 100-5-2b			100-5-1 100-5-1b			50-5-3 50-5-3b		50-5-2BIS		50-5-2bBIS	
Kunden: Koordinaten (x,y) & Nachfrage (N)	51	25	40	19	38	43	12	35	19	15						
	52	15	44	16	37	30	18	49	36	12						
	53	4	45	16	37	48	12	49	35	16						
	54	18	46	11	34	39	11	25	25	15						
	55	10	48	17	35	49	20	6	5	12						
	56	20	46	20	50	32	17	6	24	18						
	57	23	49	17	39	27	19	38	28	15						
	58	9	32	12	27	25	16	24	27	13						
	59	8	36	19	36	43	18	49	48	17						
	60	17	47	19	32	25	14	7	44	15						
	61	36	33	13	37	42	18	18	44	20						
	62	36	12	15	46	41	18	45	46	14						
	63	34	13	19	32	44	14	23	15	15						
	64	31	31	18	41	24	11	17	47	17						
	65	35	11	11	44	48	13	47	18	13						
	66	49	25	15	27	30	18	5	18	12						
	67	49	29	12	34	46	13	5	47	17						
	68	38	36	13	36	34	17	41	47	19						
	69	34	14	14	39	41	16	5	2	16						
	70	34	26	18	25	31	17	24	49	20						
	71	42	32	17	33	41	20	32	46	11						
	72	31	34	19	29	32	17	48	43	13						
	73	36	12	18	50	44	11	20	35	17						
	74	27	12	16	47	37	16	20	38	19						
	75	30	18	12	27	24	13	9	29	15						
	76	38	16	18	34	45	17	29	2	18						
	77	50	12	19	44	42	13	26	20	12						
	78	32	18	16	28	47	19	26	11	16						
	79	50	27	18	30	24	14	16	26	16						
	80	40	22	11	43	39	20	34	43	16						
	81	39	36	11	41	35	18	1	2	13						
	82	40	27	11	27	31	13	48	14	19						
	83	37	27	12	36	32	20	34	44	20						
	84	42	11	15	35	24	20	41	32	20						
	85	26	22	19	40	27	20	41	13	18						
	86	33	19	14	30	44	15	46	7	20						
	87	49	22	11	30	41	11	7	34	14						
	88	49	28	20	35	30	19	8	34	20						
	89	44	23	14	32	35	11	9	11	18						
	90	27	37	18	28	40	16	3	15	13						
	91	49	29	16	34	34	19	35	9	20						
	92	47	21	16	25	36	11	1	11	15						
	93	45	28	14	35	32	18	17	34	15						
	94	38	35	16	27	43	11	20	42	15						
	95	43	17	17	30	30	15	46	30	14						
	96	33	20	19	38	30	20	9	43	17						
	97	34	12	17	41	40	16	45	8	20						
	98	31	13	20	32	47	13	45	31	18						
	99	33	15	19	27	27	11	50	37	19						
	100	46	16	17	46	25	16	38	39	18						

		50-5-2 50-5-2b	50-5-1 50-5-1b	20-5-2 20-5-2b	20-5-1 20-5-1b
Kunden Depots		50 5	50 5	20 5	20 5
Fahrzeugkapazität		70 (50-5-2) 150 (50-5-2b)	70 (50-5-1) 150 (50-5-1b)	70 (20-5-2) 150 (20-5-2b)	70 (20-5-1) 150 (20-5-1b)
Transportkosten		1.000	1.000	1.000	1.000
Depots: Eröffnungskosten	1	12.318	10.356	13.551	12.286
	2	11.308	9.744	5.843	12.031
	3	8.938	5.029	9.037	6.995
	4	14.703	10.057	8.068	8.502
	5	9.073	13.647	13.671	12.790
	6				
	7				
	8				
	9				
	10				
Depots: Koordinaten (x,y) & Kapazitäten (K)		x y K	x y K	x y K	x y K
	1	42 4 350	42 6 420	6 11 150	6 25 300
	2	47 20 350	2 39 420	10 43 150	1 50 300
	3	47 49 350	5 45 350	1 33 300	11 25 300
	4	7 18 350	14 8 350	14 23 300	47 42 300
	5	19 18 350	43 3 350	27 48 150	3 33 300
	6				
	7				
	8				
	9				
10					
Kunden: Koordinaten (x,y) & Nachfrage (N)		x y N	x y N	x y N	x y N
	1	14 14 14	28 23 19	12 21 11	22 35 14
	2	20 18 19	33 5 17	1 2 15	37 29 17
	3	26 1 18	45 13 19	11 28 11	8 32 16
	4	17 4 17	14 3 18	2 10 14	40 14 17
	5	13 3 13	50 32 14	14 5 17	47 10 17
	6	12 4 17	17 45 19	10 12 13	42 35 12
	7	4 10 16	1 22 20	23 24 14	5 14 20
	8	21 21 16	39 36 13	24 11 15	4 36 15
	9	1 19 12	8 8 11	8 30 13	42 25 15
	10	2 22 18	17 9 16	11 27 17	29 13 12
	11	6 5 14	21 18 17	29 42 16	40 12 13
	12	7 11 18	22 16 16	26 47 18	50 19 15
	13	6 12 16	17 39 11	30 36 12	49 12 11
	14	11 25 16	42 6 14	37 28 19	45 9 18
	15	18 16 15	21 5 13	31 27 18	11 8 13
	16	14 19 15	38 2 12	42 35 15	25 5 13
	17	17 22 19	39 17 16	42 47 16	17 28 19
	18	16 11 15	21 38 12	41 23 14	33 35 18
	19	11 20 16	31 6 13	36 45 20	2 41 19
	20	13 24 15	40 33 20	43 34 14	7 15 14
	21	12 1 16	26 26 16		
	22	10 7 11	40 48 16		
	23	12 5 11	33 42 16		
	24	8 20 17	14 50 13		
	25	4 4 16	11 10 20		
	26	45 25 20	24 5 16		
	27	46 25 17	7 44 11		
	28	27 45 18	49 42 16		
	29	49 35 20	8 31 12		
	30	39 48 11	40 24 14		
	31	34 45 19	35 44 13		
	32	30 47 20	7 30 17		
	33	46 45 13	16 48 19		
	34	29 29 13	40 10 11		
	35	50 26 11	10 3 11		
	36	49 29 17	7 31 19		
	37	25 40 17	33 29 11		
	38	40 44 13	25 34 15		
	39	39 30 16	49 9 14		
	40	27 33 13	5 48 14		
	41	37 26 13	23 3 18		
	42	35 48 18	3 49 12		
	43	42 35 14	15 18 16		
	44	25 40 18	38 50 17		
	45	39 41 16	42 31 11		
	46	48 41 12	12 23 18		
	47	41 26 12	47 22 14		
	48	35 27 14	24 24 16		
	49	41 31 14	14 17 15		
50	37 31 16	44 20 15			

A.3 Ergebnisse aller Instanzen Vergleich LRP vs. LAP und VRP

Alle Instanzen									
Problem Instance	Total Cost avg		Total Cost min		Depot Costs	Routing Costs	Vehicles	Depots	
	Difference	Deviation	Difference	Deviation	Deviation	Deviation	Deviation	Deviation	Deviation
1_coordpp1	2.647	0,7%	2.914	1,0%	0,00%	0,8%	0,2	0,0	
1_coordpp2	-2.548	-0,8%	380	0,1%	8,99%	-3,0%	0,0	0,0	
1_coordpp3	-50.942	-1,9%	-25.784	-3,2%	-3,49%	-17,1%	0,0	0,0	
1_coordpp4	13.378	3,1%	13.416	3,2%	6,72%	-1,2%	0,2	0,0	
2_coordpp1	1.593	1,5%	-3.186	-3,4%	4,45%	-0,2%	0,0	0,0	
2_coordpp2	4.416	4,1%	5.217	5,0%	11,23%	-1,6%	0,0	0,0	
2_coordpp3	-6.625	-6,5%	-4.695	-4,7%	-9,19%	-3,4%	0,0	0,0	
2_coordpp4	3.810	3,5%	3.769	3,6%	10,84%	1,2%	0,0	0,0	
3_coordpp1	-2.049	-2,3%	2.042	2,3%	18,83%	1,8%	0,0	0,0	
3_coordpp2	-2.921	-3,8%	-890	-1,2%	5,43%	-5,8%	0,0	0,0	
3_coordpp3	522	0,6%	-569	-0,7%	3,90%	-0,5%	-0,3	0,0	
3_coordpp4	1.028	1,2%	912	1,1%	16,75%	6,4%	-0,4	0,0	
4_coordpp1	2.777	3,8%	3.483	4,6%	23,89%	-5,8%	0,3	0,0	
4_coordpp2	-7	0,0%	91	0,1%	0,00%	0,0%	0,0	0,0	
4_coordpp3	1.160	1,1%	2.224	2,2%	4,89%	1,3%	0,0	0,0	
4_coordpp4	807	0,8%	550	0,5%	9,73%	-10,6%	0,0	0,0	
5_coordpp1	1.521	1,5%	-140	-0,2%	12,46%	1,3%	0,0	0,0	
5_coordpp2	2.392	2,3%	1.350	1,4%	31,02%	10,3%	-0,2	0,0	
5_coordpp3	-1.082	-1,0%	-879	-0,8%	-2,93%	0,9%	-0,1	0,0	
5_coordpp4	-710	-0,6%	-3.267	-3,0%	-0,01%	-1,0%	0,0	0,0	
6_coordpp1	384	0,4%	-285	-0,3%	0,00%	0,6%	-0,1	0,0	
6_coordpp2	1.543	1,5%	420	0,5%	0,00%	2,9%	-0,1	0,0	
6_coordpp3	1.153	1,1%	1.650	1,6%	0,00%	2,0%	-0,1	0,0	
6_coordpp4	154	0,2%	-426	-0,4%	-6,83%	7,4%	0,0	0,0	
7_coordpp1	-30	0,0%	-198	-0,2%	0,00%	0,0%	0,1	0,0	
7_coordpp2	69	0,1%	776	0,8%	0,00%	0,1%	-0,1	0,0	
7_coordpp3	-320	-0,3%	2.930	2,7%	1,68%	-1,8%	0,0	0,0	
7_coordpp4	1.045	0,9%	366	0,3%	0,00%	1,5%	0,0	0,0	
8_coordpp1	-3.603	-3,9%	-2.072	-2,3%	20,37%	-12,5%	0,1	0,0	
8_coordpp2	-10	0,0%	-988	-1,3%	0,00%	0,0%	0,1	0,0	
8_coordpp3	721	0,6%	286	0,3%	5,94%	5,1%	0,0	0,0	
8_coordpp4	-3.765	-3,5%	-3.644	-3,6%	3,02%	-2,8%	0,0	0,0	
9_coordpp1	-739	-0,8%	-94	-0,1%	0,00%	-1,1%	0,0	0,0	
9_coordpp2	233	0,2%	381	0,4%	3,62%	-1,0%	-0,1	0,0	
9_coordpp3	1.879	1,8%	-711	-0,5%	11,94%	5,9%	-0,1	0,0	
9_coordpp4	-1.996	-1,6%	-886	-0,7%	-0,46%	12,5%	0,0	0,0	
10_coordpp1	-230	-0,1%	0	0,0%	0,00%	-0,1%	-0,1	0,0	
10_coordpp2	-7.848	-3,8%	-8.100	-4,0%	26,09%	-0,2%	0,0	-1,0	
10_coordpp3	-1.189	-0,5%	-335	-0,2%	0,00%	-0,8%	0,0	0,0	
10_coordpp4	-42.290	-12,6%	-40.501	-10,9%	13,50%	-20,1%	0,0	0,0	
11_coordpp1	3.553	5,3%	3.030	4,6%	9,19%	2,6%	0,0	0,0	
11_coordpp2	2.913	4,4%	2.245	3,4%	2,86%	5,5%	0,0	0,0	
11_coordpp3	767	0,8%	1.337	1,4%	-0,63%	2,5%	0,0	0,0	
11_coordpp4	-367	-0,5%	-23	0,0%	0,00%	-1,0%	0,0	0,0	
12_coordpp1	1.069	1,0%	1.072	1,0%	4,79%	-0,5%	0,0	0,0	
12_coordpp2	1.571	2,7%	391	0,7%	6,02%	0,4%	0,0	0,0	
12_coordpp3	1.339	1,5%	161	0,2%	2,02%	0,9%	0,0	0,0	
12_coordpp4	2.053	2,1%	336	0,4%	2,48%	1,8%	0,0	0,0	
13_coordpp1	-565	-0,6%	655	0,7%	0,00%	-0,9%	0,0	0,0	
13_coordpp2	-678	-0,7%	1.124	1,2%	-0,27%	-0,9%	0,0	0,0	
13_coordpp3	659	0,4%	1.386	1,0%	2,31%	12,2%	0,1	0,0	
13_coordpp4	-1.340	-1,0%	-1.428	-1,1%	0,31%	12,4%	0,0	0,0	
14_coordpp1	344	0,4%	1.095	1,3%	0,00%	0,4%	0,1	0,0	
14_coordpp2	815	0,8%	618	0,7%	0,00%	1,0%	0,0	0,0	
14_coordpp3	-305	-0,4%	-1.347	-1,6%	0,00%	-0,4%	0,0	0,0	
14_coordpp4	2.314	2,5%	2.469	2,7%	46,40%	12,7%	0,0	0,0	
15_coordpp1	3.340	5,1%	3.621	5,7%	58,96%	6,7%	0,0	-1,0	
15_coordpp2	176	0,2%	-167	-0,2%	27,78%	1,0%	0,0	-1,0	
15_coordpp3	-1.032	-1,5%	-412	-0,7%	0,37%	-1,7%	0,0	0,0	
15_coordpp4	-1.508	-2,1%	-3.892	-4,3%	-3,18%	12,0%	0,1	0,0	
16_coordpp1	1.888	0,9%	558	0,3%	0,00%	2,8%	0,0	0,0	
16_coordpp2	820	0,4%	797	0,4%	0,00%	1,2%	0,0	0,0	
16_coordpp3	703	0,2%	1.679	0,5%	0,00%	1,3%	-0,1	0,0	
16_coordpp4	1.542	0,4%	120	0,0%	0,00%	2,7%	0,0	0,0	
17_coordpp1	56	0,1%	-3.197	-3,1%	-4,49%	1,8%	0,0	0,0	
17_coordpp2	-816	-1,0%	-2.819	-3,5%	0,00%	-1,3%	0,1	0,0	
17_coordpp3	2.194	2,5%	-3.092	-3,9%	0,00%	3,6%	-0,1	0,0	
17_coordpp4	-1.185	-1,3%	278	0,3%	0,00%	-1,9%	0,0	0,0	

Alle Instanzen												
Problem Instance	Total Cost avg		Total Cost min		Depot Costs		Routing Costs		Vehicles		Depots	
	Difference	Deviation	Difference	Deviation	Difference	Deviation	Difference	Deviation	Difference	Deviation	Difference	Deviation
18_coordpp1	-4.016	-2,3%	-4.955	-3,5%	-0,31%	-3,7%	0,0	0,0				
18_coordpp2	-2.646	-1,8%	-1.997	-1,4%	1,23%	-5,7%	0,1	0,0				
18_coordpp3	3.689	2,2%	-2.571	-1,7%	-0,03%	3,2%	0,0	0,0				
18_coordpp4	3.384	2,2%	3.677	2,4%	0,83%	1,4%	0,0	0,0				
19_coordpp1	-3.726	-2,0%	-5.524	-2,9%	5,28%	-1,2%	0,0	0,0				
19_coordpp2	89	0,0%	337	0,2%	0,00%	0,1%	0,0	0,0				
19_coordpp3	-13.032	-8,1%	-13.056	-8,1%	-3,80%	-2,2%	0,0	0,0				
19_coordpp4	-10.273	-5,7%	-10.923	-6,2%	-3,63%	-2,2%	0,0	0,0				
20_coordpp1	-164	-0,3%	-222	-0,5%	0,00%	-0,5%	0,4	0,0				
20_coordpp2	270	0,4%	-1.359	-2,2%	0,86%	-7,8%	0,0	0,0				
20_coordpp3	714	0,8%	89	0,1%	0,52%	1,3%	0,0	0,0				
20_coordpp4	-1.490	-1,4%	-858	-1,0%	0,66%	-5,0%	0,0	0,0				
21_coordpp1	91	0,2%	0	0,0%	0,00%	0,3%	0,0	0,0				
21_coordpp2	-251	-0,4%	85	0,2%	0,00%	-0,9%	0,0	0,0				
21_coordpp3	-794	-0,8%	-918	-1,0%	1,76%	-5,0%	0,0	0,0				
21_coordpp4	-131	-0,4%	948	1,0%	0,27%	-2,2%	0,0	0,0				
22_coordpp1	-396	-0,4%	-230	-0,2%	0,00%	-0,7%	0,0	0,0				
22_coordpp2	334	0,3%	-654	-0,7%	0,00%	0,5%	0,0	0,0				
22_coordpp3	686	0,5%	195	0,1%	0,00%	1,1%	0,1	0,0				
22_coordpp4	-1.197	-1,0%	-738	-0,6%	1,66%	-4,9%	0,1	-0,1				
23_coordpp1	638	0,9%	106	0,2%	0,00%	1,0%	0,0	0,0				
23_coordpp2	554	0,7%	319	0,4%	0,00%	0,8%	0,0	0,0				
23_coordpp3	-49	-0,1%	266	0,4%	0,00%	-0,1%	0,0	0,0				
23_coordpp4	343	0,5%	-568	-0,8%	0,00%	0,5%	0,0	0,0				
24_coordpp1	659	1,1%	-163	-0,2%	0,00%	1,2%	0,0	0,0				
24_coordpp2	1.571	3,1%	1.263	2,6%	-2,80%	4,4%	-0,1	-1,0				
24_coordpp3	1.484	2,7%	1.953	3,8%	1,80%	3,1%	-0,1	0,0				
24_coordpp4	58	0,1%	1.351	2,8%	2,66%	-0,1%	-0,1	-0,3				
25_coordpp1	2.042	1,0%	-667	-0,8%	0,00%	3,4%	-0,3	0,0				
25_coordpp2	-654	-0,3%	525	0,3%	0,00%	-1,3%	0,1	0,0				
25_coordpp3	-458	-0,4%	-873	-0,8%	0,00%	-1,0%	0,0	0,0				
25_coordpp4	140	0,0%	-1.736	-0,5%	0,00%	0,3%	-0,1	0,0				
26_coordpp1	-16.141	-7,3%	-17.083	-8,2%	0,00%	-8,0%	0,0	0,0				
26_coordpp2	-9	0,0%	30	0,0%	0,00%	0,0%	0,0	0,0				
26_coordpp3	-23.910	-16,3%	-11.249	-7,9%	3,33%	-17,5%	0,0	-0,2				
26_coordpp4	-7.489	-4,4%	-6.731	-4,5%	-6,67%	-4,4%	-1,0	-1,0				
27_coordpp1	-1.028	-2,3%	5	0,0%	-3,33%	-0,1%	1,0	-1,0				
27_coordpp2	97	0,2%	-127	-0,8%	0,00%	0,3%	0,0	0,0				
27_coordpp3	210	0,5%	1.350	3,9%	0,00%	0,5%	0,0	0,0				
27_coordpp4	-1.333	-2,6%	-1.128	-2,3%	0,00%	-3,0%	0,0	0,0				
29_coordpp1	-195	-0,3%	555	0,9%	20,00%	-1,9%	0,0	1,0				
29_coordpp2	-1.050	-1,8%	-1.382	-2,2%	2,44%	-1,9%	0,2	0,1				
29_coordpp3	938	1,1%	-910	-1,4%	-1,08%	1,4%	0,3	-0,1				
29_coordpp4	2.694	3,1%	-2.066	-3,3%	0,00%	3,4%	0,0	0,0				
30_coordpp1	2.327	2,8%	882	1,1%	0,00%	2,9%	0,0	0,0				
30_coordpp2	-643	-0,8%	-2.506	-3,2%	0,00%	-0,8%	0,0	0,0				
30_coordpp3	-460	-0,6%	-1.081	-1,5%	0,00%	-0,6%	0,0	0,0				
30_coordpp4	-772	-1,0%	-2.489	-3,3%	0,00%	-1,0%	0,0	0,0				
31_coordpp1	-31	0,0%	-1.314	-1,2%	0,00%	0,0%	0,0	0,0				
31_coordpp2	842	0,7%	-1.396	-1,0%	0,00%	0,8%	0,0	0,0				
31_coordpp3	2.768	2,5%	1.471	1,4%	0,00%	2,6%	0,0	0,0				
31_coordpp4	-4.637	-3,4%	-1.040	-0,9%	0,00%	-4,0%	0,0	0,0				
32_coordpp1	-37.266	-15,4%	-37.263	-15,5%	0,15%	-18,5%	0,0	0,0				
32_coordpp2	2.985	1,1%	3.019	1,1%	-0,52%	2,3%	0,0	0,0				
32_coordpp3	-2.655	-1,2%	-2.783	-1,3%	-0,17%	12,9%	0,0	-1,0				
32_coordpp4	-5.725	-2,5%	-1.104	-0,9%	9,64%	0,4%	-0,4	-0,4				
33_coordpp1	0	0,0%	0	0,0%	0,00%	0,0%	0,0	0,0				
33_coordpp2	0	0,0%	0	0,0%	0,00%	0,0%	0,0	0,0				
33_coordpp3	0	0,0%	0	0,0%	0,00%	0,0%	0,0	0,0				
33_coordpp4	0	0,0%	0	0,0%	0,00%	0,0%	0,0	0,0				
34_coordpp1	-22.212	-6,5%	-20.627	-6,0%	0,00%	-11,6%	0,0	0,0				
34_coordpp2	693	0,2%	818	0,2%	0,00%	0,4%	0,0	0,0				
34_coordpp3	-40.102	-9,8%	-43.145	-10,6%	-20,00%	6,2%	0,0	-1,0				
34_coordpp4	-16.673	-3,8%	-15.622	-3,5%	0,00%	-12,3%	0,0	0,0				
35_coordpp1	-111	0,0%	-414	-0,4%	-3,10%	1,7%	0,0	0,0				
35_coordpp2	-796	-0,2%	-766	-0,2%	4,61%	0,2%	0,0	0,0				
35_coordpp3	-4.877	-1,2%	-6.091	-1,5%	-1,76%	0,5%	0,0	0,0				
35_coordpp4	-13.032	-8,1%	-11.464	-3,0%	-20,71%	-0,7%	0,0	-1,0				

Alle Instanzen												
Problem Instance	Total Cost avg		Total Cost min		Depot Costs		Routing Costs		Vehicles		Depots	
	Difference	Deviation	Difference	Deviation	Difference	Deviation	Difference	Deviation	Difference	Deviation	Difference	Deviation
36_coordpp1	225	0,3%	1.949	2,8%	-0,14%	0,6%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
36_coordpp2	-227	-0,3%	934	1,2%	0,00%	-0,6%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
36_coordpp3	52	0,0%	-675	-0,5%	-0,14%	0,3%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
36_coordpp4	-292	-0,2%	673	0,5%	-0,06%	-0,4%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
37_coordpp1	-797	-1,1%	751	1,0%	0,00%	-1,8%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
37_coordpp2	-1.092	-1,5%	-2.866	-4,2%	0,00%	-2,6%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
37_coordpp3	685	0,6%	710	0,6%	1,08%	-0,2%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
37_coordpp4	327	0,3%	538	0,4%	0,46%	0,0%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
38_coordpp1	1.885	0,7%	533	0,2%	0,00%	3,1%	-0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
38_coordpp2	2.225	0,8%	628	0,2%	0,00%	3,2%	-0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
38_coordpp3	-363	-0,1%	-1.577	-0,3%	0,00%	-0,5%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
38_coordpp4	-899	-0,2%	-1.892	-0,4%	0,00%	-1,4%	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
39_coordpp1	1.335	0,8%	1.950	1,2%	1,95%	0,4%	-0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
39_coordpp2	-1.145	-0,7%	-1.494	-1,0%	-1,96%	-0,1%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
39_coordpp3	10	0,0%	122	0,1%	0,39%	-0,2%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
39_coordpp4	-642	-0,3%	-710	-0,3%	0,45%	-0,8%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
40_coordpp1	569	1,1%	619	1,2%	17,84%	-3,8%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
40_coordpp2	-344	-0,7%	-241	-0,5%	0,00%	-0,8%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
40_coordpp3	-880	-1,8%	-1.383	-2,9%	0,00%	-2,2%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
40_coordpp4	61	0,1%	0	0,0%	0,00%	0,2%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
41_coordpp1	-29	0,0%	-4	0,0%	0,00%	-0,1%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
41_coordpp2	346	0,2%	341	0,2%	0,00%	0,9%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
41_coordpp3	-652	-0,2%	-322	-0,1%	0,00%	-1,6%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
41_coordpp4	-790	-0,2%	-346	-0,1%	0,00%	-1,9%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
42_coordpp1	3.473	4,6%	1.604	2,2%	17,50%	0,0%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
42_coordpp2	2.787	3,3%	-97	-0,1%	14,27%	-1,9%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
42_coordpp3	1.134	1,0%	-1.403	-1,2%	5,44%	-3,0%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
42_coordpp4	-3.014	-2,7%	-1.376	-1,3%	-6,21%	-0,5%	-0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
43_coordpp1	3.507	2,7%	8.059	6,3%	42,81%	-1,5%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
43_coordpp2	-2.911	-2,4%	-3.159	-2,7%	0,00%	-2,6%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
43_coordpp3	636	0,5%	1.927	1,6%	26,82%	-1,6%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
43_coordpp4	-1.757	-1,5%	2.017	1,7%	-18,33%	-0,7%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
44_coordpp1	368	0,2%	1.040	0,6%	0,00%	1,1%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
44_coordpp2	-437	-0,2%	-144	-0,1%	0,00%	-1,3%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
44_coordpp3	451	0,1%	-97	0,0%	0,00%	1,1%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
44_coordpp4	826	0,2%	0	0,0%	0,00%	1,9%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
45_coordpp1	1.186	1,5%	1.046	1,4%	3,88%	0,0%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
45_coordpp2	1.558	2,0%	-61	-0,1%	7,29%	-2,0%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
45_coordpp3	-1.547	-1,4%	-178	-0,2%	-3,35%	-0,3%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
45_coordpp4	794	0,6%	-23	0,0%	0,00%	1,1%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
46_coordpp1	-1.988	-1,4%	-1.728	-1,3%	0,00%	-2,3%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
46_coordpp2	2.320	1,7%	3.116	2,4%	0,00%	2,8%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
46_coordpp3	-2.022	-1,6%	-1.413	-1,1%	0,00%	-2,6%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
46_coordpp4	382	0,3%	265	0,2%	0,00%	0,6%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
47_coordpp1	-813	-0,6%	-23	0,0%	0,00%	-0,6%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
47_coordpp2	-140	-0,1%	-2.828	-2,3%	0,00%	-0,1%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
47_coordpp3	-247	-0,2%	-677	-0,5%	0,00%	-0,2%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
47_coordpp4	-249	-0,2%	274	0,2%	59,91%	-6,9%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
48_coordpp1	28	0,0%	-1.692	-0,7%	0,00%	0,0%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
48_coordpp2	-537	-0,2%	-640	-0,2%	0,00%	-0,5%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
48_coordpp3	2.850	0,7%	-898	-0,2%	0,00%	2,5%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
48_coordpp4	-833	-0,2%	-791	-0,2%	0,00%	-0,8%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
49_coordpp1	3.658	5,7%	3.826	6,0%	99,99%	-151,9%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
49_coordpp2	1.553	2,4%	2.194	3,5%	74,99%	-121,3%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
49_coordpp3	915	2,1%	1.780	4,1%	99,98%	-80,2%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
49_coordpp4	10	0,0%	1.239	2,9%	99,98%	-86,0%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
50_coordpp1	62.710	51,1%	62.801	51,5%	100,00%	-83,5%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
50_coordpp2	62.679	51,3%	62.719	51,5%	100,00%	-84,7%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
50_coordpp3	19.706	31,3%	20.342	32,7%	99,99%	-31,1%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
50_coordpp4	19.134	30,7%	19.822	32,3%	99,99%	-33,6%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
51_coordpp1	-499	-1,1%	46	0,1%	0,00%	-2,1%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
51_coordpp2	42	0,1%	-366	-0,9%	0,00%	0,2%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
51_coordpp3	-62	-0,2%	-119	-0,4%	0,00%	-0,3%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
51_coordpp4	280	0,8%	-32	-0,1%	0,00%	1,2%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
52_coordpp1	2.005	1,5%	2.703	2,1%	0,00%	1,5%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
52_coordpp2	-212	-0,2%	72	0,1%	0,00%	-0,2%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
52_coordpp3	-385	-0,3%	12	0,0%	0,00%	-0,3%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
52_coordpp4	-35	0,0%	28	0,0%	0,00%	0,0%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Alle Instanzen												
Problem Instance	Total Cost avg		Total Cost min		Depot Costs		Routing Costs		Vehicles		Depots	
	Difference	Deviation	Difference	Deviation	Deviation	Deviation	Deviation	Deviation	Deviation	Deviation		
53_coordpp1	2.437	2,3%	2.520	2,4%	6,69%	-0,4%	0,0	0,0				
53_coordpp2	2.281	2,3%	1.434	1,5%	0,00%	3,9%	-0,4	0,0				
53_coordpp3	-1.711	-1,6%	686	0,7%	0,00%	-2,8%	0,0	0,0				
53_coordpp4	4.844	4,7%	4.082	4,1%	10,82%	1,9%	0,8	1,0				
54_coordpp1	20.974	28,9%	20.813	29,0%	99,97%	-21,1%	0,0	-1,0				
54_coordpp2	21.477	29,6%	21.596	29,9%	99,97%	-20,8%	0,0	-1,0				
54_coordpp3	20.997	28,9%	21.418	29,7%	99,97%	-21,1%	0,0	-1,0				
54_coordpp4	-129	-0,2%	-352	-0,5%	0,00%	-0,3%	0,0	0,0				
55_coordpp1	-1.364	-1,4%	-1.279	-1,4%	0,00%	-2,1%	0,0	0,0				
55_coordpp2	-1.904	-2,0%	-2.213	-2,4%	0,00%	-2,9%	0,0	0,0				
55_coordpp3	341	0,4%	517	0,5%	0,00%	0,5%	0,0	0,0				
55_coordpp4	79	0,1%	-459	-0,5%	0,00%	0,1%	0,0	0,0				
56_coordpp1	-3.172	-3,3%	297	0,3%	0,00%	-4,9%	0,0	0,0				
56_coordpp2	9.903	10,1%	4.991	5,5%	36,99%	-1,9%	-0,6	1,0				
56_coordpp3	-4.279	-3,8%	-5.613	-5,2%	21,40%	-21,1%	0,3	0,5				
56_coordpp4	3.691	3,3%	5.214	4,7%	15,60%	-4,9%	0,7	1,0				
57_coordpp1	1.102	0,7%	-851	-0,6%	0,00%	0,9%	0,0	0,0				
57_coordpp2	-382	-0,2%	-1.020	-0,6%	-4,88%	1,2%	-0,1	0,0				
57_coordpp3	2.556	1,5%	-6.020	-3,7%	-2,29%	3,9%	-0,2	-0,3				
57_coordpp4	-13.652	-6,9%	-11.326	-5,8%	-1,38%	-10,9%	0,4	0,0				
58_coordpp1	1.140	0,8%	-142	-0,1%	0,00%	1,7%	-0,1	0,0				
58_coordpp2	6.174	5,7%	4.870	4,8%	24,28%	-6,6%	0,0	0,0				
58_coordpp3	-6.016	-4,5%	-6.079	-4,6%	-9,25%	1,1%	0,0	0,0				
58_coordpp4	3.576	2,0%	3.572	2,0%	7,74%	-8,9%	0,0	0,0				
59_coordpp1	-1.318	-0,8%	47	0,0%	0,00%	-0,9%	-0,2	0,0				
59_coordpp2	-21.396	-11,9%	-13.711	-7,8%	26,92%	-25,9%	0,2	0,9				
59_coordpp3	-12.056	-6,0%	-6.331	-3,2%	-12,43%	-2,6%	0,4	-0,4				
59_coordpp4	-511	-0,3%	-4.152	-2,3%	7,34%	-4,9%	-0,4	0,0				
60_coordpp1	288	0,4%	1.138	1,4%	0,00%	0,3%	0,0	0,0				
60_coordpp2	-132	-0,1%	-785	-0,8%	0,00%	-0,2%	0,0	0,0				
60_coordpp3	10.124	5,8%	8.418	4,9%	13,45%	-7,9%	0,3	2,0				
60_coordpp4	-2.079	-1,7%	-109	-0,1%	0,00%	-2,8%	0,0	0,0				
61_coordpp1	-12.195	-5,3%	-12.593	-5,6%	-3,03%	-7,7%	0,0	0,0				
61_coordpp2	36	0,0%	-679	-0,3%	0,00%	0,0%	0,0	0,0				
61_coordpp3	755	0,3%	1.383	0,6%	0,00%	0,9%	0,1	0,0				
61_coordpp4	-12.765	-4,2%	-13.264	-4,4%	1,80%	-14,4%	0,2	0,0				
62_coordpp1	881	0,5%	1.003	0,5%	0,00%	0,7%	0,2	0,0				
62_coordpp2	21.157	8,1%	20.632	8,0%	-1,69%	13,1%	-0,5	0,0				
62_coordpp3	-18.000	-9,7%	-17.750	-9,6%	-12,34%	-7,9%	-0,1	-1,0				
62_coordpp4	-632	-0,2%	-2.349	-0,8%	0,00%	-0,6%	0,0	0,0				
63_coordpp1	52.095	46,8%	42.738	42,4%	99,99%	-63,1%	0,0	0,0				
63_coordpp2	53.824	47,4%	41.773	42,1%	99,99%	-68,2%	0,0	0,0				
63_coordpp3	18.239	30,2%	2.734	6,5%	99,99%	-26,2%	0,0	0,0				
63_coordpp4	13.268	24,0%	276	0,7%	99,98%	-22,6%	0,0	0,0				
64_coordpp1	-6.616	-2,6%	-1.965	-0,8%	-6,00%	-2,6%	0,1	-0,2				
64_coordpp2	10.585	3,6%	16.300	5,7%	1,02%	5,2%	-0,3	0,1				
64_coordpp3	-18.022	-5,7%	-42.542	-16,4%	-17,62%	-2,8%	0,6	-0,2				
64_coordpp4	16.868	4,1%	12.372	3,1%	8,87%	-3,8%	0,0	0,0				
66_coordpp1	3.989	1,5%	-14.193	-6,3%	0,00%	1,9%	0,2	0,0				
66_coordpp2	-19.879	-6,7%	-10.891	-4,2%	-8,14%	-6,2%	0,0	-1,0				
66_coordpp3	-5.771	-2,1%	-18.138	-7,7%	3,54%	-3,5%	0,0	0,2				
66_coordpp4	10.739	4,0%	-5.164	-2,1%	2,06%	4,8%	-0,9	0,3				
67_coordpp1	882	1,1%	207	0,3%	0,00%	1,1%	0,0	0,0				
68_coordpp1	0	0,0%	0	0,0%	0,00%	0,0%	0,0	0,0				
69_coordpp1	-1.306	-1,1%	-541	-0,5%	0,00%	-1,7%	-0,2	0,0				
69_coordpp2	1.086	0,9%	-1.896	-1,7%	0,00%	1,4%	-0,4	0,0				
coord100-10-1	1.474	0,4%	2.666	0,8%	1,45%	-0,2%	0,0	0,0				
coord100-10-1b	-5.109	-1,8%	-5.580	-2,0%	-1,36%	-3,9%	0,0	0,0				
coord100-10-2	-2.464	-0,9%	2.980	1,2%	2,43%	-0,6%	0,0	0,0				
coord100-10-2b	-72	0,0%	-140	-0,1%	0,00%	-0,2%	0,0	0,0				
coord100-10-3	4.933	1,7%	5.893	2,2%	0,00%	4,9%	0,0	0,0				
coord100-10-3b	4.351	2,0%	5.541	2,6%	3,65%	0,4%	0,0	0,0				
coord100-5-1	-4.258	-1,4%	2.028	0,7%	-8,37%	8,2%	0,0	0,0				
coord100-5-1b	5.143	2,2%	4.987	2,2%	7,72%	-7,4%	0,0	0,0				
coord100-5-2	-736	-0,4%	246	0,1%	0,00%	0,3%	0,0	0,0				
coord100-5-2b	-801	-0,5%	834	0,5%	0,00%	1,9%	0,0	0,0				
coord100-5-3	-2.460	-1,1%	-448	-0,2%	0,00%	-0,4%	0,0	0,0				
coord100-5-3b	-839	-0,5%	-1.664	-1,1%	0,00%	-2,8%	0,0	0,0				

Alle Instanzen									
Problem Instance	Total Cost avg		Total Cost min		Depot Costs	Routing Costs	Vehicles	Depots	
	Difference	Deviation	Difference	Deviation	Deviation	Deviation	Deviation	Deviation	
coord20-5-1	-227	0,4%	0	0,0%	0,00%	0,0%	0,0	0,0	
coord20-5-1b	230	0,6%	0	0,0%	0,00%	0,0%	0,0	0,0	
coord20-5-2	1	0,0%	0	0,0%	0,00%	0,0%	0,0	0,0	
coord20-5-2b	44	0,1%	0	0,0%	0,00%	0,0%	0,0	0,0	
coord200-10-1	13.125	2,3%	15.081	2,8%	2,49%	3,2%	0,0	0,0	
coord200-10-1b	45.204	9,3%	32.554	7,4%	2,19%	15,3%	0,0	0,0	
coord200-10-2	46.926	8,7%	31.555	6,2%	2,04%	11,7%	0,0	0,0	
coord200-10-2b	3.691	0,9%	9.424	2,4%	2,04%	3,3%	0,0	0,0	
coord200-10-3	41.104	7,1%	-13.800	-2,7%	-17,05%	9,6%	-1,0	0,0	
coord200-10-3b	1.164	0,3%	2.203	0,6%	0,00%	1,6%	0,0	0,0	
coord50-5-1	476	0,5%	1.052	1,1%	0,00%	1,6%	0,0	0,0	
coord50-5-1b	4.605	6,6%	4.962	7,2%	39,53%	-1,7%	0,0	1,0	
coord50-5-2	955	1,0%	1.050	1,2%	0,00%	1,8%	0,0	0,0	
coord50-5-2b	325	0,5%	157	0,2%	10,38%	-9,1%	0,0	0,0	
coord50-5-2bBIS	37	0,1%	19	0,0%	0,00%	0,1%	0,0	0,0	
coord50-5-2BIS	-101	-0,1%	303	0,3%	0,00%	0,5%	0,0	0,0	
coord50-5-3	7.949	8,2%	8.066	8,5%	35,17%	3,4%	0,0	1,0	
coord50-5-3b	9.797	13,6%	9.339	13,1%	35,99%	3,2%	0,0	1,0	
coordpp50-5-4	11.606	12,0%	-7.563	-8,3%	24,88%	1,6%	-1,0	0,0	
coordpp50-5-4b	1.975	3,1%	1.045	1,7%	33,04%	-21,4%	0,0	1,0	
coordpp50-5-d	-5.095	-5,1%	-133	-0,1%	26,42%	-15,2%	1,0	1,0	
coordpp50-5-db	12.378	16,6%	1.166	1,6%	45,31%	-16,0%	0,0	1,0	
coordpp50-5-z	-12.274	-8,1%	649	1,0%	-23,23%	-15,9%	-1,0	0,0	
coordpp50-5-zb	1.392	2,9%	-442	-0,9%	16,63%	-7,3%	0,0	0,0	
coordpp50-10-4	-24.177	-28,2%	93	0,1%	21,31%	-2,0%	1,0	1,0	
coordpp50-10-4b	972	1,5%	2.647	4,2%	11,38%	2,2%	0,0	0,0	
coordpp50-10-d	4.203	4,0%	-1.424	-1,4%	5,67%	2,9%	0,0	0,0	
coordpp50-10-db	1.184	1,6%	7.011	10,2%	-21,37%	2,3%	0,0	0,0	
coordpp50-10-z	13.253	16,6%	-647	-0,8%	25,61%	7,5%	1,0	0,0	
coordpp50-10-zb	644	1,3%	2.707	5,5%	28,25%	-17,3%	0,0	1,0	
coordpp100-10-4	-21.252	-6,2%	-21.369	-6,7%	-4,29%	-10,7%	0,0	0,0	
coordpp100-10-4b	6.362	1,8%	-9.796	-3,0%	-14,29%	17,0%	0,0	-1,0	
coordpp100-10-d	-1.177	-0,3%	-24.121	-7,8%	-4,42%	-3,0%	0,0	0,0	
coordpp100-10-db	-3.459	-1,1%	-6.336	-2,1%	-3,46%	2,6%	0,0	0,0	
coordpp100-10-z	3.041	1,0%	6.190	2,1%	7,37%	3,2%	0,0	0,0	
coordpp100-10-zb	-229	-0,1%	-194	-0,1%	0,00%	0,4%	0,0	0,0	
coordpp100-5-4	-18.515	-6,4%	1.543	0,6%	1,24%	-0,2%	0,0	0,0	
coordpp100-5-4b	1.951	0,6%	3.262	1,2%	1,24%	1,2%	-1,0	0,0	
coordpp100-5-d	390	0,1%	-1.490	-0,6%	0,00%	1,2%	0,0	0,0	
coordpp100-5-db	2.767	1,3%	-1.435	-0,7%	0,00%	2,1%	0,0	0,0	
coordpp100-5-z	-2.314	-0,9%	305	0,1%	0,00%	0,3%	1,0	0,0	
coordpp100-5-zb	390	0,2%	397	0,2%	0,00%	0,9%	0,0	0,0	
coordpp200-10-4	-989	-0,1%	-9.108	-1,3%	-6,77%	7,9%	0,0	0,0	
coordpp200-10-4b	7.899	1,4%	10.654	1,9%	3,41%	4,7%	0,0	0,0	
coordpp200-10-d	11.748	1,7%	12.637	1,9%	3,61%	1,9%	0,0	0,0	
coordpp200-10-db	-12.260	-2,1%	-10.893	-1,9%	-3,75%	4,8%	0,0	0,0	
coordpp200-10-z	-28.117	-3,8%	6.971	1,0%	6,88%	-4,9%	1,0	0,0	
coordpp200-10-zb	24.007	3,7%	25.136	3,9%	6,88%	-0,6%	0,0	0,0	
coordpp200-5-4	-56.634	-9,8%	-72.205	-14,2%	-4,66%	-13,3%	0,0	0,0	
coordpp200-5-4b	9.473	2,1%	13.500	3,1%	0,00%	10,5%	0,0	0,0	
coordpp200-5-d	-5.238	-0,9%	-10.237	-1,8%	3,03%	3,1%	0,0	0,0	
coordpp200-5-db	-2.213	-0,5%	-1.888	-0,4%	0,00%	1,5%	0,0	0,0	
coordpp200-5-z	2.344	0,5%	-2.299	-0,5%	0,00%	1,6%	-1,0	0,0	
coordpp200-5-zb	-3.126	-0,8%	-1.947	-0,5%	0,00%	2,6%	0,0	0,0	

A.4 Gesamtauswertung Paarvergleich

		FLP + VRP		
		Max	∅	Min
LRP	Abweichung	51,5 %	0,8 %	-16,9 %
		+	0	-
VRP	Anzahl	158	13	155

		LRP		
		Max	∅	Min
LRP	Abweichung	44,1 %	2,5 %	-20,6 %
		+	0	-
VRP	Anzahl	226	12	88

		FLP + VRP		
		Max	∅	Min
LRP	Abweichung	73,5 %	-3,6 %	-93,2 %
		+	0	-
	Anzahl	116	12	198

A.5 Ergebnisse Optimierungsstudie dynamische LRP Modelle

A.5.1 Allgemein

Problem Instance	Fall 1		Fall 2		Fall 3		Fall 4	
	St	GK	St	GK	St	GK	St	GK
c0-AK-100-10-150-1000-2	563.656,72	3.270.327,72	243.095,89	2.984.415,89	0	2.746.631,00	0	3.557.852,00
c0-AK-100-10-70-1000-2	812.681,80	5.009.637,80	486.972,70	4.690.774,70	0	4.216.527,00	0	5.655.781,00
c0-AK-100-5-150-1000-2	667.173,87	3.132.309,87	324.207,22	2.828.365,22	0	2.547.703,00	0	2.509.209,00
c0-AK-100-5-70-1000-2	807.934,72	5.127.222,72	528.765,98	4.798.293,98	0	3.970.567,00	0	3.968.822,00
c0-AK-20-5-150-1000-2	108.164,02	1.234.977,02	63.118,90	1.192.119,90	0	1.132.244,00	0	1.124.964,00
c0-AK-20-5-70-1000-2	128.459,72	1.451.613,72	51.403,98	1.382.046,98	0	1.331.385,00	0	1.447.723,00
c0-AK-200-10-150-1000-2	1.360.186,52	6.246.253,52	610.618,61	5.516.135,61	0	5.195.265,00	0	6.661.165,00
c0-AK-200-10-70-1000-2	1.863.750,27	10.065.040,30	1.088.643,23	9.388.790,23	0	8.463.666,00	0	10.043.077,00
c0-AK-50-5-150-1000-2	256.979,41	1.849.601,41	80.542,78	1.676.796,78	0	1.554.159,00	0	1.560.259,00
c0-AK-50-5-70-1000-2	479.335,93	3.005.556,93	217.505,53	2.740.315,53	0	2.543.661,00	0	2.561.002,00
c0-KA-100-10-150-1000-2	922.365,27	5.511.389,27	578.562,14	5.216.577,14	0	4.305.798,00	0	5.827.055,00
c0-KA-100-10-70-1000-2	1.318.145,04	11.066.113,00	985.507,01	10.339.814,00	0	8.580.725,00	0	8.348.710,00
c0-KA-100-5-150-1000-2	1.197.162,52	6.201.123,52	808.468,10	5.954.806,10	0	4.090.465,00	0	5.036.001,00
c0-KA-100-5-70-1000-2	1.115.229,16	11.185.394,20	819.766,71	10.921.804,70	0	7.841.491,00	0	7.515.344,00
c0-KA-20-5-150-1000-2	165.094,48	1.467.129,48	117.667,39	1.428.995,39	0	1.317.583,00	0	1.398.599,00
c0-KA-20-5-70-1000-2	280.225,37	2.296.120,37	148.625,73	2.165.155,72	0	1.786.135,00	0	1.935.829,00
c0-KA-200-10-150-1000-2	1.952.075,98	10.904.913,00	1.213.624,20	9.823.870,20	0	9.081.027,00	0	10.288.075,00
c0-KA-200-10-70-1000-2	2.871.205,42	23.075.523,40	1.870.767,40	22.101.360,40	0	13.948.307,00	0	16.294.819,00
c0-KA-50-5-150-1000-2	413.923,32	2.828.332,32	317.775,93	2.589.878,93	0	2.187.519,00	0	2.665.222,00
c0-KA-50-5-70-1000-2	685.367,60	5.868.695,60	650.185,03	5.819.159,03	0	4.355.075,00	0	4.566.140,00
c0-KK-100-10-150-1000-2	512.077,52	4.736.804,52	139.821,11	4.389.597,11	0	4.222.375,00	0	5.924.754,00
c0-KK-100-10-70-1000-2	785.957,53	9.122.943,53	312.623,97	8.851.237,97	0	7.032.610,00	0	8.332.403,00
c0-KK-100-5-150-1000-2	781.388,44	5.547.283,44	199.600,67	5.033.237,66	0	4.488.135,00	0	5.022.448,00
c0-KK-100-5-70-1000-2	592.635,36	10.921.222,40	197.296,87	10.589.885,90	0	7.559.121,00	0	8.902.185,00
c0-KK-20-5-150-1000-2	36.874,64	1.109.892,64	4.211,74	1.090.632,74	0	1.081.671,00	0	1.209.064,00
c0-KK-20-5-70-1000-2	70.992,84	2.219.363,84	41.719,98	2.255.286,98	0	2.155.698,00	0	2.033.973,00
c0-KK-200-10-150-1000-2	1.368.459,35	9.676.840,35	386.256,37	8.771.678,37	0	8.677.922,00	0	12.045.418,00
c0-KK-200-10-70-1000-2	1.334.824,83	21.227.528,80	354.849,49	21.156.881,50	0	13.856.896,00	0	16.329.852,00
c0-KK-50-5-150-1000-2	258.305,26	2.790.463,26	69.420,41	2.571.079,41	0	2.540.218,00	0	3.019.600,00
c0-KK-50-5-70-1000-2	329.698,58	5.246.297,58	145.708,75	5.191.300,75	0	3.952.007,00	0	4.267.342,00
c2-AK-100-10-150-1000-1	367.103,67	2.593.953,67	204.693,74	2.434.571,74	0	2.265.990,00	0	3.066.846,00
c2-AK-100-10-70-1000-1	609.245,57	4.004.454,57	304.560,14	3.768.639,14	0	3.484.756,00	0	4.496.483,00
c2-AK-100-5-150-1000-1	767.427,99	3.217.320,99	378.434,23	2.842.817,23	0	2.506.378,00	0	2.702.248,00
c2-AK-100-5-70-1000-1	860.722,47	4.779.579,47	396.136,18	4.554.145,18	0	3.454.322,00	0	3.416.169,00
c2-AK-20-5-150-1000-1	61.198,74	962.310,74	32.242,59	939.787,59	0	906.956,00	0	907.342,00
c2-AK-20-5-70-1000-1	86.314,83	1.268.063,83	31.997,10	1.229.861,10	0	1.195.200,00	0	1.322.825,00
c2-AK-200-10-150-1000-1	848.510,88	4.707.221,88	469.484,32	4.547.256,32	0	4.231.102,00	0	5.278.791,00
c2-AK-200-10-70-1000-1	1.628.531,35	8.680.297,35	820.146,36	8.264.556,36	0	7.654.208,00	0	9.116.076,00
c2-AK-50-5-150-1000-1	290.195,24	1.842.167,24	128.656,25	1.688.491,25	0	1.577.796,00	0	1.680.808,00
c2-AK-50-5-70-1000-1	273.718,52	2.276.511,52	167.462,67	2.150.214,67	0	1.959.839,00	0	1.950.199,00
c2-KA-100-10-150-1000-1	617.152,02	4.200.321,02	429.997,50	3.950.157,50	0	3.583.928,00	0	4.565.171,00
c2-KA-100-10-70-1000-1	1.314.298,36	11.635.197,40	991.624,01	11.309.841,00	0	8.678.473,00	0	9.519.386,00
c2-KA-100-5-150-1000-1	856.556,93	4.686.250,93	550.240,87	4.187.971,87	0	3.005.380,00	0	3.703.544,00
c2-KA-100-5-70-1000-1	840.962,84	8.470.932,84	647.231,15	8.360.659,15	0	6.930.970,00	0	6.071.280,00
c2-KA-20-5-150-1000-1	220.497,79	1.664.180,79	135.685,25	1.602.506,25	0	1.317.410,00	0	1.514.319,00
c2-KA-20-5-70-1000-1	173.340,04	1.997.203,04	105.896,01	1.907.041,01	0	1.642.915,00	0	1.604.708,00
c2-KA-200-10-150-1000-1	1.659.339,42	8.946.181,42	993.238,99	8.140.933,99	0	7.281.260,00	0	9.566.833,00
c2-KA-200-10-70-1000-1	1.782.567,51	17.529.284,50	1.248.682,83	16.922.783,80	0	11.091.508,00	0	11.990.069,00
c2-KA-50-5-150-1000-1	283.418,97	1.914.310,97	157.181,69	1.756.717,69	0	1.605.476,00	0	1.725.171,00
c2-KA-50-5-70-1000-1	468.761,88	4.573.452,88	364.204,90	4.338.828,90	0	2.977.431,00	0	3.688.107,00
c2-KK-100-10-150-1000-1	632.109,25	4.856.301,25	249.725,90	4.554.737,90	0	4.366.650,00	0	5.936.167,00
c2-KK-100-10-70-1000-1	5.466.324,93	7.628.277,93	220.057,31	7.420.334,31	0	5.973.842,00	0	6.897.594,00
c2-KK-100-5-150-1000-1	525.142,97	4.402.324,97	121.937,62	3.933.187,62	0	3.780.564,00	0	3.766.420,00
c2-KK-100-5-70-1000-1	445.674,78	9.189.284,77	223.241,42	9.081.505,42	0	6.582.798,00	0	6.970.564,00

Problem Instance	Fall 1		Fall 2		Fall 3		Fall 4	
	St	GK	St	GK	St	GK	St	GK
c2-KK-20-5-150-1000-1	57.015,07	1.118.221,07	23.772,42	1.091.554,42	0	1.072.362,00	0	1.195.548,00
c2-KK-20-5-70-1000-1	60.383,72	1.354.219,72	28.595,64	1.326.657,64	0	1.283.110,00	0	1.388.283,00
c2-KK-200-10-150-1000-1	1.287.463,26	9.094.158,26	402.488,83	8.459.517,83	0	8.154.501,00	0	10.372.967,00
c2-KK-200-10-70-1000-1	1.508.092,98	19.356.322,00	411.852,52	18.842.447,50	0	13.091.703,00	0	15.032.804,00
c2-KK-50-5-150-1000-1	332.856,88	2.397.183,88	72.263,04	2.088.430,04	0	2.027.063,00	0	1.953.241,00
c2-KK-50-5-70-1000-1	530.763,10	7.785.957,10	193.512,13	7.641.081,13	0	6.436.788,00	0	6.421.124,00
c3-AK-100-10-150-1000-0	582.216,03	3.214.055,03	211.444,47	2.838.083,47	0	2.667.703,00	0	3.863.225,00
c3-AK-100-10-70-1000-0	875.588,83	4.708.070,83	414.379,66	4.310.905,66	0	3.935.892,00	0	5.564.645,00
c3-AK-100-5-150-1000-0	535.568,87	2.824.607,87	259.895,10	2.582.304,10	0	2.355.227,00	0	2.434.481,00
c3-AK-100-5-70-1000-0	782.782,02	4.955.636,02	395.959,11	4.641.638,11	0	3.909.868,00	0	3.943.522,00
c3-AK-20-5-150-1000-0	65.119,87	935.052,87	9.459,01	888.749,01	0	876.949,00	0	922.968,00
c3-AK-20-5-70-1000-0	100.796,20	1.140.826,20	78.207,42	1.122.641,42	0	1.047.966,00	0	1.081.128,00
c3-AK-200-10-150-1000-0	1.112.755,83	5.357.719,83	476.521,32	4.764.281,32	0	4.532.985,00	0	5.194.071,00
c3-AK-200-10-70-1000-0	1.675.860,13	9.365.032,13	935.969,90	9.230.406,90	0	7.706.325,00	0	10.140.517,00
c3-AK-50-5-150-1000-0	303.644,97	1.605.537,97	97.595,95	1.417.080,95	0	1.278.230,00	0	1.399.075,00
c3-AK-50-5-70-1000-0	321.082,75	2.581.246,75	235.137,67	2.539.728,67	0	2.351.845,00	0	2.413.005,00
c3-KA-100-10-150-1000-0	880.195,94	5.084.602,94	553.733,78	4.659.772,78	0	4.144.841,00	0	5.479.613,00
c3-KA-100-10-70-1000-0	1.000.013,69	9.717.206,69	771.564,73	9.530.188,73	0	6.219.418,00	0	7.519.289,00
c3-KA-100-5-150-1000-0	896.417,96	5.680.521,96	779.848,57	5.583.504,57	0	4.092.972,00	0	4.925.829,00
c3-KA-100-5-70-1000-0	1.187.895,96	10.780.109,00	867.248,37	10.454.953,40	0	7.738.712,00	0	7.333.115,00
c3-KA-20-5-150-1000-0	132.989,78	1.148.659,78	65.664,10	1.083.980,10	0	923.203,00	0	1.097.264,00
c3-KA-20-5-70-1000-0	200.811,51	2.349.000,51	119.889,93	2.287.338,93	0	1.751.097,00	0	2.089.867,00
c3-KA-200-10-150-1000-0	1.724.214,24	9.943.025,24	1.252.249,36	9.744.417,36	0	8.778.589,00	0	10.148.886,00
c3-KA-200-10-70-1000-0	2.497.803,97	22.129.785,00	1.595.373,74	20.420.362,70	0	13.760.287,00	0	14.568.965,00
c3-KA-50-5-150-1000-0	310.905,30	2.346.600,30	234.668,96	2.212.946,96	0	1.732.240,00	0	2.379.159,00
c3-KA-50-5-70-1000-0	534.704,71	4.993.617,71	355.923,09	4.753.772,09	0	3.249.202,00	0	3.863.339,00
c3-KK-100-10-150-1000-0	552.998,71	4.452.870,71	153.114,56	4.240.564,56	0	4.057.066,00	0	4.138.695,00
c3-KK-100-10-70-1000-0	719.868,28	9.570.587,28	201.627,11	9.540.786,11	0	6.545.907,00	0	8.298.810,00
c3-KK-100-5-150-1000-0	646.802,89	4.904.177,89	261.455,69	4.597.643,69	0	3.949.372,00	0	3.766.825,00
c3-KK-100-5-70-1000-0	519.171,96	10.076.851,00	167.499,73	9.749.841,72	0	7.043.495,00	0	8.381.678,00
c3-KK-20-5-150-1000-0	155.951,31	1.554.497,31	51.095,30	1.470.594,30	0	1.416.693,00	0	1.519.781,00
c3-KK-20-5-70-1000-0	102.053,58	2.047.459,58	35.922,90	2.058.821,90	0	1.841.647,00	0	2.040.403,00
c3-KK-200-10-150-1000-0	1.171.764,53	8.894.413,53	354.217,83	8.058.352,83	0	8.068.244,00	0	8.973.731,00
c3-KK-200-10-70-1000-0	2.008.954,24	23.627.025,20	575.732,23	22.721.081,20	0	15.156.342,00	0	18.064.519,00
c3-KK-50-5-150-1000-0	302.035,72	2.420.646,72	80.300,23	2.219.754,23	0	2.120.241,00	0	2.150.240,00
c3-KK-50-5-70-1000-0	277.165,87	4.625.957,87	110.649,33	4.575.222,32	0	3.619.601,00	0	3.975.288,00
Total		543.562.765,25		517.097.250,47		413.755.424,00		475.745.707,00

A.5.2 Nach Cluster

Problem Instance	Fall 1		Fall 2		Fall 3		Fall 4	
	St	GK	St	GK	St	GK	St	GK
0 Cluster								
c0-AK-100-10-150-1000-2	563.656,72	3.270.327,72	243.095,89	2.984.415,89	0	2.746.631,00	0	3.557.852,00
c0-AK-100-10-70-1000-2	812.681,80	5.009.637,80	486.972,70	4.690.774,70	0	4.216.527,00	0	5.655.781,00
c0-AK-100-5-150-1000-2	667.173,87	3.132.309,87	324.207,22	2.828.365,22	0	2.547.703,00	0	2.509.209,00
c0-AK-100-5-70-1000-2	807.934,72	5.127.222,72	528.765,98	4.798.293,98	0	3.970.567,00	0	3.968.822,00
c0-AK-20-5-150-1000-2	108.164,02	1.234.977,02	63.118,90	1.192.119,90	0	1.132.244,00	0	1.124.964,00
c0-AK-20-5-70-1000-2	128.459,72	1.451.613,72	51.403,98	1.382.046,98	0	1.331.385,00	0	1.447.723,00
c0-AK-200-10-150-1000-2	1.360.186,52	6.246.253,52	610.618,61	5.516.135,61	0	5.195.265,00	0	6.661.165,00
c0-AK-200-10-70-1000-2	1.963.750,27	10.065.040,30	1.088.643,23	9.388.790,23	0	8.463.666,00	0	10.043.077,00
c0-AK-50-5-150-1000-2	256.979,41	1.849.601,41	80.542,78	1.676.796,78	0	1.554.159,00	0	1.560.259,00
c0-AK-50-5-70-1000-2	479.335,93	3.005.556,93	217.505,53	2.740.315,53	0	2.543.661,00	0	2.561.002,00
c0-KA-100-10-150-1000-2	922.365,27	5.511.389,27	578.562,14	5.216.577,14	0	4.305.798,00	0	5.827.055,00
c0-KA-100-10-70-1000-2	1.318.145,04	11.066.113,00	985.507,01	10.339.814,00	0	8.580.725,00	0	8.348.710,00
c0-KA-100-5-150-1000-2	1.197.162,52	6.201.123,52	808.468,10	5.954.806,10	0	4.090.465,00	0	5.036.001,00
c0-KA-100-5-70-1000-2	1.115.229,16	11.185.394,20	819.766,71	10.921.804,70	0	7.841.491,00	0	7.515.344,00
c0-KA-20-5-150-1000-2	165.094,48	1.467.129,48	117.667,39	1.428.995,39	0	1.317.583,00	0	1.398.599,00
c0-KA-20-5-70-1000-2	280.225,37	2.296.120,37	148.625,73	2.165.155,72	0	1.786.135,00	0	1.935.829,00
c0-KA-200-10-150-1000-2	1.952.075,98	10.904.913,00	1.213.624,20	9.823.870,20	0	9.081.027,00	0	10.288.075,00
c0-KA-200-10-70-1000-2	2.871.205,42	23.075.523,40	1.870.767,40	22.101.360,40	0	13.948.307,00	0	16.294.819,00
c0-KA-50-5-150-1000-2	413.923,32	2.828.332,32	317.775,93	2.589.878,93	0	2.187.519,00	0	2.865.222,00
c0-KA-50-5-70-1000-2	685.367,60	5.868.695,60	650.185,03	5.819.159,03	0	4.355.075,00	0	4.566.140,00
c0-KK-100-10-150-1000-2	512.077,52	4.736.804,52	139.821,11	4.389.597,11	0	4.222.375,00	0	5.924.754,00
c0-KK-100-10-70-1000-2	785.957,53	9.122.943,53	312.623,97	8.851.237,97	0	7.032.610,00	0	8.332.403,00
c0-KK-100-5-150-1000-2	781.388,44	5.547.283,44	199.600,67	5.033.237,66	0	4.488.135,00	0	5.022.448,00
c0-KK-100-5-70-1000-2	592.635,36	10.921.222,40	197.296,87	10.589.885,90	0	7.559.121,00	0	8.902.185,00
c0-KK-20-5-150-1000-2	36.874,64	1.109.892,64	4.211,74	1.090.632,74	0	1.081.671,00	0	1.209.064,00
c0-KK-20-5-70-1000-2	70.992,84	2.219.363,84	41.719,98	2.255.286,98	0	2.155.698,00	0	2.033.973,00
c0-KK-200-10-150-1000-2	1.368.459,35	9.676.840,35	386.256,37	8.771.678,37	0	8.677.922,00	0	12.045.418,00
c0-KK-200-10-70-1000-2	1.334.824,83	21.227.528,80	354.949,49	21.156.881,50	0	13.856.896,00	0	16.329.852,00
c0-KK-50-5-150-1000-2	258.305,26	2.790.463,26	69.420,41	2.571.079,41	0	2.540.218,00	0	3.019.600,00
c0-KK-50-5-70-1000-2	329.698,58	5.246.297,58	145.708,75	5.191.300,75	0	3.952.007,00	0	4.267.342,00
Total 0 Cluster	24.040.331,49	193.395.915,53	13.057.333,80	183.460.294,82	0	146.762.586,00	0	170.252.687,00
Vergleich 3vs...		-24,11%		-20,00%				-13,80%
2 Cluster								
c2-AK-100-10-150-1000-1	367.103,67	2.593.953,67	204.693,74	2.434.571,74	0	2.265.990,00	0	3.066.846,00
c2-AK-100-10-70-1000-1	609.245,57	4.004.454,57	304.560,14	3.768.639,14	0	3.484.756,00	0	4.496.483,00
c2-AK-100-5-150-1000-1	767.427,99	3.217.320,99	378.434,23	2.842.817,23	0	2.506.378,00	0	2.702.248,00
c2-AK-100-5-70-1000-1	850.722,47	4.779.579,47	396.136,18	4.554.145,18	0	3.454.322,00	0	3.416.169,00
c2-AK-20-5-150-1000-1	61.198,74	962.310,74	32.242,59	939.787,59	0	906.956,00	0	907.342,00
c2-AK-20-5-70-1000-1	86.314,83	1.268.063,83	31.997,10	1.229.861,10	0	1.195.200,00	0	1.322.825,00
c2-AK-200-10-150-1000-1	848.510,88	4.707.221,88	469.484,32	4.547.256,32	0	4.231.102,00	0	5.278.791,00
c2-AK-200-10-70-1000-1	1.629.531,35	8.680.297,35	820.146,36	8.264.556,36	0	7.654.208,00	0	9.116.076,00
c2-AK-50-5-150-1000-1	290.195,24	1.842.167,24	128.656,25	1.688.491,25	0	1.577.796,00	0	1.680.808,00
c2-AK-50-5-70-1000-1	273.718,52	2.276.511,52	167.462,67	2.150.214,67	0	1.959.839,00	0	1.950.199,00
c2-KA-100-10-150-1000-1	617.152,02	4.200.321,02	429.997,50	3.950.157,50	0	3.583.928,00	0	4.565.171,00
c2-KA-100-10-70-1000-1	1.314.298,36	11.635.197,40	991.624,01	11.309.841,00	0	8.678.473,00	0	9.519.386,00
c2-KA-100-5-150-1000-1	856.556,93	4.686.250,93	550.240,87	4.187.971,87	0	3.005.380,00	0	3.703.544,00
c2-KA-100-5-70-1000-1	840.962,84	8.470.932,84	647.231,15	8.360.659,15	0	6.930.970,00	0	6.071.280,00
c2-KA-20-5-150-1000-1	220.497,79	1.664.180,79	135.685,25	1.602.506,25	0	1.317.410,00	0	1.514.319,00
c2-KA-20-5-70-1000-1	173.340,04	1.997.203,04	105.896,01	1.907.041,01	0	1.642.915,00	0	1.604.708,00
c2-KA-200-10-150-1000-1	1.659.339,42	8.946.181,42	993.238,99	8.140.933,99	0	7.281.260,00	0	9.566.833,00
c2-KA-200-10-70-1000-1	1.782.567,51	17.529.284,50	1.248.682,83	16.922.783,80	0	11.091.508,00	0	11.990.069,00
c2-KA-50-5-150-1000-1	283.418,97	1.914.310,97	157.181,69	1.756.717,69	0	1.605.476,00	0	1.725.171,00
c2-KA-50-5-70-1000-1	468.761,88	4.573.452,88	364.204,90	4.338.828,90	0	2.977.431,00	0	3.688.107,00

Anhang

Problem Instance	Fall 1		Fall 2		Fall 3		Fall 4	
	St	GK	St	GK	St	GK	St	GK
c2-KK-100-10-150-1000-1	632.109,25	4.856.301,25	249.725,90	4.554.737,90	0	4.366.650,00	0	5.936.167,00
c2-KK-100-10-70-1000-1	546.324,93	7.628.277,93	220.057,31	7.420.334,31	0	5.973.842,00	0	6.897.594,00
c2-KK-100-5-150-1000-1	525.142,97	4.402.324,97	121.937,62	3.933.187,62	0	3.780.564,00	0	3.766.420,00
c2-KK-100-5-70-1000-1	445.674,78	9.189.284,77	223.241,42	9.081.505,42	0	6.582.798,00	0	6.970.564,00
c2-KK-20-5-150-1000-1	57.015,07	1.118.221,07	23.772,42	1.091.554,42	0	1.072.362,00	0	1.195.548,00
c2-KK-20-5-70-1000-1	60.383,72	1.354.219,72	28.595,64	1.326.657,64	0	1.283.110,00	0	1.388.283,00
c2-KK-200-10-150-1000-1	1.287.463,26	9.094.158,26	402.488,83	8.459.517,83	0	8.154.501,00	0	10.372.967,00
c2-KK-200-10-70-1000-1	1.508.092,98	19.356.322,00	411.852,52	18.842.447,50	0	13.091.703,00	0	15.032.804,00
c2-KK-50-5-150-1000-1	332.856,88	2.397.183,88	72.263,04	2.088.430,04	0	2.027.063,00	0	1.953.241,00
c2-KK-50-5-70-1000-1	530.763,10	7.785.957,10	193.512,13	7.641.081,13	0	6.436.788,00	0	6.421.124,00
Total 2 Cluster	19.925.691,95	167.131.448,00	10.505.243,63	159.337.235,55	0	130.120.679,00	0	147.821.087,00
Vergleich 3vs...		-22,14%		-18,34%				-11,97%
3 Cluster								
c3-AK-100-10-150-1000-0	582.216,03	3.214.055,03	211.444,47	2.838.083,47	0	2.667.703,00	0	3.863.225,00
c3-AK-100-10-70-1000-0	875.588,83	4.708.070,83	414.379,66	4.310.905,66	0	3.935.892,00	0	5.564.645,00
c3-AK-100-5-150-1000-0	535.568,87	2.824.607,87	259.895,10	2.582.304,10	0	2.355.227,00	0	2.434.481,00
c3-AK-100-5-70-1000-0	782.782,02	4.955.636,02	395.959,11	4.641.638,11	0	3.909.868,00	0	3.943.522,00
c3-AK-20-5-150-1000-0	65.119,87	935.052,87	9.459,01	888.749,01	0	876.949,00	0	922.968,00
c3-AK-20-5-70-1000-0	100.796,20	1.140.826,20	78.207,42	1.122.641,42	0	1.047.966,00	0	1.081.128,00
c3-AK-200-10-150-1000-0	1.112.755,83	5.357.719,83	476.521,32	4.764.281,32	0	4.532.985,00	0	5.194.071,00
c3-AK-200-10-70-1000-0	1.675.850,13	9.365.032,13	935.969,90	9.230.406,90	0	7.706.325,00	0	10.140.517,00
c3-AK-50-5-150-1000-0	303.644,97	1.605.537,97	97.595,95	1.417.080,95	0	1.278.230,00	0	1.399.075,00
c3-AK-50-5-70-1000-0	321.082,75	2.581.246,75	235.137,67	2.539.728,67	0	2.351.845,00	0	2.413.005,00
c3-KA-100-10-150-1000-0	880.195,94	5.084.602,94	563.733,78	4.659.772,78	0	4.144.841,00	0	5.479.613,00
c3-KA-100-10-70-1000-0	1.000.013,69	9.717.206,69	771.564,73	9.530.188,73	0	6.219.418,00	0	7.519.289,00
c3-KA-100-5-150-1000-0	896.417,96	5.680.521,96	779.848,57	5.583.504,57	0	4.092.972,00	0	4.925.829,00
c3-KA-100-5-70-1000-0	1.187.895,96	10.780.109,00	867.248,37	10.454.953,40	0	7.738.712,00	0	7.333.115,00
c3-KA-20-5-150-1000-0	132.989,78	1.148.659,78	65.664,10	1.083.980,10	0	923.203,00	0	1.097.264,00
c3-KA-20-5-70-1000-0	200.811,51	2.349.000,51	119.889,93	2.287.338,93	0	1.751.097,00	0	2.089.867,00
c3-KA-200-10-150-1000-0	1.724.214,24	9.943.025,24	1.252.249,36	9.744.417,36	0	8.778.589,00	0	10.148.886,00
c3-KA-200-10-70-1000-0	2.497.803,97	22.129.785,00	1.595.373,74	20.420.362,70	0	13.760.287,00	0	14.568.965,00
c3-KA-50-5-150-1000-0	310.905,30	2.346.600,30	234.668,96	2.212.946,96	0	1.732.240,00	0	2.379.159,00
c3-KA-50-5-70-1000-0	534.704,71	4.993.617,71	355.923,09	4.753.772,09	0	3.249.202,00	0	3.863.339,00
c3-KK-100-10-150-1000-0	552.998,71	4.452.870,71	153.114,56	4.240.564,56	0	4.057.066,00	0	4.138.695,00
c3-KK-100-10-70-1000-0	719.868,28	9.570.587,28	201.627,11	9.540.786,11	0	6.545.907,00	0	8.298.810,00
c3-KK-100-5-150-1000-0	646.802,89	4.904.177,89	261.455,69	4.597.643,69	0	3.949.372,00	0	3.766.825,00
c3-KK-100-5-70-1000-0	519.171,96	10.076.851,00	167.499,73	9.749.841,72	0	7.043.495,00	0	8.381.678,00
c3-KK-20-5-150-1000-0	155.951,31	1.554.497,31	51.095,30	1.470.594,30	0	1.416.693,00	0	1.519.781,00
c3-KK-20-5-70-1000-0	102.053,58	2.047.459,58	35.922,90	2.058.821,90	0	1.841.647,00	0	2.040.403,00
c3-KK-200-10-150-1000-0	1.171.764,53	8.894.413,53	354.217,83	8.058.352,83	0	8.068.244,00	0	8.973.731,00
c3-KK-200-10-70-1000-0	2.008.954,24	23.627.025,20	575.732,23	22.721.081,20	0	15.156.342,00	0	18.064.519,00
c3-KK-50-5-150-1000-0	302.035,72	2.420.646,72	80.300,23	2.219.754,23	0	2.120.241,00	0	2.150.240,00
c3-KK-50-5-70-1000-0	277.165,87	4.625.957,87	110.649,33	4.575.222,32	0	3.619.601,00	0	3.975.288,00
Total 3 Cluster	22.178.125,63	183.035.401,72	11.702.349,13	174.299.720,09	0	136.872.159,00	0	157.671.933,00
Vergleich 3vs...		-25,22%		-21,47%				-13,19%

A.5.3 Nach Depots

Problem Instance	Fall 1		Fall 2		Fall 3		Fall 4	
	St	GK	St	GK	St	GK	St	GK
5								
c0-AK-100-5-150-1000-2	667.173,87	3.132.309,87	324.207,22	2.828.365,22	0	2.547.703,00	0	2.509.209,00
c0-AK-100-5-70-1000-2	807.934,72	5.127.222,72	528.765,98	4.798.293,98	0	3.970.567,00	0	3.968.822,00
c0-AK-20-5-150-1000-2	108.164,02	1.234.977,02	63.118,90	1.192.119,90	0	1.132.244,00	0	1.124.964,00
c0-AK-20-5-70-1000-2	128.459,72	1.451.613,72	51.403,98	1.382.046,98	0	1.331.385,00	0	1.447.723,00
c0-AK-50-5-150-1000-2	256.979,41	1.849.601,41	80.542,78	1.676.796,78	0	1.554.159,00	0	1.560.259,00
c0-AK-50-5-70-1000-2	479.335,93	3.005.556,93	217.505,53	2.740.315,53	0	2.543.661,00	0	2.561.002,00
c0-KA-100-5-150-1000-2	1.197.162,52	6.201.123,52	808.468,10	5.954.806,10	0	4.090.465,00	0	5.036.001,00
c0-KA-100-5-70-1000-2	1.115.229,16	11.185.394,20	819.768,71	10.921.804,70	0	7.841.491,00	0	7.515.344,00
c0-KA-20-5-150-1000-2	165.094,48	1.467.129,48	117.667,39	1.428.995,39	0	1.317.583,00	0	1.398.599,00
c0-KA-20-5-70-1000-2	280.225,37	2.296.120,37	148.625,73	2.165.155,72	0	1.786.135,00	0	1.935.829,00
c0-KA-50-5-150-1000-2	413.923,32	2.828.332,32	317.775,93	2.589.878,93	0	2.187.519,00	0	2.865.222,00
c0-KA-50-5-70-1000-2	685.367,60	5.868.695,60	650.185,03	5.819.159,03	0	4.355.075,00	0	4.566.140,00
c0-KK-100-5-150-1000-2	781.388,44	5.547.283,44	199.600,67	5.033.237,66	0	4.488.135,00	0	5.022.448,00
c0-KK-100-5-70-1000-2	592.635,36	10.921.222,40	197.296,87	10.589.885,90	0	7.559.121,00	0	8.902.185,00
c0-KK-20-5-150-1000-2	36.874,64	1.109.892,64	4.211,74	1.090.632,74	0	1.081.671,00	0	1.209.064,00
c0-KK-20-5-70-1000-2	70.992,84	2.219.363,84	41.719,98	2.255.286,98	0	2.155.698,00	0	2.033.973,00
c0-KK-50-5-150-1000-2	258.305,26	2.790.463,26	69.420,41	2.571.079,41	0	2.540.218,00	0	3.019.600,00
c0-KK-50-5-70-1000-2	329.698,58	5.246.297,58	145.708,75	5.191.300,75	0	3.952.007,00	0	4.267.342,00
c2-AK-100-5-150-1000-1	767.427,99	3.217.320,99	378.434,23	2.842.817,23	0	2.506.378,00	0	2.702.248,00
c2-AK-100-5-70-1000-1	850.722,47	4.779.579,47	396.136,18	4.554.145,18	0	3.454.322,00	0	3.416.169,00
c2-AK-20-5-150-1000-1	61.198,74	962.310,74	32.242,59	939.787,59	0	906.956,00	0	907.342,00
c2-AK-20-5-70-1000-1	86.314,83	1.268.063,83	31.997,10	1.229.861,10	0	1.195.200,00	0	1.322.825,00
c2-AK-50-5-150-1000-1	290.195,24	1.842.167,24	128.856,25	1.688.491,25	0	1.577.796,00	0	1.680.808,00
c2-AK-50-5-70-1000-1	273.718,52	2.276.511,52	167.462,67	2.150.214,67	0	1.959.839,00	0	1.950.199,00
c2-KA-100-5-150-1000-1	856.556,93	4.686.250,93	550.240,87	4.187.971,87	0	3.005.380,00	0	3.703.544,00
c2-KA-100-5-70-1000-1	840.962,84	8.470.932,84	647.231,15	8.360.659,15	0	6.930.970,00	0	6.071.280,00
c2-KA-20-5-150-1000-1	220.497,79	1.664.180,79	135.885,25	1.602.506,25	0	1.317.410,00	0	1.514.319,00
c2-KA-20-5-70-1000-1	173.340,04	1.997.203,04	105.896,01	1.907.041,01	0	1.642.915,00	0	1.604.708,00
c2-KA-50-5-150-1000-1	283.418,97	1.914.310,97	157.181,69	1.756.717,69	0	1.605.476,00	0	1.725.171,00
c2-KA-50-5-70-1000-1	468.761,88	4.573.452,88	364.204,90	4.338.828,90	0	2.977.431,00	0	3.688.107,00
c2-KK-100-5-150-1000-1	525.142,97	4.402.324,97	121.937,62	3.933.187,62	0	3.780.564,00	0	3.766.420,00
c2-KK-100-5-70-1000-1	445.674,78	9.189.284,77	223.241,42	9.081.505,42	0	6.582.798,00	0	6.970.564,00
c2-KK-20-5-150-1000-1	57.015,07	1.118.221,07	23.772,42	1.091.554,42	0	1.072.362,00	0	1.195.548,00
c2-KK-20-5-70-1000-1	60.383,72	1.354.219,72	28.595,64	1.326.657,64	0	1.283.110,00	0	1.388.283,00
c2-KK-50-5-150-1000-1	332.856,88	2.397.183,88	72.263,04	2.088.430,04	0	2.027.063,00	0	1.953.241,00
c2-KK-50-5-70-1000-1	530.763,10	7.785.957,10	193.512,13	7.641.081,13	0	6.436.788,00	0	6.421.124,00
c3-AK-100-5-150-1000-0	535.568,87	2.824.607,87	259.895,10	2.582.304,10	0	2.355.227,00	0	2.434.481,00
c3-AK-100-5-70-1000-0	782.782,02	4.955.636,02	395.959,11	4.641.638,11	0	3.909.868,00	0	3.943.522,00
c3-AK-20-5-150-1000-0	65.119,87	935.052,87	9.459,01	888.749,01	0	876.949,00	0	922.968,00
c3-AK-20-5-70-1000-0	100.796,20	1.140.826,20	78.207,42	1.122.641,42	0	1.047.966,00	0	1.081.128,00
c3-AK-50-5-150-1000-0	303.644,97	1.605.537,97	97.595,95	1.417.080,95	0	1.278.230,00	0	1.399.075,00
c3-AK-50-5-70-1000-0	321.082,75	2.581.246,75	235.137,67	2.539.728,67	0	2.351.845,00	0	2.413.005,00
c3-KA-100-5-150-1000-0	896.417,96	5.680.521,96	779.848,57	5.583.504,57	0	4.092.972,00	0	4.925.829,00
c3-KA-100-5-70-1000-0	1.187.895,96	10.780.109,00	867.248,37	10.454.953,40	0	7.738.712,00	0	7.333.115,00
c3-KA-20-5-150-1000-0	132.989,78	1.148.659,78	65.664,10	1.083.980,10	0	923.203,00	0	1.097.264,00
c3-KA-20-5-70-1000-0	200.811,51	2.349.000,51	119.889,93	2.287.338,93	0	1.751.097,00	0	2.089.867,00
c3-KA-50-5-150-1000-0	310.905,30	2.346.600,30	234.668,96	2.212.946,96	0	1.732.240,00	0	2.379.159,00
c3-KA-50-5-70-1000-0	534.704,71	4.993.617,71	355.923,09	4.753.772,09	0	3.249.202,00	0	3.863.339,00
c3-KK-100-5-150-1000-0	646.802,89	4.904.177,89	261.455,69	4.597.643,69	0	3.949.372,00	0	3.766.825,00
c3-KK-100-5-70-1000-0	519.171,96	10.076.851,00	167.499,73	9.749.841,72	0	7.043.495,00	0	8.381.678,00
c3-KK-20-5-150-1000-0	155.951,31	1.554.497,31	51.095,30	1.470.594,30	0	1.416.693,00	0	1.519.781,00
c3-KK-20-5-70-1000-0	102.053,58	2.047.459,58	35.922,90	2.058.821,90	0	1.841.647,00	0	2.040.403,00
c3-KK-50-5-150-1000-0	302.035,72	2.420.646,72	80.300,23	2.219.754,23	0	2.120.241,00	0	2.150.240,00

Anhang

Problem Instance	Fall 1		Fall 2		Fall 3		Fall 4	
	St	GK	St	GK	St	GK	St	GK
c3-KK-50-5-70-1000-0	277.165,87	4.625.957,87	110.649,33	4.575.222,32	0	3.619.601,00	0	3.975.288,00
Total 5		204.353.084,38		195.191.136,34		157.996.155,00		168.642.593,00
Vergleich 3vs...		-23%		-19%				-6%
10								
c0-AK-100-10-150-1000-2	563.656,72	3.270.327,72	243.095,89	2.984.415,89	0	2.746.631,00	0	3.557.852,00
c0-AK-100-10-70-1000-2	812.681,90	5.009.637,80	486.972,70	4.690.774,70	0	4.216.527,00	0	5.655.781,00
c0-AK-200-10-150-1000-2	1.360.186,52	6.246.253,52	610.618,61	5.516.135,61	0	5.195.265,00	0	6.661.165,00
c0-AK-200-10-70-1000-2	1.863.750,27	10.065.040,30	1.088.643,23	9.388.790,23	0	8.463.666,00	0	10.043.077,00
c0-KA-100-10-150-1000-2	922.365,27	5.511.389,27	578.562,14	5.216.577,14	0	4.305.798,00	0	5.827.055,00
c0-KA-100-10-70-1000-2	1.318.145,04	11.066.113,00	985.507,01	10.339.814,00	0	8.580.725,00	0	8.348.710,00
c0-KA-200-10-150-1000-2	1.952.075,98	10.904.913,00	1.213.624,20	9.823.870,20	0	9.081.027,00	0	10.288.075,00
c0-KA-200-10-70-1000-2	2.871.205,42	23.075.523,40	1.870.767,40	22.101.360,40	0	13.948.307,00	0	16.294.819,00
c0-KK-100-10-150-1000-2	512.077,52	4.736.804,52	139.821,11	4.389.597,11	0	4.222.375,00	0	5.924.754,00
c0-KK-100-10-70-1000-2	785.957,53	9.122.943,53	312.623,97	8.851.237,97	0	7.032.610,00	0	8.332.403,00
c0-KK-200-10-150-1000-2	1.368.459,35	9.676.840,35	386.256,37	8.771.678,37	0	8.677.922,00	0	12.045.418,00
c0-KK-200-10-70-1000-2	1.334.824,83	21.227.528,80	354.849,49	21.156.881,50	0	13.856.896,00	0	16.329.852,00
c2-AK-100-10-150-1000-1	367.103,67	2.593.953,67	204.693,74	2.434.571,74	0	2.265.990,00	0	3.066.846,00
c2-AK-100-10-70-1000-1	609.245,57	4.004.454,57	304.560,14	3.768.639,14	0	3.484.756,00	0	4.496.483,00
c2-AK-200-10-150-1000-1	848.510,88	4.707.221,88	469.484,32	4.547.256,32	0	4.231.102,00	0	5.278.791,00
c2-AK-200-10-70-1000-1	1.628.531,35	8.680.297,35	820.146,36	8.264.556,36	0	7.654.208,00	0	9.116.076,00
c2-KA-100-10-150-1000-1	617.152,02	4.200.321,02	429.997,50	3.950.157,50	0	3.583.928,00	0	4.565.171,00
c2-KA-100-10-70-1000-1	1.314.298,36	11.635.197,40	991.624,01	11.309.841,00	0	8.678.473,00	0	9.519.386,00
c2-KA-200-10-150-1000-1	1.659.339,42	8.946.181,42	993.238,99	8.140.933,99	0	7.281.260,00	0	9.566.833,00
c2-KA-200-10-70-1000-1	1.782.567,51	17.529.284,50	1.248.682,83	16.922.783,80	0	11.091.508,00	0	11.990.069,00
c2-KK-100-10-150-1000-1	632.109,25	4.856.301,25	249.725,90	4.554.737,90	0	4.366.650,00	0	5.936.167,00
c2-KK-100-10-70-1000-1	5.466.324,93	7.628.277,93	220.057,31	7.420.334,31	0	5.973.842,00	0	6.897.594,00
c2-KK-200-10-150-1000-1	1.287.463,26	9.094.158,26	402.488,83	8.459.517,83	0	8.154.501,00	0	10.372.967,00
c2-KK-200-10-70-1000-1	1.508.092,98	19.356.322,00	411.852,52	18.842.447,50	0	13.091.703,00	0	15.032.804,00
c3-AK-100-10-150-1000-0	582.216,03	3.214.055,03	211.444,47	2.838.083,47	0	2.667.703,00	0	3.863.225,00
c3-AK-100-10-70-1000-0	875.588,83	4.708.070,83	414.379,66	4.310.905,66	0	3.935.892,00	0	5.564.645,00
c3-AK-200-10-150-1000-0	1.112.755,83	5.357.719,83	476.521,32	4.764.281,32	0	4.532.985,00	0	5.194.071,00
c3-AK-200-10-70-1000-0	1.675.850,13	9.365.032,13	935.969,90	9.230.406,90	0	7.706.325,00	0	10.140.517,00
c3-KA-100-10-150-1000-0	880.195,94	5.084.602,94	553.733,78	4.659.772,78	0	4.144.841,00	0	5.479.613,00
c3-KA-100-10-70-1000-0	1.000.013,69	9.717.206,69	771.564,73	9.530.188,73	0	6.219.418,00	0	7.519.289,00
c3-KA-200-10-150-1000-0	1.724.214,24	9.943.025,24	1.252.249,36	9.744.417,36	0	8.778.589,00	0	10.148.886,00
c3-KA-200-10-70-1000-0	2.497.803,97	22.129.785,00	1.595.373,74	20.420.362,70	0	13.760.287,00	0	14.568.965,00
c3-KK-100-10-150-1000-0	552.998,71	4.452.870,71	153.114,56	4.240.564,56	0	4.057.066,00	0	4.138.695,00
c3-KK-100-10-70-1000-0	719.868,28	9.570.587,28	201.627,11	9.540.786,11	0	6.545.907,00	0	8.298.810,00
c3-KK-200-10-150-1000-0	1.171.764,53	8.894.413,53	354.217,83	8.058.352,83	0	8.068.244,00	0	8.973.731,00
c3-KK-200-10-70-1000-0	2.008.954,24	23.627.025,20	575.732,23	22.721.081,20	0	15.156.342,00	0	18.064.519,00
Total 10		339.209.680,87		321.906.114,13		255.759.269,00		307.103.114,00
Vergleich 3vs...		-25%		-21%				-17%
Total		543.562.765,25		517.097.250,47		413.755.424,00		475.745.707,00

A.5.4 Nach Kunden

Problem Instance	Fall 1		Fall 2		Fall 3		Fall 4	
	St	GK	St	GK	St	GK	St	GK
20								
c0-AK-20-5-150-1000-2	108.164,02	1.234.977,02	63.118,90	1.192.119,90	0	1.132.244,00	0	1.124.964,00
c0-AK-20-5-70-1000-2	128.459,72	1.451.613,72	51.403,98	1.382.046,98	0	1.331.385,00	0	1.447.723,00
c0-KA-20-5-150-1000-2	165.094,48	1.467.129,48	117.667,39	1.428.995,39	0	1.317.583,00	0	1.398.599,00
c0-KA-20-5-70-1000-2	280.225,37	2.296.120,37	148.625,73	2.165.155,72	0	1.786.135,00	0	1.935.829,00
c0-KK-20-5-150-1000-2	36.874,64	1.109.892,64	4.211,74	1.090.632,74	0	1.081.671,00	0	1.209.064,00
c0-KK-20-5-70-1000-2	70.992,84	2.219.363,84	41.719,98	2.255.286,98	0	2.155.698,00	0	2.033.973,00
c2-AK-20-5-150-1000-1	61.199,74	962.310,74	32.242,59	939.787,59	0	906.956,00	0	907.342,00
c2-AK-20-5-70-1000-1	86.314,83	1.268.063,83	31.997,10	1.229.861,10	0	1.195.200,00	0	1.322.825,00
c2-KA-20-5-150-1000-1	220.497,79	1.664.180,79	135.695,25	1.602.506,25	0	1.317.410,00	0	1.514.319,00
c2-KA-20-5-70-1000-1	173.340,04	1.997.203,04	105.896,01	1.907.041,01	0	1.642.915,00	0	1.604.708,00
c2-KK-20-5-150-1000-1	57.015,07	1.118.221,07	23.772,42	1.091.554,42	0	1.072.362,00	0	1.195.548,00
c2-KK-20-5-70-1000-1	60.383,72	1.354.219,72	28.595,64	1.326.657,64	0	1.283.110,00	0	1.388.283,00
c3-AK-20-5-150-1000-0	65.119,87	935.052,87	9.459,01	888.749,01	0	876.949,00	0	922.968,00
c3-AK-20-5-70-1000-0	100.796,20	1.140.826,20	78.207,42	1.122.641,42	0	1.047.966,00	0	1.081.128,00
c3-KA-20-5-150-1000-0	132.989,78	1.148.659,78	65.664,10	1.083.980,10	0	923.203,00	0	1.097.264,00
c3-KA-20-5-70-1000-0	200.811,51	2.349.000,51	119.889,93	2.287.338,93	0	1.751.097,00	0	2.089.867,00
c3-KK-20-5-150-1000-0	155.951,31	1.554.497,31	51.095,30	1.470.594,30	0	1.416.693,00	0	1.519.781,00
c3-KK-20-5-70-1000-0	102.053,58	2.047.459,58	35.922,90	2.058.821,90	0	1.841.647,00	0	2.040.403,00
Total 20		27.318.792,51		26.523.771,39		24.080.224,00		25.834.588,00
Vergleich 3vs...		-12%		-9%				-7%
50								
c0-AK-50-5-150-1000-2	256.979,41	1.849.601,41	80.542,78	1.676.796,78	0	1.554.159,00	0	1.560.259,00
c0-AK-50-5-70-1000-2	479.335,93	3.005.556,93	217.505,53	2.740.315,53	0	2.543.661,00	0	2.561.002,00
c0-KA-50-5-150-1000-2	413.923,32	2.828.332,32	317.775,93	2.589.878,93	0	2.187.519,00	0	2.865.222,00
c0-KA-50-5-70-1000-2	685.367,60	5.868.695,60	650.185,03	5.819.159,03	0	4.355.075,00	0	4.566.140,00
c0-KK-50-5-150-1000-2	258.305,26	2.790.463,26	69.420,41	2.571.079,41	0	2.540.218,00	0	3.019.600,00
c0-KK-50-5-70-1000-2	329.698,58	5.246.297,58	145.708,75	5.191.300,75	0	3.952.007,00	0	4.267.342,00
c2-AK-50-5-150-1000-1	290.195,24	1.842.167,24	128.656,25	1.688.491,25	0	1.577.796,00	0	1.680.808,00
c2-AK-50-5-70-1000-1	273.718,52	2.276.511,52	167.462,67	2.150.214,67	0	1.959.839,00	0	1.950.199,00
c2-KA-50-5-150-1000-1	283.418,97	1.914.310,97	157.181,69	1.756.717,69	0	1.605.476,00	0	1.725.171,00
c2-KA-50-5-70-1000-1	468.761,88	4.573.452,88	364.204,90	4.338.828,90	0	2.977.431,00	0	3.688.107,00
c2-KK-50-5-150-1000-1	332.856,88	2.397.183,88	72.263,04	2.088.430,04	0	2.027.063,00	0	1.953.241,00
c2-KK-50-5-70-1000-1	530.763,10	7.785.957,10	193.512,13	7.641.081,13	0	6.436.788,00	0	6.421.124,00
c3-AK-50-5-150-1000-0	303.644,97	1.605.537,97	97.595,95	1.417.080,95	0	1.278.230,00	0	1.399.075,00
c3-AK-50-5-70-1000-0	321.082,75	2.581.246,75	235.137,67	2.539.728,67	0	2.351.845,00	0	2.413.005,00
c3-KA-50-5-150-1000-0	310.905,30	2.346.600,30	234.668,96	2.212.946,96	0	1.732.240,00	0	2.379.159,00
c3-KA-50-5-70-1000-0	534.704,71	4.993.617,71	355.923,09	4.753.772,09	0	3.249.202,00	0	3.863.339,00
c3-KK-50-5-150-1000-0	302.035,72	2.420.646,72	80.300,23	2.219.754,23	0	2.120.241,00	0	2.150.240,00
c3-KK-50-5-70-1000-0	277.165,87	4.625.957,87	110.649,33	4.575.222,32	0	3.619.601,00	0	3.975.288,00
Total 50		60.952.138,01		57.970.799,33		48.068.391,00		52.438.321,00
Vergleich 3vs...		-21%		-17%				-8%
100								
c0-AK-100-10-150-1000-2	563.656,72	3.270.327,72	243.095,89	2.984.415,89	0	2.746.631,00	0	3.557.852,00
c0-AK-100-10-70-1000-2	812.681,80	5.009.637,80	486.972,70	4.690.774,70	0	4.216.527,00	0	5.655.781,00
c0-AK-100-5-150-1000-2	667.173,87	3.132.309,87	324.207,22	2.828.365,22	0	2.547.703,00	0	2.509.209,00
c0-AK-100-5-70-1000-2	807.934,72	5.127.222,72	528.765,98	4.798.293,98	0	3.970.567,00	0	3.968.822,00
c0-KA-100-10-150-1000-2	922.365,27	5.511.389,27	578.562,14	5.216.577,14	0	4.305.798,00	0	5.827.055,00
c0-KA-100-10-70-1000-2	1.318.145,04	11.066.113,00	985.507,01	10.339.814,00	0	8.580.725,00	0	8.348.710,00
c0-KA-100-5-150-1000-2	1.197.162,52	6.201.123,52	808.468,10	5.954.806,10	0	4.090.465,00	0	5.036.001,00
c0-KA-100-5-70-1000-2	1.115.229,16	11.185.394,20	819.766,71	10.921.804,70	0	7.841.491,00	0	7.515.344,00
c0-KK-100-10-150-1000-2	512.077,52	4.736.804,52	139.821,11	4.389.597,11	0	4.222.375,00	0	5.924.754,00
c0-KK-100-10-70-1000-2	785.957,53	9.122.943,53	312.623,97	8.851.237,97	0	7.032.610,00	0	8.332.403,00

Anhang

Problem Instance	Fall 1		Fall 2		Fall 3		Fall 4	
	St	GK	St	GK	St	GK	St	GK
c0-KK-100-5-150-1000-2	781.388,44	5.547.283,44	199.600,67	5.033.237,66	0	4.488.135,00	0	5.022.448,00
c0-KK-100-5-70-1000-2	592.635,36	10.921.222,40	197.296,87	10.589.885,90	0	7.559.121,00	0	8.902.185,00
c2-AK-100-10-150-1000-1	367.103,67	2.593.953,67	204.693,74	2.434.571,74	0	2.265.990,00	0	3.066.846,00
c2-AK-100-10-70-1000-1	609.245,57	4.004.454,57	304.560,14	3.768.639,14	0	3.484.756,00	0	4.496.483,00
c2-AK-100-5-150-1000-1	767.427,99	3.217.320,99	378.434,23	2.842.817,23	0	2.506.378,00	0	2.702.248,00
c2-AK-100-5-70-1000-1	850.722,47	4.779.579,47	396.136,18	4.554.145,18	0	3.454.322,00	0	3.416.169,00
c2-KA-100-10-150-1000-1	617.152,02	4.200.321,02	429.997,50	3.950.157,50	0	3.583.928,00	0	4.565.171,00
c2-KA-100-10-70-1000-1	1.314.298,36	11.635.197,40	991.624,01	11.309.841,00	0	8.678.473,00	0	9.519.386,00
c2-KA-100-5-150-1000-1	856.556,93	4.686.250,93	550.240,87	4.187.971,87	0	3.005.380,00	0	3.703.544,00
c2-KA-100-5-70-1000-1	840.962,84	8.470.932,84	647.231,15	8.360.659,15	0	6.930.970,00	0	6.071.280,00
c2-KK-100-10-150-1000-1	632.109,25	4.856.301,25	249.725,90	4.554.737,90	0	4.366.650,00	0	5.936.167,00
c2-KK-100-10-70-1000-1	5.466.324,93	7.628.277,93	220.057,31	7.420.334,31	0	5.973.842,00	0	6.897.594,00
c2-KK-100-5-150-1000-1	525.142,97	4.402.324,97	121.937,62	3.933.187,62	0	3.780.564,00	0	3.766.420,00
c2-KK-100-5-70-1000-1	445.674,78	9.189.284,77	223.241,42	9.081.505,42	0	6.582.798,00	0	6.970.564,00
c3-AK-100-10-150-1000-0	582.216,03	3.214.055,03	211.444,47	2.838.083,47	0	2.667.703,00	0	3.863.225,00
c3-AK-100-10-70-1000-0	875.588,83	4.708.070,83	414.379,66	4.310.905,66	0	3.935.892,00	0	5.564.645,00
c3-AK-100-5-150-1000-0	535.568,87	2.824.607,87	259.895,10	2.582.304,10	0	2.355.227,00	0	2.434.481,00
c3-AK-100-5-70-1000-0	782.782,02	4.955.636,02	395.959,11	4.641.638,11	0	3.909.868,00	0	3.943.522,00
c3-KA-100-10-150-1000-0	880.195,94	5.084.602,94	553.733,78	4.659.772,78	0	4.144.841,00	0	5.479.613,00
c3-KA-100-10-70-1000-0	1.000.013,69	9.717.206,69	771.564,73	9.530.188,73	0	6.219.418,00	0	7.519.289,00
c3-KA-100-5-150-1000-0	896.417,96	5.680.521,96	779.848,57	5.583.504,57	0	4.092.972,00	0	4.925.829,00
c3-KA-100-5-70-1000-0	1.187.895,96	10.780.109,00	867.248,37	10.454.953,40	0	7.738.712,00	0	7.333.115,00
c3-KK-100-10-150-1000-0	552.998,71	4.452.870,71	153.114,56	4.240.564,56	0	4.057.066,00	0	4.138.695,00
c3-KK-100-10-70-1000-0	719.868,28	9.570.587,28	201.627,11	9.540.786,11	0	6.545.907,00	0	8.298.810,00
c3-KK-100-5-150-1000-0	646.802,89	4.904.177,89	261.455,69	4.597.643,69	0	3.949.372,00	0	3.766.825,00
c3-KK-100-5-70-1000-0	519.171,96	10.076.851,00	167.499,73	9.749.841,72	0	7.043.495,00	0	8.381.678,00
Total 100		226.465.269,02		215.727.565,33		172.876.672,00		197.362.163,00
Vergleich 3vs...		-24%		-20%				-12%
200								
c0-AK-200-10-150-1000-2	1.360.186,52	6.246.253,52	610.618,61	5.516.135,61	0	5.195.265,00	0	6.661.165,00
c0-AK-200-10-70-1000-2	1.863.750,27	10.065.040,30	1.088.643,23	9.388.790,23	0	8.463.666,00	0	10.043.077,00
c0-KA-200-10-150-1000-2	1.952.075,98	10.904.913,00	1.213.624,20	9.823.870,20	0	9.081.027,00	0	10.288.075,00
c0-KA-200-10-70-1000-2	2.871.205,42	23.075.523,40	1.870.767,40	22.101.360,40	0	13.948.307,00	0	16.294.819,00
c0-KK-200-10-150-1000-2	1.368.459,35	9.676.840,35	386.256,37	8.771.678,37	0	8.677.922,00	0	12.045.418,00
c0-KK-200-10-70-1000-2	1.334.824,83	21.227.528,80	354.849,49	21.156.881,50	0	13.856.896,00	0	16.329.852,00
c2-AK-200-10-150-1000-1	848.510,98	4.707.221,88	469.484,32	4.547.256,32	0	4.231.102,00	0	5.278.791,00
c2-AK-200-10-70-1000-1	1.628.531,35	8.680.297,35	820.146,36	8.264.556,36	0	7.654.208,00	0	9.116.076,00
c2-KA-200-10-150-1000-1	1.659.339,42	8.946.181,42	993.238,99	8.140.933,99	0	7.281.260,00	0	9.566.833,00
c2-KA-200-10-70-1000-1	1.782.567,51	17.529.284,50	1.248.682,83	16.922.783,80	0	11.091.508,00	0	11.990.069,00
c2-KK-200-10-150-1000-1	1.287.463,26	9.094.158,26	402.488,83	8.459.517,83	0	8.154.501,00	0	10.372.967,00
c2-KK-200-10-70-1000-1	1.508.092,98	19.356.322,00	411.852,52	18.842.447,50	0	13.091.703,00	0	15.032.804,00
c3-AK-200-10-150-1000-0	1.112.755,83	5.357.719,83	476.521,32	4.764.281,32	0	4.532.985,00	0	5.194.071,00
c3-AK-200-10-70-1000-0	1.675.850,13	9.365.032,13	935.969,90	9.230.406,90	0	7.706.325,00	0	10.140.517,00
c3-KA-200-10-150-1000-0	1.724.214,24	9.943.025,24	1.252.249,36	9.744.417,36	0	8.778.589,00	0	10.148.886,00
c3-KA-200-10-70-1000-0	2.497.803,97	22.129.785,00	1.595.373,74	20.420.362,70	0	13.760.287,00	0	14.568.965,00
c3-KK-200-10-150-1000-0	1.171.764,53	8.894.413,53	354.217,83	8.058.352,83	0	8.068.244,00	0	8.973.731,00
c3-KK-200-10-70-1000-0	2.008.954,24	23.627.025,20	575.732,23	22.721.081,20	0	15.156.342,00	0	18.064.519,00
Total 200		228.826.565,71		216.875.114,42		168.730.137,00		200.110.635,00
Vergleich 3vs...		-26%		-22%				-16%
Total		543.562.765,25		517.097.250,47		413.755.424,00		475.745.707,00

A.5.5 Nach Fahrzeugkapazität

Problem Instance	Fall 1		Fall 2		Fall 3		Fall 4	
	St	GK	St	GK	St	GK	St	GK
70								
c0-AK-100-10-70-1000-2	812.681,80	5.009.637,80	486.972,70	4.690.774,70	0	4.216.527,00	0	5.655.781,00
c0-AK-100-5-70-1000-2	807.934,72	5.127.222,72	528.765,98	4.798.293,98	0	3.970.567,00	0	3.968.822,00
c0-AK-20-5-70-1000-2	128.459,72	1.451.613,72	51.403,98	1.382.046,98	0	1.331.385,00	0	1.447.723,00
c0-AK-200-10-70-1000-2	1.863.750,27	10.065.040,30	1.088.643,23	9.388.790,23	0	8.463.666,00	0	10.043.077,00
c0-AK-50-5-70-1000-2	479.335,93	3.005.556,93	217.505,53	2.740.315,53	0	2.543.661,00	0	2.561.002,00
c0-KA-100-10-70-1000-2	1.318.145,04	11.066.113,00	985.507,01	10.339.814,00	0	8.580.725,00	0	8.348.710,00
c0-KA-100-5-70-1000-2	1.115.229,16	11.185.394,20	819.766,71	10.921.804,70	0	7.841.491,00	0	7.515.344,00
c0-KA-20-5-70-1000-2	280.225,37	2.296.120,37	148.625,73	2.165.155,72	0	1.786.135,00	0	1.935.829,00
c0-KA-200-10-70-1000-2	2.871.205,42	23.075.523,40	1.870.767,40	22.101.360,40	0	13.948.307,00	0	16.294.819,00
c0-KA-50-5-70-1000-2	685.367,60	5.868.695,60	650.185,03	5.819.159,03	0	4.355.075,00	0	4.566.140,00
c0-KK-100-10-70-1000-2	785.957,53	9.122.943,53	312.623,97	8.851.237,97	0	7.032.610,00	0	8.332.403,00
c0-KK-100-5-70-1000-2	592.635,36	10.921.222,40	197.296,87	10.589.885,90	0	7.559.121,00	0	8.902.185,00
c0-KK-20-5-70-1000-2	70.992,84	2.219.363,84	41.719,98	2.255.286,98	0	2.155.698,00	0	2.033.973,00
c0-KK-200-10-70-1000-2	1.334.824,83	21.227.528,80	354.849,49	21.156.881,50	0	13.856.896,00	0	16.329.852,00
c0-KK-50-5-70-1000-2	329.698,58	5.246.297,58	145.708,75	5.191.300,75	0	3.952.007,00	0	4.267.342,00
c2-AK-100-10-70-1000-1	609.245,57	4.004.454,57	304.560,14	3.768.639,14	0	3.484.756,00	0	4.496.483,00
c2-AK-100-5-70-1000-1	850.722,47	4.779.579,47	396.136,18	4.554.145,18	0	3.454.322,00	0	3.416.169,00
c2-AK-20-5-70-1000-1	86.314,83	1.268.063,83	31.997,10	1.229.861,10	0	1.195.200,00	0	1.322.825,00
c2-AK-200-10-70-1000-1	1.628.531,35	8.680.297,35	820.146,36	8.264.556,36	0	7.654.208,00	0	9.116.076,00
c2-AK-50-5-70-1000-1	273.718,52	2.276.511,52	167.462,67	2.150.214,67	0	1.959.839,00	0	1.950.199,00
c2-KA-100-10-70-1000-1	1.314.298,36	11.635.197,40	991.624,01	11.309.841,00	0	8.678.473,00	0	9.519.386,00
c2-KA-100-5-70-1000-1	840.962,84	8.470.932,84	647.231,15	8.360.659,15	0	6.930.970,00	0	6.071.280,00
c2-KA-20-5-70-1000-1	173.340,04	1.997.203,04	105.896,01	1.907.041,01	0	1.642.915,00	0	1.604.708,00
c2-KA-200-10-70-1000-1	1.782.567,51	17.529.284,50	1.248.682,83	16.922.783,80	0	11.091.508,00	0	11.990.069,00
c2-KA-50-5-70-1000-1	468.761,88	4.573.452,88	364.204,90	4.338.828,90	0	2.977.431,00	0	3.688.107,00
c2-KK-100-10-70-1000-1	5.466.324,93	7.628.277,93	220.057,31	7.420.334,31	0	5.973.842,00	0	6.897.594,00
c2-KK-100-5-70-1000-1	445.674,78	9.189.284,77	223.241,42	9.081.505,42	0	6.582.798,00	0	6.970.564,00
c2-KK-20-5-70-1000-1	60.383,72	1.354.219,72	28.595,64	1.326.657,64	0	1.283.110,00	0	1.388.283,00
c2-KK-200-10-70-1000-1	1.508.092,98	19.356.322,00	411.852,52	18.842.447,50	0	13.091.703,00	0	15.032.804,00
c2-KK-50-5-70-1000-1	530.763,10	7.785.957,10	193.512,13	7.641.081,13	0	6.436.788,00	0	6.421.124,00
c3-AK-100-10-70-1000-0	875.588,83	4.708.070,83	414.379,66	4.310.905,66	0	3.935.892,00	0	5.564.645,00
c3-AK-100-5-70-1000-0	782.782,02	4.955.636,02	395.959,11	4.641.638,11	0	3.909.868,00	0	3.943.522,00
c3-AK-20-5-70-1000-0	100.796,20	1.140.826,20	78.207,42	1.122.641,42	0	1.047.966,00	0	1.081.128,00
c3-AK-200-10-70-1000-0	1.675.850,13	9.365.032,13	935.969,90	9.230.406,90	0	7.706.325,00	0	10.140.517,00
c3-AK-50-5-70-1000-0	321.082,75	2.581.246,75	235.137,67	2.539.728,67	0	2.351.845,00	0	2.413.005,00
c3-KA-100-10-70-1000-0	1.000.013,69	9.717.206,69	771.564,73	9.530.188,73	0	6.219.418,00	0	7.519.289,00
c3-KA-100-5-70-1000-0	1.187.895,96	10.780.109,00	867.248,37	10.454.953,40	0	7.738.712,00	0	7.333.115,00
c3-KA-20-5-70-1000-0	200.811,51	2.349.000,51	119.889,93	2.287.338,93	0	1.751.097,00	0	2.089.867,00
c3-KA-200-10-70-1000-0	2.497.803,97	22.129.785,00	1.595.373,74	20.420.362,70	0	13.760.287,00	0	14.568.965,00
c3-KA-50-5-70-1000-0	534.704,71	4.993.617,71	355.923,09	4.753.772,09	0	3.249.202,00	0	3.863.339,00
c3-KK-100-10-70-1000-0	719.868,28	9.570.587,28	201.627,11	9.540.786,11	0	6.545.907,00	0	8.298.810,00
c3-KK-100-5-70-1000-0	519.171,96	10.076.851,00	167.499,73	9.749.841,72	0	7.043.495,00	0	8.381.678,00
c3-KK-20-5-70-1000-0	102.053,58	2.047.459,58	35.922,90	2.058.821,90	0	1.841.647,00	0	2.040.403,00
c3-KK-200-10-70-1000-0	2.008.954,24	23.627.025,20	575.732,23	22.721.081,20	0	15.156.342,00	0	18.064.519,00
c3-KK-50-5-70-1000-0	277.165,87	4.625.957,87	110.649,33	4.575.222,32	0	3.619.601,00	0	3.975.288,00
Total 70		360.085.724,88		347.448.394,54	0	259.909.338,00	0	291.366.763,00
Vergleich 3vs...		-28%		-25%				-11%
150								
c0-AK-100-10-150-1000-2	563.656,72	3.270.327,72	243.095,89	2.984.415,89	0	2.746.631,00	0	3.557.852,00
c0-AK-100-5-150-1000-2	667.173,87	3.132.309,87	324.207,22	2.828.365,22	0	2.547.703,00	0	2.509.209,00
c0-AK-20-5-150-1000-2	108.164,02	1.234.977,02	63.118,90	1.192.119,90	0	1.132.244,00	0	1.124.964,00
c0-AK-200-10-150-1000-2	1.360.186,52	6.246.253,52	610.618,61	5.516.135,61	0	5.195.265,00	0	6.661.165,00

Anhang

Problem Instance	Fall 1		Fall 2		Fall 3		Fall 4	
	St	GK	St	GK	St	GK	St	GK
c0-AK-50-5-150-1000-2	256.979,41	1.849.601,41	80.542,78	1.676.796,78	0	1.554.159,00	0	1.560.259,00
c0-KA-100-10-150-1000-2	922.365,27	5.511.389,27	578.562,14	5.216.577,14	0	4.305.798,00	0	5.827.055,00
c0-KA-100-5-150-1000-2	1.197.162,52	6.201.123,52	808.468,10	5.954.806,10	0	4.090.465,00	0	5.036.001,00
c0-KA-20-5-150-1000-2	165.094,48	1.467.129,48	117.667,39	1.428.995,39	0	1.317.583,00	0	1.398.599,00
c0-KA-200-10-150-1000-2	1.952.075,98	10.904.913,00	1.213.624,20	9.823.870,20	0	9.081.027,00	0	10.288.075,00
c0-KA-50-5-150-1000-2	413.923,32	2.828.332,32	317.775,93	2.589.878,93	0	2.187.519,00	0	2.865.222,00
c0-KK-100-10-150-1000-2	512.077,52	4.736.804,52	139.821,11	4.389.597,11	0	4.222.375,00	0	5.924.754,00
c0-KK-100-5-150-1000-2	781.388,44	5.547.283,44	199.600,67	5.033.237,66	0	4.488.135,00	0	5.022.448,00
c0-KK-20-5-150-1000-2	36.874,64	1.109.892,64	4.211,74	1.090.632,74	0	1.081.671,00	0	1.209.064,00
c0-KK-200-10-150-1000-2	1.368.459,35	9.676.840,35	386.256,37	8.771.678,37	0	8.677.922,00	0	12.045.418,00
c0-KK-50-5-150-1000-2	258.305,26	2.790.463,26	69.420,41	2.571.079,41	0	2.540.218,00	0	3.019.600,00
c2-AK-100-10-150-1000-1	367.103,67	2.593.953,67	204.693,74	2.434.571,74	0	2.265.990,00	0	3.066.846,00
c2-AK-100-5-150-1000-1	767.427,99	3.217.320,99	378.434,23	2.842.817,23	0	2.506.378,00	0	2.702.248,00
c2-AK-20-5-150-1000-1	61.198,74	962.310,74	32.242,59	939.787,59	0	906.956,00	0	907.342,00
c2-AK-200-10-150-1000-1	848.510,88	4.707.221,88	469.484,32	4.547.256,32	0	4.231.102,00	0	5.278.791,00
c2-AK-50-5-150-1000-1	290.195,24	1.842.167,24	128.656,25	1.688.491,25	0	1.577.796,00	0	1.680.808,00
c2-KA-100-10-150-1000-1	617.152,02	4.200.321,02	429.997,50	3.950.157,50	0	3.583.928,00	0	4.565.171,00
c2-KA-100-5-150-1000-1	856.556,93	4.686.250,93	550.240,87	4.187.971,87	0	3.005.380,00	0	3.703.544,00
c2-KA-20-5-150-1000-1	220.497,79	1.664.180,79	135.685,25	1.602.506,25	0	1.317.410,00	0	1.514.319,00
c2-KA-200-10-150-1000-1	1.659.339,42	8.946.181,42	993.238,99	8.140.933,99	0	7.281.260,00	0	9.566.833,00
c2-KA-50-5-150-1000-1	283.418,97	1.914.310,97	157.181,69	1.756.717,69	0	1.605.476,00	0	1.725.171,00
c2-KK-100-10-150-1000-1	632.109,25	4.856.301,25	249.725,90	4.554.737,90	0	4.366.650,00	0	5.936.167,00
c2-KK-100-5-150-1000-1	525.142,97	4.402.324,97	121.937,62	3.933.187,62	0	3.780.564,00	0	3.766.420,00
c2-KK-20-5-150-1000-1	57.015,07	1.118.221,07	23.772,42	1.091.554,42	0	1.072.362,00	0	1.195.548,00
c2-KK-200-10-150-1000-1	1.287.463,26	9.094.158,26	402.488,83	8.459.517,83	0	8.154.501,00	0	10.372.967,00
c2-KK-50-5-150-1000-1	332.856,98	2.397.183,88	72.263,04	2.088.430,04	0	2.027.063,00	0	1.953.241,00
c3-AK-100-10-150-1000-0	582.216,03	3.214.055,03	211.444,47	2.838.083,47	0	2.667.703,00	0	3.863.225,00
c3-AK-100-5-150-1000-0	535.568,87	2.824.607,87	259.895,10	2.582.304,10	0	2.355.227,00	0	2.434.481,00
c3-AK-20-5-150-1000-0	65.119,87	935.052,87	9.459,01	888.749,01	0	876.949,00	0	922.968,00
c3-AK-200-10-150-1000-0	1.112.755,83	5.357.719,83	476.521,32	4.764.281,32	0	4.532.985,00	0	5.194.071,00
c3-AK-50-5-150-1000-0	303.644,97	1.605.537,97	97.595,95	1.417.080,95	0	1.278.230,00	0	1.399.075,00
c3-KA-100-10-150-1000-0	880.195,94	5.084.602,94	553.733,78	4.659.772,78	0	4.144.841,00	0	5.479.613,00
c3-KA-100-5-150-1000-0	896.417,96	5.680.521,96	779.848,57	5.583.504,57	0	4.092.972,00	0	4.925.829,00
c3-KA-20-5-150-1000-0	132.989,78	1.148.659,78	65.664,10	1.083.980,10	0	923.203,00	0	1.097.264,00
c3-KA-200-10-150-1000-0	1.724.214,24	9.943.025,24	1.252.249,36	9.744.417,36	0	8.778.589,00	0	10.148.886,00
c3-KA-50-5-150-1000-0	310.905,30	2.346.600,30	234.668,96	2.212.946,96	0	1.732.240,00	0	2.379.159,00
c3-KK-100-10-150-1000-0	552.998,71	4.452.870,71	153.114,56	4.240.564,56	0	4.057.066,00	0	4.138.695,00
c3-KK-100-5-150-1000-0	646.802,89	4.904.177,89	261.455,69	4.597.643,69	0	3.949.372,00	0	3.766.825,00
c3-KK-20-5-150-1000-0	155.951,31	1.554.497,31	51.095,30	1.470.594,30	0	1.416.693,00	0	1.519.781,00
c3-KK-200-10-150-1000-0	1.171.764,53	8.894.413,53	354.217,83	8.058.352,83	0	8.068.244,00	0	8.973.731,00
c3-KK-50-5-150-1000-0	302.035,72	2.420.646,72	80.300,23	2.219.754,23	0	2.120.241,00	0	2.150.240,00
Total 150		183.477.040,37		169.648.855,93	0	153.846.086,00	0	184.378.944,00
Vergleich 3vs...		-16%		-9%				-17%
Total		543.562.765,25		517.097.250,47		413.755.424,00		475.745.707,00

A.5.6 Nach Zeitreihen

Problem Instance	Fall 1		Fall 2		Fall 3		Fall 4	
	St	GK	St	GK	St	GK	St	GK
AK								
c0-AK-100-10-150-1000-2	563.656,72	3.270.327,72	243.095,89	2.984.415,89	0	2.746.631,00	0	3.557.852,00
c0-AK-100-10-70-1000-2	812.681,80	5.009.637,80	486.972,70	4.690.774,70	0	4.216.527,00	0	5.655.781,00
c0-AK-100-5-150-1000-2	667.173,87	3.132.309,87	324.207,22	2.828.365,22	0	2.547.703,00	0	2.509.209,00
c0-AK-100-5-70-1000-2	807.934,72	5.127.222,72	528.765,98	4.798.293,98	0	3.970.567,00	0	3.968.822,00
c0-AK-20-5-150-1000-2	108.164,02	1.234.977,02	63.118,90	1.192.119,90	0	1.132.244,00	0	1.124.964,00
c0-AK-20-5-70-1000-2	128.459,72	1.451.613,72	51.403,98	1.382.046,98	0	1.331.385,00	0	1.447.723,00
c0-AK-200-10-150-1000-2	1.360.186,52	6.246.253,52	610.618,61	5.516.135,61	0	5.195.265,00	0	6.661.165,00
c0-AK-200-10-70-1000-2	1.963.750,27	10.065.040,30	1.088.643,23	9.388.790,23	0	8.463.666,00	0	10.043.077,00
c0-AK-50-5-150-1000-2	256.979,41	1.849.601,41	80.542,78	1.676.796,78	0	1.554.159,00	0	1.560.259,00
c0-AK-50-5-70-1000-2	479.335,93	3.005.556,93	217.505,53	2.740.315,53	0	2.543.661,00	0	2.561.002,00
c2-AK-100-10-150-1000-1	367.103,67	2.593.953,67	204.693,74	2.434.571,74	0	2.265.990,00	0	3.066.846,00
c2-AK-100-10-70-1000-1	609.245,57	4.004.454,57	304.560,14	3.768.639,14	0	3.484.756,00	0	4.496.483,00
c2-AK-100-5-150-1000-1	767.427,99	3.217.320,99	378.434,23	2.842.817,23	0	2.506.378,00	0	2.702.248,00
c2-AK-100-5-70-1000-1	850.722,47	4.779.579,47	396.136,18	4.554.145,18	0	3.454.322,00	0	3.416.169,00
c2-AK-20-5-150-1000-1	61.198,74	962.310,74	32.242,59	939.787,59	0	906.956,00	0	907.342,00
c2-AK-20-5-70-1000-1	86.314,83	1.268.063,83	31.997,10	1.229.861,10	0	1.195.200,00	0	1.322.825,00
c2-AK-200-10-150-1000-1	848.510,88	4.707.221,88	469.484,32	4.547.256,32	0	4.231.102,00	0	5.278.791,00
c2-AK-200-10-70-1000-1	1.629.531,35	8.680.297,35	820.146,36	8.264.556,36	0	7.654.208,00	0	9.116.076,00
c2-AK-50-5-150-1000-1	290.195,24	1.842.167,24	128.656,25	1.688.491,25	0	1.577.796,00	0	1.680.808,00
c2-AK-50-5-70-1000-1	273.718,52	2.276.511,52	167.462,67	2.150.214,67	0	1.959.839,00	0	1.950.199,00
c3-AK-100-10-150-1000-0	582.216,03	3.214.055,03	211.444,47	2.838.083,47	0	2.667.703,00	0	3.863.225,00
c3-AK-100-10-70-1000-0	875.588,83	4.708.070,83	414.379,66	4.310.905,66	0	3.935.892,00	0	5.564.645,00
c3-AK-100-5-150-1000-0	535.568,87	2.824.607,87	259.895,10	2.582.304,10	0	2.355.227,00	0	2.434.481,00
c3-AK-100-5-70-1000-0	782.782,02	4.955.636,02	395.959,11	4.641.638,11	0	3.909.868,00	0	3.943.522,00
c3-AK-20-5-150-1000-0	65.119,87	935.052,87	9.459,01	888.749,01	0	876.949,00	0	922.968,00
c3-AK-20-5-70-1000-0	100.796,20	1.140.826,20	78.207,42	1.122.641,42	0	1.047.966,00	0	1.081.128,00
c3-AK-200-10-150-1000-0	1.112.755,83	5.357.719,83	476.521,32	4.764.281,32	0	4.532.985,00	0	5.194.071,00
c3-AK-200-10-70-1000-0	1.675.850,13	9.365.032,13	935.969,90	9.230.406,90	0	7.706.325,00	0	10.140.517,00
c3-AK-50-5-150-1000-0	303.644,97	1.605.537,97	97.595,95	1.417.080,95	0	1.278.230,00	0	1.399.075,00
c3-AK-50-5-70-1000-0	321.082,75	2.581.246,75	235.137,67	2.539.728,67	0	2.351.845,00	0	2.413.005,00
Total AK		111.412.207,77		103.954.215,02		93.601.345,00		109.984.278,00
Vergleich 3vs...		-16%		-10%				-15%
KA								
c0-KA-100-10-150-1000-2	922.365,27	5.511.389,27	578.562,14	5.216.577,14	0	4.305.798,00	0	5.827.055,00
c0-KA-100-10-70-1000-2	1.318.145,04	11.066.113,00	985.507,01	10.339.814,00	0	8.580.725,00	0	8.348.710,00
c0-KA-100-5-150-1000-2	1.197.162,52	6.201.123,52	808.468,10	5.954.806,10	0	4.090.465,00	0	5.036.001,00
c0-KA-100-5-70-1000-2	1.115.229,16	11.185.394,20	819.766,71	10.921.804,70	0	7.841.491,00	0	7.515.344,00
c0-KA-20-5-150-1000-2	165.094,48	1.467.129,48	117.667,39	1.428.995,39	0	1.317.583,00	0	1.398.599,00
c0-KA-20-5-70-1000-2	280.225,37	2.296.120,37	148.625,73	2.165.155,72	0	1.786.135,00	0	1.935.829,00
c0-KA-200-10-150-1000-2	1.952.075,98	10.904.913,00	1.213.624,20	9.823.870,20	0	9.081.027,00	0	10.288.075,00
c0-KA-200-10-70-1000-2	2.871.205,42	23.075.523,40	1.870.767,40	22.101.360,40	0	13.948.307,00	0	16.294.819,00
c0-KA-50-5-150-1000-2	413.923,32	2.828.332,32	317.775,93	2.589.878,93	0	2.187.519,00	0	2.865.222,00
c0-KA-50-5-70-1000-2	685.367,60	5.868.695,60	650.185,03	5.819.159,03	0	4.355.075,00	0	4.566.140,00
c2-KA-100-10-150-1000-1	617.152,02	4.200.321,02	429.997,50	3.950.157,50	0	3.583.928,00	0	4.565.171,00
c2-KA-100-10-70-1000-1	1.314.298,36	11.635.197,40	991.624,01	11.309.841,00	0	8.678.473,00	0	9.519.386,00
c2-KA-100-5-150-1000-1	856.556,93	4.686.250,93	550.240,87	4.187.971,87	0	3.005.380,00	0	3.703.544,00
c2-KA-100-5-70-1000-1	840.962,84	8.470.932,84	647.231,15	8.360.659,15	0	6.930.970,00	0	6.071.280,00
c2-KA-20-5-150-1000-1	220.497,79	1.664.180,79	135.685,25	1.602.506,25	0	1.317.410,00	0	1.514.319,00
c2-KA-20-5-70-1000-1	173.340,04	1.997.203,04	105.896,01	1.907.041,01	0	1.642.915,00	0	1.604.708,00
c2-KA-200-10-150-1000-1	1.659.339,42	8.946.181,42	993.238,99	8.140.933,99	0	7.281.260,00	0	9.566.833,00
c2-KA-200-10-70-1000-1	1.782.567,51	17.529.284,50	1.248.682,83	16.922.783,80	0	11.091.508,00	0	11.990.069,00
c2-KA-50-5-150-1000-1	283.418,97	1.914.310,97	157.181,69	1.756.717,69	0	1.605.476,00	0	1.725.171,00
c2-KA-50-5-70-1000-1	468.761,88	4.573.452,88	364.204,90	4.338.828,90	0	2.977.431,00	0	3.688.107,00

Anhang

Problem Instance	Fall 1		Fall 2		Fall 3		Fall 4	
	St	GK	St	GK	St	GK	St	GK
c3-KA-100-10-150-1000-0	880.195,94	5.084.602,94	553.733,78	4.659.772,78	0	4.144.841,00	0	5.479.613,00
c3-KA-100-10-70-1000-0	1.000.013,69	9.717.206,69	771.564,73	9.530.188,73	0	6.219.418,00	0	7.519.289,00
c3-KA-100-5-150-1000-0	896.417,96	5.680.521,96	779.848,57	5.583.504,57	0	4.092.972,00	0	4.925.829,00
c3-KA-100-5-70-1000-0	1.187.895,96	10.780.109,00	867.248,37	10.454.953,40	0	7.738.712,00	0	7.333.115,00
c3-KA-20-5-150-1000-0	132.989,78	1.148.659,78	65.664,10	1.083.980,10	0	923.203,00	0	1.097.264,00
c3-KA-20-5-70-1000-0	200.811,51	2.349.000,51	119.889,93	2.287.338,93	0	1.751.097,00	0	2.089.867,00
c3-KA-200-10-150-1000-0	1.724.214,24	9.943.025,24	1.252.249,36	9.744.417,36	0	8.778.589,00	0	10.148.886,00
c3-KA-200-10-70-1000-0	2.497.803,97	22.129.785,00	1.595.373,74	20.420.362,70	0	13.760.287,00	0	14.568.965,00
c3-KA-50-5-150-1000-0	310.905,30	2.346.600,30	234.668,96	2.212.946,96	0	1.732.240,00	0	2.379.159,00
c3-KA-50-5-70-1000-0	534.704,71	4.993.617,71	355.923,09	4.753.772,09	0	3.249.202,00	0	3.863.339,00
Total KA		220.195.179,08		209.570.100,39		157.999.437,00		177.429.708,00
Vergleich 3vs...		-28%		-25%				-11%
KK								
c0-KK-100-10-150-1000-2	512.077,52	4.736.804,52	139.821,11	4.389.597,11	0	4.222.375,00	0	5.924.754,00
c0-KK-100-10-70-1000-2	785.957,53	9.122.943,53	312.623,97	8.851.237,97	0	7.032.610,00	0	8.332.403,00
c0-KK-100-5-150-1000-2	781.388,44	5.547.283,44	199.800,67	5.033.237,66	0	4.488.135,00	0	5.022.448,00
c0-KK-100-5-70-1000-2	592.635,36	10.921.222,40	197.296,87	10.589.885,90	0	7.559.121,00	0	8.902.185,00
c0-KK-20-5-150-1000-2	36.874,64	1.109.892,64	4.211,74	1.090.632,74	0	1.081.671,00	0	1.209.064,00
c0-KK-20-5-70-1000-2	70.992,84	2.219.363,84	41.719,98	2.255.286,98	0	2.155.698,00	0	2.033.973,00
c0-KK-200-10-150-1000-2	1.368.459,35	9.676.840,35	386.256,37	8.771.678,37	0	8.677.922,00	0	12.045.418,00
c0-KK-200-10-70-1000-2	1.334.824,83	21.227.528,80	354.849,49	21.156.881,50	0	13.856.896,00	0	16.329.852,00
c0-KK-50-5-150-1000-2	258.305,26	2.790.463,26	69.420,41	2.571.079,41	0	2.540.218,00	0	3.019.600,00
c0-KK-50-5-70-1000-2	329.698,58	5.246.297,58	145.708,75	5.191.300,75	0	3.952.007,00	0	4.267.342,00
c2-KK-100-10-150-1000-1	632.109,25	4.856.301,25	249.725,90	4.554.737,90	0	4.366.650,00	0	5.936.167,00
c2-KK-100-10-70-1000-1	5.466.324,93	7.628.277,93	220.057,31	7.420.334,31	0	5.973.842,00	0	6.897.594,00
c2-KK-100-5-150-1000-1	525.142,97	4.402.324,97	121.937,62	3.933.187,62	0	3.780.564,00	0	3.766.420,00
c2-KK-100-5-70-1000-1	445.674,78	9.189.284,77	223.241,42	9.081.505,42	0	6.582.798,00	0	6.970.564,00
c2-KK-20-5-150-1000-1	57.015,07	1.118.221,07	23.772,42	1.091.554,42	0	1.072.362,00	0	1.195.548,00
c2-KK-20-5-70-1000-1	60.383,72	1.354.219,72	28.595,64	1.326.657,64	0	1.283.110,00	0	1.388.283,00
c2-KK-200-10-150-1000-1	1.287.463,26	9.094.158,26	402.488,83	8.459.517,83	0	8.154.501,00	0	10.372.967,00
c2-KK-200-10-70-1000-1	1.508.092,98	19.356.322,00	411.852,52	18.842.447,50	0	13.091.703,00	0	15.032.804,00
c2-KK-50-5-150-1000-1	332.856,88	2.397.183,88	72.263,04	2.088.430,04	0	2.027.063,00	0	1.953.241,00
c2-KK-50-5-70-1000-1	530.763,10	7.785.957,10	193.512,13	7.641.081,13	0	6.436.788,00	0	6.421.124,00
c3-KK-100-10-150-1000-0	552.998,71	4.452.870,71	153.114,56	4.240.564,56	0	4.057.066,00	0	4.138.695,00
c3-KK-100-10-70-1000-0	719.868,28	9.570.587,28	201.627,11	9.540.786,11	0	6.545.907,00	0	8.298.810,00
c3-KK-100-5-150-1000-0	646.802,89	4.904.177,89	261.455,69	4.597.643,69	0	3.949.372,00	0	3.766.825,00
c3-KK-100-5-70-1000-0	519.171,96	10.076.851,00	167.499,73	9.749.841,72	0	7.043.495,00	0	8.381.678,00
c3-KK-20-5-150-1000-0	155.951,31	1.554.497,31	51.095,30	1.470.594,30	0	1.416.693,00	0	1.519.781,00
c3-KK-20-5-70-1000-0	102.053,58	2.047.459,58	35.922,90	2.058.821,90	0	1.841.647,00	0	2.040.403,00
c3-KK-200-10-150-1000-0	1.171.764,53	8.894.413,53	354.217,83	8.058.352,83	0	8.068.244,00	0	8.973.731,00
c3-KK-200-10-70-1000-0	2.008.954,24	23.627.025,20	575.732,23	22.721.081,20	0	15.156.342,00	0	18.064.519,00
c3-KK-50-5-150-1000-0	302.035,72	2.420.646,72	80.300,23	2.219.754,23	0	2.120.241,00	0	2.150.240,00
c3-KK-50-5-70-1000-0	277.165,87	4.625.957,87	110.649,33	4.575.222,32	0	3.619.601,00	0	3.975.288,00
Total KK		211.955.378,40		203.572.935,06		162.154.642,00		188.331.721,00
Vergleich 3vs...		-23%		-20%				-14%
Total		543.562.765,25		517.097.250,47		413.755.424,00		475.745.707,00

A.5.7 Vergleich nach Kunden, Depots und Fahrzeugkapazität

Problem Instance	Fall 1		Fall 2		Fall 3		Fall 4	
	St	GK	St	GK	St	GK	St	GK
Kunden 20								
Depot 5								
Fahr.kapaz. 70								
c0-AK-20-5-70-1000-2	128.459,72	1.451.613,72	51.403,98	1.382.046,98	0	1.331.385,00	0	1.447.723,00
c0-KA-20-5-70-1000-2	280.225,37	2.296.120,37	148.625,73	2.165.155,72	0	1.786.135,00	0	1.935.829,00
c0-KK-20-5-70-1000-2	70.992,84	2.219.363,84	41.719,98	2.255.286,98	0	2.155.698,00	0	2.033.973,00
c2-AK-20-5-70-1000-1	86.314,83	1.268.063,83	31.997,10	1.229.861,10	0	1.195.200,00	0	1.322.825,00
c2-KA-20-5-70-1000-1	173.340,04	1.997.203,04	105.896,01	1.907.041,01	0	1.642.915,00	0	1.604.708,00
c2-KK-20-5-70-1000-1	60.383,72	1.354.219,72	28.595,64	1.326.657,64	0	1.283.110,00	0	1.388.283,00
c3-AK-20-5-70-1000-0	100.796,20	1.140.826,20	78.207,42	1.122.641,42	0	1.047.966,00	0	1.081.128,00
c3-KA-20-5-70-1000-0	200.811,51	2.349.000,51	119.889,93	2.287.338,93	0	1.751.097,00	0	2.089.867,00
c3-KK-20-5-70-1000-0	102.053,58	2.047.459,58	35.922,90	2.058.821,90	0	1.841.647,00	0	2.040.403,00
Total 20-5-70	1.203.377,81	16.123.870,81	642.258,68	15.734.851,68	0	14.035.153,00	0	14.944.739,00
Vergleich 3vs...		-12,95%		-10,80%				-6,09%
Fahr.kapaz. 150								
c0-AK-20-5-150-1000-2	108.164,02	1.234.977,02	63.118,90	1.192.119,90	0	1.132.244,00	0	1.124.964,00
c0-KA-20-5-150-1000-2	165.094,48	1.467.129,48	117.667,39	1.428.995,39	0	1.317.583,00	0	1.398.599,00
c0-KK-20-5-150-1000-2	36.874,64	1.109.892,64	4.211,74	1.090.632,74	0	1.081.671,00	0	1.209.064,00
c2-AK-20-5-150-1000-1	61.198,74	962.310,74	32.242,59	939.787,59	0	906.956,00	0	907.342,00
c2-KA-20-5-150-1000-1	220.497,79	1.664.180,79	135.685,25	1.602.506,25	0	1.317.410,00	0	1.514.319,00
c2-KK-20-5-150-1000-1	57.015,07	1.118.221,07	23.772,42	1.091.554,42	0	1.072.362,00	0	1.195.548,00
c3-AK-20-5-150-1000-0	65.119,87	935.052,87	9.459,01	888.749,01	0	876.949,00	0	922.968,00
c3-KA-20-5-150-1000-0	132.989,78	1.148.659,78	65.664,10	1.083.980,10	0	923.203,00	0	1.097.264,00
c3-KK-20-5-150-1000-0	155.951,31	1.554.497,31	51.095,30	1.470.594,30	0	1.416.693,00	0	1.519.781,00
Total 20-5-150	1.002.905,69	11.194.921,70	502.916,71	10.788.919,71	0	10.045.071,00	0	10.889.849,00
Vergleich 3vs...		-10,27%		-6,89%				-7,76%
Total 20	2.206.283,51	27.318.792,51	1.145.175,38	26.523.771,39	0	24.080.224,00	0	25.834.588,00
Vergleich 3vs...		-11,85%		-9,21%				-6,79%

Kunden 50								
Depot 5								
Fahr.kapaz. 70								
c0-AK-50-5-70-1000-2	479.335,93	3.005.556,93	217.505,53	2.740.315,53	0	2.543.661,00	0	2.561.002,00
c0-KA-50-5-70-1000-2	685.367,60	5.868.695,60	650.185,03	5.819.159,03	0	4.355.075,00	0	4.566.140,00
c0-KK-50-5-70-1000-2	329.698,58	5.246.297,58	145.708,75	5.191.300,75	0	3.952.007,00	0	4.267.342,00
c2-AK-50-5-70-1000-1	273.718,52	2.276.511,52	167.462,67	2.150.214,67	0	1.959.839,00	0	1.950.199,00
c2-KA-50-5-70-1000-1	468.761,88	4.573.452,88	364.204,90	4.338.828,90	0	2.977.431,00	0	3.688.107,00
c2-KK-50-5-70-1000-1	530.763,10	7.785.957,10	193.512,13	7.641.081,13	0	6.436.788,00	0	6.421.124,00
c3-AK-50-5-70-1000-0	321.082,75	2.581.246,75	235.137,67	2.539.728,67	0	2.351.845,00	0	2.413.005,00
c3-KA-50-5-70-1000-0	534.704,71	4.993.617,71	355.923,09	4.753.772,09	0	3.249.202,00	0	3.863.339,00
c3-KK-50-5-70-1000-0	277.165,97	4.625.957,87	110.649,33	4.575.222,32	0	3.619.601,00	0	3.975.288,00
Total 50-5-70	3.900.598,93	40.957.293,94	2.440.289,11	39.749.623,09	0	31.445.449,00	0	33.705.546,00
Vergleich 3vs...		-23,22%		-20,89%				-6,71%
Fahr.kapaz. 150								
c0-AK-50-5-150-1000-2	256.979,41	1.849.601,41	80.542,78	1.676.796,78	0	1.554.159,00	0	1.560.259,00
c0-KA-50-5-150-1000-2	413.923,32	2.828.332,32	317.775,93	2.589.878,93	0	2.187.519,00	0	2.865.222,00
c0-KK-50-5-150-1000-2	258.305,26	2.790.463,26	69.420,41	2.571.079,41	0	2.540.218,00	0	3.019.600,00
c2-AK-50-5-150-1000-1	290.195,24	1.842.167,24	128.656,25	1.688.491,25	0	1.577.796,00	0	1.680.808,00
c2-KA-50-5-150-1000-1	283.418,97	1.914.310,97	157.181,69	1.756.717,69	0	1.605.476,00	0	1.725.171,00
c2-KK-50-5-150-1000-1	332.856,88	2.397.183,88	72.263,04	2.088.430,04	0	2.027.063,00	0	1.953.241,00
c3-AK-50-5-150-1000-0	303.644,97	1.605.537,97	97.595,95	1.417.080,95	0	1.278.230,00	0	1.399.075,00
c3-KA-50-5-150-1000-0	310.905,30	2.346.600,30	234.668,96	2.212.946,96	0	1.732.240,00	0	2.379.159,00
c3-KK-50-5-150-1000-0	302.035,72	2.420.646,72	80.300,23	2.219.754,23	0	2.120.241,00	0	2.150.240,00

Problem Instance	Fall 1		Fall 2		Fall 3		Fall 4	
	St	GK	St	GK	St	GK	St	GK
Total 50-5-150	2.752.265,07	19.994.844,07	1.238.405,24	18.221.176,24	0	16.622.942,00	0	18.732.775,00
Vergleich 3vs...		-16,86%		-8,77%				-11,26%
Total 50	6.652.864,00	60.952.138,01	3.678.694,35	57.970.799,33	0	48.068.391,00	0	52.438.321,00
Vergleich 3vs...		-21,14%		-17,08%				-8,33%

Kunden 100 Depot 5 Fahr.kapaz. 70								
c0-AK-100-5-70-1000-2	807.934,72	5.127.222,72	528.765,98	4.798.293,98	0	3.970.567,00	0	3.968.822,00
c0-KA-100-5-70-1000-2	1.115.229,16	11.185.394,20	819.766,71	10.921.804,70	0	7.841.491,00	0	7.515.344,00
c0-KK-100-5-70-1000-2	592.635,36	10.921.222,40	197.296,87	10.589.885,90	0	7.559.121,00	0	8.902.185,00
c2-AK-100-5-70-1000-1	850.722,47	4.779.579,47	396.136,18	4.554.145,18	0	3.454.322,00	0	3.416.169,00
c2-KA-100-5-70-1000-1	840.962,84	8.470.932,84	647.231,15	8.360.659,15	0	6.930.970,00	0	6.071.280,00
c2-KK-100-5-70-1000-1	445.674,78	9.189.284,77	223.241,42	9.081.505,42	0	6.582.798,00	0	6.970.564,00
c3-AK-100-5-70-1000-0	782.782,02	4.955.636,02	395.959,11	4.641.638,11	0	3.909.868,00	0	3.943.522,00
c3-KA-100-5-70-1000-0	1.187.895,96	10.780.109,00	867.248,37	10.454.953,40	0	7.738.712,00	0	7.333.115,00
c3-KK-100-5-70-1000-0	519.171,96	10.076.851,00	167.499,73	9.749.841,72	0	7.043.495,00	0	8.381.678,00
Total 100-5-70	7.143.009,27	75.486.232,42	4.243.145,50	73.152.727,56	0	55.031.344,00	0	56.502.679,00
Vergleich 3vs...		-27,10%		-24,77%				-2,60%

Fahr.kapaz. 150								
c0-AK-100-5-150-1000-2	667.173,87	3.132.309,87	324.207,22	2.828.365,22	0	2.547.703,00	0	2.509.209,00
c0-KA-100-5-150-1000-2	1.197.162,52	6.201.123,52	808.468,10	5.954.806,10	0	4.090.465,00	0	5.036.001,00
c0-KK-100-5-150-1000-2	781.388,44	5.547.283,44	199.600,67	5.033.237,66	0	4.488.135,00	0	5.022.448,00
c2-AK-100-5-150-1000-1	767.427,99	3.217.320,99	378.434,23	2.842.817,23	0	2.506.378,00	0	2.702.248,00
c2-KA-100-5-150-1000-1	856.556,93	4.686.250,93	550.240,87	4.187.971,87	0	3.005.380,00	0	3.703.544,00
c2-KK-100-5-150-1000-1	525.142,97	4.402.324,97	121.937,62	3.933.187,62	0	3.780.564,00	0	3.766.420,00
c3-AK-100-5-150-1000-0	535.568,87	2.824.607,87	259.895,10	2.582.304,10	0	2.355.227,00	0	2.434.481,00
c3-KA-100-5-150-1000-0	896.417,96	5.680.521,96	779.848,57	5.583.504,57	0	4.092.972,00	0	4.925.829,00
c3-KK-100-5-150-1000-0	646.802,89	4.904.177,89	261.455,69	4.597.643,69	0	3.949.372,00	0	3.766.825,00
Total 100-5-150	6.873.642,44	40.595.921,44	3.684.088,06	37.543.838,06	0	30.816.196,00	0	33.867.005,00
Vergleich 3vs...		-24,09%		-17,92%				-9,01%
Total 100-5	14.016.651,71	116.082.153,86	7.927.233,56	110.696.565,62	0	85.847.540,00	0	90.369.684,00
Vergleich 3vs...		-26,05%		-22,45%				-5,00%

Kunden 100 Depot 10 Fahr.kapaz. 70								
c0-AK-100-10-70-1000-2	812.681,80	5.009.637,80	486.972,70	4.690.774,70	0	4.216.527,00	0	5.655.781,00
c0-KA-100-10-70-1000-2	1.318.145,04	11.066.113,00	985.507,01	10.339.814,00	0	8.580.725,00	0	8.348.710,00
c0-KK-100-10-70-1000-2	785.957,53	9.122.943,53	312.623,97	8.851.237,97	0	7.032.610,00	0	8.332.403,00
c2-AK-100-10-70-1000-1	609.245,57	4.004.454,57	304.560,14	3.768.639,14	0	3.484.756,00	0	4.496.483,00
c2-KA-100-10-70-1000-1	1.314.298,36	11.635.197,40	991.624,01	11.309.841,00	0	8.678.473,00	0	9.519.386,00
c2-KK-100-10-70-1000-1	5.466.324,93	7.628.277,93	220.057,31	7.420.334,31	0	5.973.842,00	0	6.897.594,00
c3-AK-100-10-70-1000-0	875.588,83	4.708.070,83	414.379,66	4.310.905,66	0	3.935.892,00	0	5.564.645,00
c3-KA-100-10-70-1000-0	1.000.013,69	9.717.206,69	771.564,73	9.530.188,73	0	6.219.418,00	0	7.519.289,00
c3-KK-100-10-70-1000-0	719.868,28	9.570.587,28	201.627,11	9.540.786,11	0	6.545.907,00	0	8.298.810,00
Total 100-10-70	12.902.124,02	72.462.489,03	4.688.916,65	69.762.521,62	0	54.668.150,00	0	64.633.101,00
Vergleich 3vs...		-24,56%		-21,64%				-15,42%

Fahr.kapaz. 150								
c0-AK-100-10-150-1000-2	563.656,72	3.270.327,72	243.095,89	2.984.415,89	0	2.746.631,00	0	3.557.852,00
c0-KA-100-10-150-1000-2	922.365,27	5.511.389,27	578.562,14	5.216.577,14	0	4.305.798,00	0	5.827.055,00
c0-KK-100-10-150-1000-2	512.077,52	4.736.804,52	139.821,11	4.389.597,11	0	4.222.375,00	0	5.924.754,00
c2-AK-100-10-150-1000-1	367.103,67	2.593.953,67	204.693,74	2.434.571,74	0	2.265.990,00	0	3.066.846,00
c2-KA-100-10-150-1000-1	617.152,02	4.200.321,02	429.997,50	3.950.157,50	0	3.583.928,00	0	4.565.171,00

Problem Instance	Fall 1		Fall 2		Fall 3		Fall 4	
	St	GK	St	GK	St	GK	St	GK
c2-KK-100-10-150-1000-1	632.109,25	4.856.301,25	249.725,90	4.554.737,90	0	4.366.650,00	0	5.936.167,00
c3-AK-100-10-150-1000-0	582.216,03	3.214.055,03	211.444,47	2.838.083,47	0	2.667.703,00	0	3.863.225,00
c3-KA-100-10-150-1000-0	890.195,94	5.084.602,94	553.733,78	4.659.772,78	0	4.144.841,00	0	5.479.613,00
c3-KK-100-10-150-1000-0	552.998,71	4.452.870,71	153.114,56	4.240.564,56	0	4.057.066,00	0	4.138.695,00
Total 100-10-150	5.629.875,13	37.920.626,13	2.764.189,09	35.268.478,09	0	32.360.982,00	0	42.359.378,00
Vergleich 3vs...		-14,66%		-8,24%				-23,60%
Total 100-10	18.531.999,15	110.383.115,16	7.453.105,74	105.030.999,71	0	87.029.132,00	0	106.992.479,00
Vergleich 3vs...		-21,16%		-17,14%				-18,66%
Total 100	32.548.650,86	226.465.269,02	15.380.339,30	215.727.565,33	0	172.876.672,00	0	197.362.163,00
Vergleich 3vs...		-23,66%		-19,86%				-12,41%

Kunden 200								
Depot 10								
Fahr.kapaz. 70								
c0-AK-200-10-70-1000-2	1.863.750,27	10.065.040,30	1.088.643,23	9.388.790,23	0	8.463.666,00	0	10.043.077,00
c0-KA-200-10-70-1000-2	2.871.205,42	23.075.523,40	1.870.767,40	22.101.360,40	0	13.948.307,00	0	16.294.819,00
c0-KK-200-10-70-1000-2	1.334.824,83	21.227.528,80	354.849,49	21.156.881,50	0	13.856.896,00	0	16.329.852,00
c2-AK-200-10-70-1000-1	1.628.531,35	8.680.297,35	820.146,36	8.264.556,36	0	7.654.208,00	0	9.116.076,00
c2-KA-200-10-70-1000-1	1.782.567,51	17.529.284,50	1.248.682,83	16.922.783,80	0	11.091.508,00	0	11.990.069,00
c2-KK-200-10-70-1000-1	1.508.092,98	19.356.322,00	411.852,52	18.842.447,50	0	13.091.703,00	0	15.032.804,00
c3-AK-200-10-70-1000-0	1.675.850,13	9.365.032,13	935.969,90	9.230.406,90	0	7.706.325,00	0	10.140.517,00
c3-KA-200-10-70-1000-0	2.497.803,97	22.129.785,00	1.595.373,74	20.420.362,70	0	13.760.287,00	0	14.568.965,00
c3-KK-200-10-70-1000-0	2.008.954,24	23.627.025,20	575.732,23	22.721.081,20	0	15.156.342,00	0	18.064.519,00
Total 200-10-70	17.171.580,70	155.055.838,68	8.902.017,70	149.048.670,59	0	104.729.242,00	0	121.580.698,00
Vergleich 3vs...		-32,46%		-29,73%				-13,86%
Fahr.kapaz. 150								
c0-AK-200-10-150-1000-2	1.360.186,52	6.246.253,52	610.618,61	5.516.135,61	0	5.195.265,00	0	6.661.165,00
c0-KA-200-10-150-1000-2	1.952.075,98	10.904.913,00	1.213.624,20	9.823.870,20	0	9.081.027,00	0	10.288.075,00
c0-KK-200-10-150-1000-2	1.368.459,35	9.676.840,35	386.256,37	8.771.678,37	0	8.677.922,00	0	12.045.418,00
c2-AK-200-10-150-1000-1	848.510,88	4.707.221,88	469.484,32	4.547.256,32	0	4.231.102,00	0	5.278.791,00
c2-KA-200-10-150-1000-1	1.659.339,42	8.946.181,42	993.238,99	8.140.933,99	0	7.281.260,00	0	9.566.833,00
c2-KK-200-10-150-1000-1	1.287.463,26	9.094.158,26	402.488,83	8.459.517,83	0	8.154.501,00	0	10.372.967,00
c3-AK-200-10-150-1000-0	1.112.755,83	5.357.719,83	476.521,32	4.764.281,32	0	4.532.985,00	0	5.194.071,00
c3-KA-200-10-150-1000-0	1.724.214,24	9.943.025,24	1.252.249,36	9.744.417,36	0	8.778.589,00	0	10.148.886,00
c3-KK-200-10-150-1000-0	1.171.764,53	8.894.413,53	354.217,83	8.058.352,83	0	8.068.244,00	0	8.973.731,00
Total 200-10-150	12.484.770,01	73.770.727,03	6.158.699,83	67.826.443,83	0	64.000.895,00	0	78.529.937,00
Vergleich 3vs...		-13,24%		-5,64%				-18,50%
Total 200	29.656.350,71	228.826.565,71	15.060.717,53	216.875.114,42	0	168.730.137,00	0	200.110.635,00
Vergleich 3vs...		-26,26%		-22,20%				-15,68%

A.5.8 Vergleich alle Fälle

Anzahl der Kunden	Anzahl der Depots	Cluster	Zeitreihe	Fall 1			Fall 2			Fall 3			Fall 4		
				70	150	Abw	70	150	Abw	70	150	Abw	70	150	Abw
20	5	verstreut	AK	1.451.613,72	1.234.977,02	-14,92%	1.382.046,98	1.192.119,90	-13,74%	1.331.385,00	1.132.244,00	-14,96%	1.447.723,00	1.124.964,00	-22,3%
			KA	2.296.120,37	1.467.129,48	-36,10%	2.165.155,72	1.428.995,39	-34,00%	1.786.135,00	1.317.583,00	-26,23%	1.935.829,00	1.398.599,00	-27,8%
			KK	2.219.363,84	1.109.892,64	-49,99%	2.255.286,98	1.090.632,74	-51,64%	2.155.698,00	1.081.671,00	-49,82%	2.033.973,00	1.209.064,00	-40,6%
Total				5.967.097,93	3.811.999,14	-36,12%	5.802.489,68	3.711.748,03	-36,03%	5.273.218,00	3.531.498,00	-33,03%	5.417.525,00	3.732.627,00	-31,1%
	2	AK	AK	1.268.063,83	962.310,74	-24,11%	1.229.861,10	939.787,59	-23,59%	1.195.200,00	906.956,00	-24,12%	1.322.825,00	907.342,00	-31,4%
			KA	1.997.203,04	1.664.180,79	-16,67%	1.907.041,01	1.602.506,25	-15,97%	1.642.915,00	1.317.410,00	-19,81%	1.604.708,00	1.514.319,00	-5,6%
			KK	1.354.219,72	1.118.221,07	-17,43%	1.326.657,64	1.091.554,42	-17,72%	1.283.110,00	1.072.362,00	-16,42%	1.388.283,00	1.195.548,00	-13,9%
Total				4.619.486,59	3.744.712,60	-18,94%	4.463.559,75	3.633.848,26	-18,59%	4.121.225,00	3.296.728,00	-20,01%	4.315.816,00	3.617.209,00	-16,2%
	3	AK	AK	1.140.826,20	935.052,87	-18,04%	1.122.641,42	888.749,01	-20,83%	1.047.966,00	876.949,00	-16,32%	1.081.128,00	922.968,00	-14,6%
			KA	2.349.000,51	1.148.659,78	-51,10%	2.287.338,93	1.083.980,10	-52,61%	1.751.097,00	923.203,00	-47,28%	2.089.867,00	1.097.264,00	-47,5%
			KK	2.047.459,58	1.554.497,31	-24,08%	2.058.821,90	1.470.594,30	-28,57%	1.841.647,00	1.416.693,00	-23,07%	2.040.403,00	1.519.781,00	-25,5%
Total				5.537.286,29	3.638.209,96	-34,30%	5.468.802,25	3.443.323,41	-37,04%	4.640.710,00	3.216.845,00	-30,68%	5.211.398,00	3.540.013,00	-32,1%
Total 20-5-70vs150				16.123.870,81	11.194.921,70	-30,57%	15.734.851,68	10.788.919,70	-31,43%	14.035.153,00	10.045.071,00	-28,43%	14.944.739,00	10.889.849,00	-27,1%
Duchschnitt 20-5						-28,05%			-28,74%			-26,45%			-25,46%

50	5	verstreut	AK	3.005.556,93	1.849.601,41	-38,46%	2.740.315,53	1.676.796,78	-38,81%	2.543.661,00	1.554.159,00	-38,90%	2.561.002,00	1.560.259,00	-39,1%
			KA	5.868.695,60	2.828.332,32	-51,81%	5.819.159,03	2.589.878,93	-55,49%	4.355.075,00	2.187.519,00	-49,77%	4.566.140,00	2.865.222,00	-37,3%
			KK	5.246.297,58	2.790.463,26	-46,81%	5.191.300,75	2.571.079,41	-50,47%	3.952.007,00	2.540.218,00	-35,72%	4.267.342,00	3.019.600,00	-29,2%
Total				14.120.550,11	7.468.396,99	-47,11%	13.750.775,31	6.837.755,12	-50,27%	10.850.743,00	6.281.896,00	-42,11%	11.394.484,00	7.445.081,00	-34,7%
	2	AK	AK	2.276.511,52	1.842.167,24	-19,08%	2.150.214,67	1.688.491,25	-21,47%	1.959.839,00	1.577.796,00	-19,49%	1.950.199,00	1.680.808,00	-13,8%
			KA	4.573.452,88	1.914.310,97	-58,14%	4.338.828,90	1.756.717,69	-59,51%	2.977.431,00	1.605.476,00	-46,08%	3.688.107,00	1.725.171,00	-53,2%
			KK	7.785.957,10	2.397.183,88	-69,21%	7.641.081,13	2.088.430,04	-72,67%	6.436.788,00	2.027.063,00	-68,51%	6.421.124,00	1.953.241,00	-69,6%
Total				14.635.921,50	6.153.662,09	-57,96%	14.130.124,70	5.533.638,98	-60,84%	11.374.058,00	5.210.335,00	-54,19%	12.059.430,00	5.359.220,00	-55,6%
	3	AK	AK	2.581.246,75	1.605.537,97	-37,80%	2.539.728,67	1.417.080,95	-44,20%	2.351.845,00	1.278.230,00	-45,65%	2.413.005,00	1.399.075,00	-42,0%
			KA	4.993.617,71	2.346.600,30	-53,01%	4.753.772,09	2.212.946,96	-53,45%	3.249.202,00	1.732.240,00	-46,69%	3.863.339,00	2.379.159,00	-38,4%
			KK	4.625.957,87	2.420.646,72	-47,67%	4.575.222,32	2.219.754,23	-51,48%	3.619.601,00	2.120.241,00	-41,42%	3.975.288,00	2.150.240,00	-45,9%
Total				12.200.822,33	6.372.784,99	-47,77%	11.868.723,08	5.849.782,14	-50,71%	9.220.648,00	5.130.711,00	-44,36%	10.251.632,00	5.928.474,00	-42,2%
Total 50-5-70vs150				40.957.293,94	19.994.844,07	-51,18%	39.749.623,09	18.221.176,24	-54,16%	31.445.449,00	16.622.942,00	-47,14%	33.705.546,00	18.732.775,00	-44,4%
Duchschnitt 50-5						-46,89%			-49,73%			-43,58%			-40,95%

100	5	verstreut	AK	5.127.222,72	3.132.309,87	-38,91%	4.798.293,98	2.828.365,22	-41,05%	3.970.567,00	2.547.703,00	-35,84%	3.968.822,00	2.509.209,00	-36,8%
			KA	11.185.394,20	6.201.123,52	-44,56%	10.921.804,70	5.954.806,10	-45,48%	7.841.491,00	4.090.465,00	-47,84%	7.515.344,00	5.036.001,00	-33,0%
			KK	10.921.222,40	5.547.283,44	-49,21%	10.589.885,90	5.033.237,66	-52,47%	7.559.121,00	4.488.135,00	-40,63%	8.902.185,00	5.022.448,00	-43,6%
Total				27.233.839,32	14.880.716,83	-45,36%	26.309.984,58	13.816.408,98	-47,49%	19.371.179,00	11.126.303,00	-42,56%	20.386.351,00	12.567.658,00	-38,4%
	2	AK	AK	4.779.579,47	3.217.320,99	-32,68%	4.554.145,18	2.842.817,23	-37,58%	3.454.322,00	2.506.378,00	-27,44%	3.416.169,00	2.702.248,00	-20,9%
			KA	8.470.932,84	4.686.250,93	-44,68%	8.360.659,15	4.187.971,87	-49,91%	6.930.970,00	3.005.380,00	-56,64%	6.071.280,00	3.703.544,00	-39,0%
			KK	9.189.284,77	4.402.324,97	-52,09%	9.081.505,42	3.933.187,62	-56,69%	6.582.798,00	3.780.564,00	-42,57%	6.970.564,00	3.766.420,00	-46,0%
Total				22.439.797,08	12.305.896,89	-45,16%	21.996.309,75	10.963.976,72	-50,16%	16.968.090,00	9.292.322,00	-45,24%	16.458.013,00	10.172.212,00	-38,2%
	3	AK	AK	4.955.636,02	2.824.607,87	-43,00%	4.641.638,11	2.582.304,10	-44,37%	3.909.868,00	2.355.227,00	-39,76%	3.943.522,00	2.434.481,00	-38,3%
			KA	10.780.109,00	5.680.521,96	-47,31%	10.454.953,40	5.583.504,57	-46,59%	7.738.712,00	4.092.972,00	-47,11%	7.333.115,00	4.925.829,00	-32,8%
			KK	10.076.851,00	4.904.177,89	-51,33%	9.749.841,72	4.597.643,69	-52,84%	7.043.495,00	3.949.372,00	-43,93%	8.381.678,00	3.766.825,00	-55,1%
Total				25.812.596,02	13.409.307,72	-48,05%	24.846.433,23	12.763.452,36	-48,63%	18.692.075,00	10.397.571,00	-44,37%	19.658.315,00	11.127.135,00	-43,4%
Total 100-5-70vs150				75.486.232,42	40.595.921,44	-46,22%	73.152.727,56	37.543.838,06	-48,68%	55.031.344,00	30.816.196,00	-44,00%	56.502.679,00	33.867.005,00	-40,1%
Duchschnitt 100-5						-46,86%			-47,44%			-42,42%			-38,37%

Anhang

Anzahl der Kunden	Anzahl der Depots	Cluster	Zeitreihe	Fall 1			Fall 2			Fall 3			Fall 4		
				70	150	Abw	70	150	Abw	70	150	Abw	70	150	Abw
100	10	verstreut	AK	5.009.637,80	3.270.327,72	-34,72%	4.690.774,70	2.984.415,89	-36,38%	4.216.527,00	2.746.631,00	-34,86%	5.655.781,00	3.557.852,00	-37,1%
			KA	11.066.113,00	5.511.389,27	-50,20%	10.339.814,00	5.216.577,14	-49,55%	8.580.725,00	4.305.798,00	-49,82%	8.348.710,00	5.827.055,00	-30,2%
			KK	9.122.943,53	4.736.804,52	-48,08%	8.851.237,97	4.389.597,11	-50,41%	7.032.610,00	4.222.375,00	-39,96%	8.332.403,00	5.924.754,00	-28,9%
Total				25.198.694,33	13.518.521,51	-46,35%	23.881.826,67	12.590.590,14	-47,28%	19.829.862,00	11.274.804,00	-43,14%	22.336.894,00	15.309.661,00	-31,5%
		2	AK	4.004.454,57	2.593.953,67	-35,22%	3.768.639,14	2.434.571,74	-35,40%	3.484.756,00	2.265.990,00	-34,97%	4.496.483,00	3.066.846,00	-31,8%
			KA	11.635.197,40	4.200.321,02	-63,90%	11.309.841,00	3.950.157,50	-65,07%	8.678.473,00	3.583.928,00	-58,70%	9.519.386,00	4.565.171,00	-52,0%
			KK	7.628.277,93	4.856.301,25	-36,34%	7.420.334,31	4.554.737,90	-38,62%	5.973.842,00	4.366.650,00	-26,90%	6.897.594,00	5.936.167,00	-13,9%
Total				23.267.929,90	11.650.575,94	-49,93%	22.498.814,45	10.939.467,14	-51,38%	18.137.071,00	10.216.568,00	-43,67%	20.913.463,00	13.568.184,00	-35,1%
		3	AK	4.708.070,83	3.214.055,03	-31,73%	4.310.905,66	2.838.083,47	-34,17%	3.935.892,00	2.667.703,00	-32,22%	5.564.645,00	3.863.225,00	-30,6%
			KA	9.717.206,69	5.084.602,94	-47,67%	9.530.188,73	4.659.772,78	-51,11%	6.219.418,00	4.144.841,00	-33,36%	7.519.289,00	5.479.613,00	-27,1%
			KK	9.570.587,28	4.452.870,71	-53,47%	9.540.786,11	4.240.564,56	-55,55%	6.545.907,00	4.057.066,00	-38,02%	8.298.810,00	4.138.695,00	-50,1%
Total				23.995.864,80	12.751.528,68	-46,86%	23.381.880,50	11.738.420,81	-49,80%	16.701.217,00	10.869.610,00	-34,92%	21.382.744,00	13.481.533,00	-37,0%
Total 100-10-70vs150				72.462.489,03	37.920.626,13	-47,67%	69.762.521,62	35.268.478,09	-49,44%	54.668.150,00	32.360.982,00	-40,80%	64.633.101,00	42.359.378,00	-34,5%
Durchschnitt 100-10						-44,59%		-46,25%		-38,76%		-33,53%			

200	10	verstreut	AK	10.065.040,30	6.246.253,52	-37,94%	9.388.790,23	5.516.135,61	-41,25%	8.463.666,00	5.195.265,00	-38,62%	10.043.077,00	6.661.165,00	-33,7%
			KA	23.075.523,40	10.904.913,00	-52,74%	22.101.360,40	9.823.870,20	-55,55%	13.948.307,00	9.081.027,00	-34,90%	16.294.819,00	10.288.075,00	-36,9%
			KK	21.227.528,80	9.676.840,35	-54,41%	21.156.881,50	8.771.678,37	-58,54%	13.856.896,00	8.677.922,00	-37,37%	16.329.852,00	12.045.418,00	-26,2%
Total				54.368.092,50	26.828.006,87	-50,65%	52.647.032,13	24.111.684,18	-54,20%	36.268.869,00	22.954.214,00	-36,71%	42.667.748,00	28.994.658,00	-32,0%
		2	AK	8.680.297,35	4.707.221,88	-45,77%	8.264.556,36	4.547.256,32	-44,98%	7.654.208,00	4.231.102,00	-44,72%	9.116.076,00	5.278.791,00	-42,1%
			KA	17.529.284,50	8.946.181,42	-48,96%	16.922.783,80	8.140.933,99	-51,89%	11.091.508,00	7.281.260,00	-34,35%	11.990.069,00	9.566.833,00	-20,2%
			KK	19.356.322,00	9.094.158,26	-53,02%	18.842.447,50	8.459.517,83	-55,10%	13.091.703,00	8.154.501,00	-37,71%	15.032.804,00	10.372.967,00	-31,0%
Total				45.565.903,85	22.747.561,56	-50,08%	44.029.787,66	21.147.708,14	-51,97%	31.837.419,00	19.666.863,00	-38,23%	36.138.949,00	25.218.591,00	-30,2%
		3	AK	9.365.032,13	5.357.719,83	-42,79%	9.230.406,90	4.764.281,32	-48,38%	7.706.325,00	4.532.985,00	-41,18%	10.140.517,00	5.194.071,00	-48,8%
			KA	22.129.785,00	9.943.025,24	-55,07%	20.420.362,70	9.744.417,36	-52,28%	13.760.287,00	8.778.589,00	-36,20%	14.568.965,00	10.148.886,00	-30,3%
			KK	23.627.025,20	8.894.413,53	-62,35%	22.721.081,20	8.058.352,83	-64,53%	15.156.342,00	8.068.244,00	-46,77%	18.064.519,00	8.973.731,00	-50,3%
Total				55.121.842,33	24.195.158,60	-56,11%	52.371.850,80	22.567.051,51	-56,91%	36.622.954,00	21.379.818,00	-41,62%	42.774.001,00	24.316.688,00	-43,2%
Total 200-10-70vs150				155.055.838,68	73.770.727,03	-52,42%	149.048.670,59	67.826.443,83	-54,49%	104.729.242,00	64.000.895,00	-38,89%	121.580.698,00	78.529.937,00	-35,4%
Durchschnitt 200-10						-50,34%		-52,50%		-39,09%		-35,50%			

Total 70vs150				360.085.724,88	183.477.040,37	-49,05%	347.448.394,54	169.648.855,92	-51,17%	259.909.338,00	153.846.086,00	-40,81%	291.366.763,00	184.378.944,00	-36,7%
----------------------	--	--	--	-----------------------	-----------------------	----------------	-----------------------	-----------------------	----------------	-----------------------	-----------------------	----------------	-----------------------	-----------------------	---------------

Durchschnitt 70vs150						-42,95%		-44,93%		-38,06%		-34,76%		
Min Abweichung						-14,92%		-13,74%		-14,96%		-5,63%		
Max Abweichung						-69,21%		-72,67%		-68,51%		-69,58%		