

Optimierung von Distributionsnetzwerken unter Berücksichtigung von Tourenplanungsaspekten und zeitlichen Restriktionen

Von der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der
Wirtschafts- und Sozialwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Math. Halil Ibrahim Gündüz

Berichter:

Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Hans-Jürgen Sebastian
Univ.-Prof. Dr. rer. pol. habil. Michael Bastian

Tag der mündlichen Prüfung: 22. Februar 2011

Operations Research

Halil Ibrahim Gündüz

**Optimierung von Distributionsnetzwerken
unter Berücksichtigung von Tourenplanungs-
aspekten und zeitlichen Restriktionen**

Shaker Verlag
Aachen 2011

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2011

Copyright Shaker Verlag 2011

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0030-6

ISSN 0945-2214

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit *Optimierung von Distributionsnetzwerken unter Berücksichtigung von Tourenplanungsaspekten und zeitlichen Restriktionen* ist im Rahmen meiner wissenschaftlichen Tätigkeit am Deutschen Post Lehrstuhl für Optimierung von Distributionsnetzwerken an der RWTH Aachen entstanden. Die Motivation zu der behandelten Thematik entstammt aus meinen bearbeiteten Projekten zur Standort- und Tourenplanung.

Für die Möglichkeit zur Mitarbeit am Lehrstuhl und zur Bearbeitung von verschiedenen interessanten Projekten im Bereich Transportlogistik und Entscheidungsunterstützung möchte ich mich bei Herrn Prof. Sebastian herzlich bedanken. Er hat meine Entwicklung gefördert und hat mich durch wertvolle Anregungen während der Bearbeitung meiner Dissertation unterstützt.

Herr Prof. Bastian danke ich für die seine freundliche Bereitschaft zur Übernahme des Korreferats.

Viel Freude hat mir stets die Zusammenarbeit mit meinen Kollegen und der Austausch über fachliche aber auch private Themen bereitet. Für die großartige Hilfestellung zu Beginn meiner Mitarbeit am Lehrstuhl danke ich Prof. Stefan Irnich und Dr. Christoph Hermanns.

Herrn Dr. Arif Otyakmaz sowie meinen Kollegen Herrn Ansgar Luttrupp und Herrn Martin Baumung gilt mein Dank für die wertvolle Hilfe zu formalen Aspekten der schriftlichen Ausarbeitung. Insbesondere danke ich Ansgar Luttrupp für zahlreiche konstruktive fachliche und außerfachliche Diskussionen, für die erfolgreiche Zusammenarbeit und seine freundschaftliche Unterstützung.

Für ein technisch komfortables und einwandfreies Arbeitsumfeld gilt mein Dank Gilberto von Sparr und Brigitte Deckers.

In schöner Erinnerung werden die heiteren gemeinschaftlichen Mittagessen in Aachen mit meinen Freunden Dr. Arif Otyakmaz, Benan Sendil, Dr. David Hajas und Jiri Dus bleiben. In schwierigen Phasen, in denen die Dissertation schleppend und nicht nach meinen Vorstellungen lief, erfuhr ich durch meine Freunde fortwährend

tolle Aufmunterung und Unterstützung. Ihr habt zum Gelingen dieser Arbeit sehr viel beigetragen. Ich danke euch sehr!

Ein besonderer Dank gebührt meinen Schwestern Ayhan Balci und Resmiye Kurt für ihre moralische Aufbauarbeit und den notwendigen familiären Rückhalt. Meinem Onkel Dr. Irfan Gündüz bin ich für seine fachliche Hilfe am Anfang meines Studiums zur Dank verpflichtet!

Mein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern Nigar und Orhan Gündüz für ihre liebevolle Unterstützung, für ihren Mut das Abenteuer in ein fremdes Land zu gehen und somit den Grundstein für meinen akademischen Werdegang zu legen.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	ix
Abbildungsverzeichnis	xiii
Tabellenverzeichnis	xv
Algorithmenverzeichnis	xix
1 Einleitung	1
2 Motivation und Problembeschreibung	7
3 Relevanz und Klassifizierung von Location-Routing-Problemen	17
3.1 Relevanz und praktische Anwendungen	17
3.2 Taxonomie	20
4 Modellierung des ein- und zweistufigen Location-Routing-Problems mit zeitlichen Restriktionen	27
4.1 Teilprobleme mit Standortplanungsaspekten	27
4.1.1 Das einstufige kapazitierte Standortproblem mit Zeitfenstern (SSCFLPTW)	29
4.1.2 Das zweistufige kapazitierte Standortproblem mit Güterflüssen und Zeitfenstern (TSCFLPTW)	32
4.2 Teilprobleme mit Tourenplanungsaspekten	37
4.2.1 Das Travelling-Salesman-Problem mit Zeitfenstern (TSPTW)	37
4.2.2 Das Vehicle-Routing-Problem mit Zeitfenstern (VRPTW) . .	40
4.3 Das einstufige Location-Routing-Problem mit Zeitfenstern (SSLRPTW)	47
4.4 Das zweistufige Location-Routing-Problem mit Güterflüssen und Zeitfenstern (TSLRPTW)	53
5 Lösungsverfahren für die Standort- und Tourenprobleme	61
5.1 Tabu Search	61
5.2 Lösungsverfahren für das SSCFLPTW und für das TSCFLPTW . .	63
5.2.1 Heuristiken für das SSCFLPTW	63

5.2.1.1	Cheapest Fixcost Nearest Allocation	64
5.2.1.2	Open All Nearest Allocation	64
5.2.2	Heuristiken für TSCFLPTW	65
5.2.2.1	Cheapest Path Insertion	65
5.2.2.2	Open All Cheapest Path Insertion	68
5.2.2.3	Add, Drop and Shift	68
5.3	Lösungsverfahren für das TSPTW und das VRPTW	72
5.3.1	TSPTW: Heuristische und exakte Verfahren	73
5.3.1.1	Preprocessing	73
5.3.1.2	Zeitliche Beziehungen von TSPTW-Lösungen	77
5.3.1.3	Kantenaustauschverfahren	81
5.3.1.4	Dynamische Programmierung	87
5.3.2	VRPTW: Heuristische Verfahren	92
5.3.2.1	Savings	92
5.3.2.2	Time Oriented Nearest Neighbour	93
5.3.2.3	I_1 -Heuristik	95
5.3.2.4	2-Opt-Star	97
5.3.2.5	Relocate	99
5.3.2.6	Exchange	100
5.3.2.7	Cross-Exchange	101
5.3.3	Resource Extension Functions (REF)	103
6	Lösungsverfahren für das SSLRPTW und das TSLRPTW	111
6.1	Iterative Lösungsverfahren	112
6.2	Eingebettete Lösungsverfahren	114
6.3	Lösungsverfahren für das SSLRPTW	115
6.4	Lösungsverfahren für das TSLRPTW	127
7	Instanzen und Ergebnisse	139
7.1	Erstellung der Instanzen	140
7.2	Ergebnisse SSLRPTW	145
7.2.1	Allgemeine Beobachtungen	146
7.2.2	Beobachtungen zum SSCFLPTW-Modell	148
7.2.3	Vergleich der sequenziellen mit der besten Lösung	150
7.2.4	Einfluss der Kapazität und der Fixkosten	155
7.2.5	Rechenaufwand für das SSLRPTW-Lösungsverfahren	157
7.3	Ergebnisse TSLRPTW	159
7.3.1	Allgemeine Beobachtungen	159
7.3.2	Beobachtungen zum TSCFLPTW-Modell	163
7.3.3	Vergleich der sequenziellen mit der besten Lösung	165
7.3.4	Einfluss der Kapazität und der Fixkosten	170
7.3.5	Rechenaufwand für das TSLRPTW-Lösungsverfahren	174

8 Zusammenfassung und Ausblick	177
8.1 Zusammenfassung	177
8.2 Ausblick	178
A Numerische Ergebnisse: SSLRPTW	181
B Numerische Ergebnisse: TSLRPTW	207
Literaturverzeichnis	229

Abkürzungsverzeichnis

\wedge	Konjunktion aus der mathematische Logik (mathematisches <i>UND</i>)
\vee	Disjunktion aus der mathematische Logik (mathematisches <i>ODER</i>)
%	Prozent
Abb.	Abbildung
Anz.	Anzahl
B2B	<u>B</u> usiness to <u>B</u> usiness
B2C	<u>B</u> usiness to <u>C</u> ustomer
begr.	begrenzt
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BPP	<u>B</u> in- <u>P</u> acking- <u>P</u> roblem
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CFLRP	kapazitiertes <u>F</u> acility- <u>L</u> ocation- <u>R</u> outing- <u>P</u> roblem
CFLP	kapazitiertes <u>F</u> acility- <u>L</u> ocation- <u>P</u> roblem
CFLPSS	kapazitiertes <u>F</u> acility- <u>L</u> ocation- <u>P</u> roblem mit <u>S</u> ingle- <u>S</u> ourcing
CWLP	kapazitiertes <u>W</u> arehouse- <u>L</u> ocation- <u>P</u> roblem
Def.	Definition
determ.	deterministisch
d.h	das heißt
disk.	diskret
DP	<u>D</u> ynamische <u>P</u> rogrammierung

dyn. dynamisch

E-Commerce Electronic Commerce

einst. einstufig

engl. englisch

EU Europäische Union

EU-12 Europäische Union - bis einschließlich 1994

EU-15 Europäische Union - bis einschließlich April 2004

EU-27 Europäische Union - seit 2007

EV Entscheidungsvariable

evtl. eventuell

ff. und folgende

FLP Facility-Location-Problem

GB Gigabyte

GE Geld Einheit

geschl. geschlossen

GHz Giga Hertz

hier. hierarchisch

heur. heuristisch

IPEC Infeasible-Path-Elimination-Constraint

KEP Kurier, Express und Paket

km Kilometer

kont. kontinuierlich

LB untere Schanke

LP Lineares Programm

LRP Location-Routing-Problem

Max. Maximum

MDVRP Multi-Depot-Vehicle-Routing-Problem

MDVRPTW Multi-Depot-Vehicle-Routing-Problem with Time-Windows

ME Mengen Einheit

mehrst. mehrstufig

min minimiere

Min. Minimum

Mio. Million(en)

MIP Mixed-Integer-Problem

Mrd. Milliarde(n)

MTZ Miller-Tucker-Zemlin

n.a. nicht angegeben

NB Nebenbedingung

Netz. Netzwerk

PCB Precedence-Cycle-Breaking

pot. potenziell

RAM Random Access Memory

REF Resource Extension Functions

Rel. Relation

SEB Subtoureliminationsbedingungen

SPPTW Shortest Path Problem with Time Windows

SSCFLPTW Single-Stage-Capacitated-Facility-Location-Problem with Time-Windows

SSLRPTW Single Stage Location Routing Problem with Time Windows

stat. statisch

stoch. stochastisch

STSP symmetrisches Travelling Salesman Problem

t Tonne

Tonnen-km Tonnenkilometer

- TSP** Travelling-Salesman-Problem
- TSPTW** Travelling-Salesman-Problem with Time-Windows
- TSCFLPTW** Two-Stage-Capacitated-Facility-Location-Problem with
Time-Windows
- TSLRPTW** Two-Stage-Location-Routing-Problem with Time-Windows
- UB** obere Schranke
- vgl.** vergleiche
- VRP** Vehicle-Routing-Problem
- VRPTW** Vehicle-Routing-Problem with Time-Windows
- VSP** Vehicle-Scheduling-Problem
- WLP** Warehouse-Location-Problem
- z.B.** zum Beispiel

Abbildungsverzeichnis

1.1	Vergleich des Gütertransport-Wachstums mit dem BIP-Wachstum	2
1.2	Anteil der Fracht-Beförderungsart in der EU	2
1.3	Vergleich des nationalen und internationalen Gütertransport	3
1.4	Wachstum des Straßen-Güterverkehrs in der EU	3
2.1	CFLP-Instanz	8
2.2	Beispiel für ein CFLP	10
2.3	Lösung für einer CFLP-Instanz	10
2.4	Lösung für einer CFLP-Instanz mit nachfolgender Tourenplanung	11
3.1	Taxonomie von LRP nach Nagy und Salhi (1.Ebene)	20
3.2	Taxonomie von LRP nach Nagy und Salhi (2.Ebene)	21
4.1	SSLRPTW: Ausgangssituation und mögliche Lösung	50
4.2	Transportstruktur des TSLRPTWs	53
5.1	Cheapest Path Insertion Beispiel	66
5.2	Region	70
5.3	Einzugsgebiet	71
5.4	Voronoi-Polygon und Delaunay-Triangulation	72
5.5	Zulässige TSPTW-Tour für das Beispiel 5.2	82
5.6	Prinzip eines 2-Opt-Schritts	83
5.7	Orientierungsmöglichkeiten nach einem 2-Opt-Schritt	83
5.8	2-Opt-Nachbarschaft	84
5.9	Or-Opt-Darstellung	87
5.10	Prinzip der Savings-Heuristik	93
5.11	2-Opt-Star Schritt	98
5.12	Relocate-Schritt	100
5.13	Exchange-Schritt	101
5.14	Cross-Exchange-Schritt	102
5.15	Tour aus zusammengefügt Segmenten	106
5.16	REF: 2-Opt-Star-Segmente	106
5.17	REF: Cross-Exchange-Segmente	107
5.18	REF: Customer-Relocate-Segmente	108

6.1	Funktionsweise iterativer Verfahren für LRP	113
6.2	Iteratives Lösungsverfahren LRP	113
6.3	Funktionsweise eingebetteten Verfahren für LRP	115
6.4	Nachbarkonfigurationen eines eingerichteten Standorts	117
6.5	Ausgangssituation der Allokationsprobleme für das Beispiel	120
6.6	Das Flussdiagramm zum SSLRPTW-Lösungsverfahren	126
6.7	Änderung der frühestmöglichen Abfahrt an einem Depot	129
6.8	Änderung des Güterflusses beim TSLRPTW	130
6.9	Veränderungen der ersten Transportstufe durch eine neue Kundenzuordnung	131
6.10	Das Flussdiagramm zum TSLRPTW-Lösungsverfahren	137
7.1	Erstellung potenzieller Standorte	141
7.2	Erstellung von Produktionsstätten	141
7.3	Aufbau der erweiterten Solomon-Instanzen	142
7.4	Auszug SSLRPTW-Instanzen - Allgemeine-Informationen	143
7.5	Auszug SSLRPTW-Instanzen - Standort-Informationen	144
7.6	Auszug TSLRPTW-Instanzen - Allgemeine Informationen	144
7.7	Auszug TSLRPTW-Instanzen - Produktionsstätten	144
7.8	Zielfunktionswertverläufe beim SSLRPTW	146
7.9	SSLRPTW-Lösungen für unterschiedliche Fixkosten und Kapazitäten	148
7.10	Zentrale Standortlösung für eine SSLRPTW-Instanz	149
7.11	SSLRPTW: Verteilung der relativen Verbesserung der Gesamtkosten	151
7.12	SSLRPTW: Verteilung der Standortreduktion	152
7.13	Vergleich der Transportkostenanteile im Mittel (SSLRPTW)	154
7.14	Vergleich der Kosten und der Standortanzahl im Mittel	156
7.15	Vergleich der Transportkosten im Mittel (SSLRPTW)	157
7.16	Lösungsverläufe beim TSLRPTW	160
7.17	TSLRPTW-Lösungen für unterschiedliche Fixkosten und Kapazitäten	161
7.18	Lösung mit regionalen Zentral-Standorten für eine TSLRPTW-Instanz	162
7.19	TSLRPTW: Verteilung der relativen Verbesserung der Gesamtkosten	166
7.20	TSLRPTW: Verteilung der Standortreduktion	167
7.21	Kostenanteile im Mittel (TSLRPTW)	168
7.22	Kostenanteile im Mittel (TSLRPTW)	169
7.23	Vergleich der Kosten und der Standortanzahl im Mittel (TSLRPTW)	172
7.24	Vergleich der Transportkosten im Mittel (TSLRPTW)	173
8.1	Schema eines dreistufigen Distributionsnetzwerks	179
8.2	Wellen in dreistufigen Distributionsnetzwerken	180

Tabellenverzeichnis

3.1	Überblick der LRP-Anwendungen	19
3.2	Einordnung bekannter Veröffentlichungen - 1.Ebene Klassifizierung	23
3.3	Einordnung bekannter Veröffentlichungen - 2.Ebene Klassifizierung	24
4.1	Bezeichner und Entscheidungsvariablen des SSCFLPTW-Modells	31
4.2	Komplexität des SSCFLPTW-Modells	32
4.3	Bezeichner und Entscheidungsvariablen des TSCFLPTW-Modells	36
4.4	Komplexität des TSCFLPTW-Modells	36
4.5	Bezeichner und Entscheidungsvariablen des TSPTW-Modells	40
4.6	Bezeichner und Entscheidungsvariablen des VRPTW-Modells	42
4.7	Zusätzliche Bezeichner für die Netzflussformulierung	45
4.8	Zusätzliche Bezeichner für das MDVRPTW	46
4.9	Bezeichner und Entscheidungsvariablen des SSLRPTW-Modells	49
4.10	Komplexität des SSLRPTW-Modells	51
4.11	Entscheidungsvariablen des TSLRPTW-Modells	56
4.12	Bezeichner des TSLRPTW-Modells	57
4.13	Komplexität des TSLRPTW-Modells	58
6.1	Aktualisierung und Verwaltung der Tabu-Listen	124
7.1	Bezeichner in den Testinstanzen	143
7.2	Mindestanzahl an einzurichtenden Standorten	145
7.3	SSCFLPTW-Modell - Anzahl der EV und NB	150
7.4	TSCFLPTW-Modellkosten für die Gruppe mit Fixkosten 500 GE und Kapazität 1500 ME	163
7.5	TSCFLPTW-Modell - Anzahl der EV und NB	164
7.6	TSCFLPTW-Modell - Beispiele mit nicht optimaler Lösung	164
7.7	Instanzen mit gleicher Lösung für das sequenzielle und TSLRPTW-Lösungsverfahren - Fixkosten 25000 GE und Kapazität 50000 ME	165
A.1	Bezeichner der SSLRPTW-Ergebnistabellen	182
A.2	Bezeichner der SSLRPTW-Statistiktabellen	183
A.3	C1-Instanzen: SSCFLPTW-Modellkosten im Mittel	184
A.4	Ergebnisse der C1-Instanzen im Mittel	185

A.5	Ergebnisspanne der C1-Instanzen	186
A.6	Statistiken zur Rechenzeit der C1-Instanzen im Mittel	187
A.7	C1-Instanzen: Statistiken für die Aufrufe der Teilprobleme im Mittel	188
A.8	Anzahl der Entscheidungsvariablen für die Allokationsprobleme der C1-Instanzen	189
A.9	R1-Instanzen: SSCFLPTW-Modellkosten im Mittel	190
A.10	Ergebnisse der R1-Instanzen im Mittel	191
A.11	Ergebnisspanne der R1-Instanzen	192
A.12	Statistiken zur Rechenzeit der R1-Instanzen im Mittel	193
A.13	R1-Instanzen: Statistiken für die Aufrufe der Teilprobleme im Mittel	194
A.14	Anzahl der Entscheidungsvariablen für die Allokationsprobleme der R1-Instanzen	195
A.15	RC1-Instanzen: SSCFLPTW-Modellkosten im Mittel	196
A.16	Ergebnisse der RC1-Instanzen im Mittel	197
A.17	Ergebnisspanne der RC1-Instanzen	198
A.18	Statistiken zur Rechenzeit der RC1-Instanzen im Mittel	199
A.19	RC1-Instanzen: Statistiken für die Aufrufe der Teilprobleme im Mittel	200
A.20	Anzahl der Entscheidungsvariablen für die Allokationsprobleme der RC1-Instanzen	201
A.21	SSCFLPTW-Modellkosten der 1000 Kunden Instanzen	202
A.22	Ergebnisse der 1000 Kunden-Instanzen	203
A.23	Statistiken zur Rechenzeit der 1000 Kunden-Instanzen	204
A.24	1000 Kunden-Instanzen: Statistiken für die Aufrufe der Teilprobleme	205
A.25	Anzahl der Entscheidungsvariablen für die Allokationsprobleme der 1000 Kunden Instanzen	206
B.1	Bezeichner der TSLRPTW-Ergebnistabellen	208
B.2	Bezeichner der TSLRPTW-Statistiktabellen	209
B.3	C1-Instanzen: TSCFLPTW-Modellkosten im Mittel	210
B.4	Ergebnisse der C1-Instanzen im Mittel	211
B.5	Ergebnisspanne der C1-Instanzen	212
B.6	Statistiken zur Rechenzeit der C1-Instanzen im Mittel	213
B.7	C1-Instanzen: Statistiken für die Aufrufe der Teilprobleme im Mittel	214
B.8	Anzahl der Entscheidungsvariablen für die Pfad-Allokationsprobleme der C1-Instanzen	215
B.9	R1-Instanzen: TSCFLPTW-Modellkosten im Mittel	216
B.10	Ergebnisse der R1-Instanzen im Mittel	217
B.11	Ergebnisspanne der R1-Instanzen	218
B.12	Statistiken zur Rechenzeit der R1-Instanzen im Mittel	219
B.13	R1-Instanzen: Statistiken für die Aufrufe der Teilprobleme im Mittel	220
B.14	Anzahl der Entscheidungsvariablen für die Pfad-Allokationsprobleme der R1-Instanzen	221
B.15	RC1-Instanzen: TSCFLPTW-Modellkosten im Mittel	222
B.16	Ergebnisse der RC1-Instanzen im Mittel	223

B.17 Ergebnisspanne der RC1-Instanzen	224
B.18 Statistiken zur Rechenzeit der RC1-Instanzen im Mittel	225
B.19 RC1-Instanzen: Statistiken für die Aufrufe der Teilprobleme im Mittel	226
B.20 Anzahl der Entscheidungsvariablen für die Pfad-Allokationsprobleme der RC1-Instanzen	227

Algorithmusverzeichnis

1	Tabu Search-Verfahren	62
2	Cheapest Fixcost Nearest Allocation SSCFLPTW	64
3	Open All Nearest Allocation SSCFLPTW	65
4	Cheapest Path Insertion TSCFLPTW	67
5	Generisches Standort-Austausch-Verfahren	68
6	Tabu-Search: Add, Drop und Shift-Heuristik TSCFLPTW	69
7	Preprocessing TSPTW	76
8	2-Opt-Verfahren	85
9	Or-Opt-Verfahren	86
10	Dynamische Programmierung	90
11	Savings-Heuristik	93
12	Time Oriented Nearest Neighbour-Heuristik VRPTW	94
13	I_1 -Heuristik	97
14	Bogenaustausch-Verfahren	99
15	Ein generisch-iteratives Lösungsverfahren für LRP	114
16	Tabu Search-Lösungsverfahren für das SSLRPTW	115
17	MDVRPTW	119
18	Standort-Diversifikation (SSLRPTW)	121
19	Implementierung einer neuen Lösung (SSLRPTW)	123
20	Tabu Search-Lösungsverfahren für das TSLRPTW	127
21	MDVRPTW mit vorangehender Transportstufe	133
22	Standort-Diversifikation (TSLRPTW)	135
23	Implementation einer neuen Lösung (TSLRPTW)	136

