
Netzwerk-Design für LKW-Komplett- ladungsverkehre unter Berücksichtigung ökonomischer und sozialer Aspekte

Sebastian Jäger

Netzwerk-Design für LKW- Komplettladungsverkehre unter Berücksichtigung ökonomischer und sozialer Aspekte

 Springer Gabler

Sebastian Jäger
Köln, Deutschland

Dissertation Universität Duisburg-Essen, 2016

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik der Universität Duisburg-Essen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Wirtschaftswissenschaften (Dr. rer. pol.) genehmigte Dissertation.

Gutachter: Univ.-Prof. Dr. rer. pol. Rainer Leisten, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Noche
Tag der mündlichen Prüfung: 25.07.2016

ISBN 978-3-658-16585-7 ISBN 978-3-658-16586-4 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-658-16586-4

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

Springer Gabler

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Gabler ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Vorwort

Die Idee zu der vorliegenden Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für ABWL und Operations Management der Universität Duisburg-Essen. Im Rahmen eines Forschungsprojekts zu Good Governance in Logistiknetzwerken habe ich mich seinerzeit am Aufbau eines Dialogs zwischen Logistikunternehmen am Duisburger Hafen und Wissenschaftspartnern beteiligt. Mehrfach wurde dabei im Verlauf von Gesprächen seitens der Unternehmen ein sich bereits abzeichnender Fahrermangel thematisiert. Damit war der Grundstein für eine weitere wissenschaftliche Auseinandersetzung mit der Thematik gelegt. Insofern danke ich allen Gesprächspartnern, die sich damals unvoreingenommen und offen zu einem fachlichen Austausch bereit erklärt haben.

Ein ganz besonderer Dank gilt an dieser Stelle meinem Doktorvater Herrn Univ.-Prof. Dr. Rainer Leisten, der sich in zahlreichen Terminen stets viel Zeit für mich genommen und damit die Entwicklung dieser Arbeit von Anfang an konstruktiv begleitet hat. Ebenso danke ich Herrn Univ.-Prof. Dr. Bernd Noche für die Übernahme des Zweitgutachtens. Großer Dank gilt auch meinen damaligen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl, insbesondere Herrn Dr. Marc-André Weber, der mir mit seinen Erfahrungen den Einstieg in die lineare Programmierung deutlich erleichtert hat und der darüber hinaus jederzeit für wissenschaftliche Diskussionen zu begeistern war. Außerdem bin ich Herrn Dr. Carl C. Berning für den bereichernden fächerübergreifenden wissenschaftlichen Diskurs sehr verbunden. Weiterhin danke ich meinem Vater Herrn Wilfried Jäger für die mehrfache Durchsicht des Manuskripts und die Beseitigung orthographischer Fehler. Zu guter Letzt fühle ich mich meinem persönlichen Umfeld und insbesondere meiner langjährigen Freundin Anna verpflichtet, die in der nicht immer ganz einfachen Zeit so viel Interesse, Verständnis und Unterstützung für mich aufgebracht haben.

Sebastian Jäger

Köln, im August 2016

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	XII
Tabellenverzeichnis.....	XVI
Abkürzungsverzeichnis	XIX
Symbolverzeichnis.....	XXI

1 Einleitung: Situation des Ladungsverkehrs 1

1.1 Marktstruktur	5
1.2 Arbeitsbedingungen	9
1.3 Nachwuchsproblematik.....	12
1.4 Ansatzpunkte und Fokus der vorliegenden Arbeit	16

2 Literaturüberblick: Neuere Ansätze der Transportplanung... 19

2.1 Simulationsbasierte Forschungsarbeiten.....	20
2.1.1 Netzwerktypen mit Nutzung von Relay-Stationen	21
2.1.1.1 Hub-and-Spoke-Netzwerke.....	22
2.1.1.2 Zone Dispatching	23
2.1.1.3 Delivery Pipelines.....	23
2.1.2 Netzwerktypen ohne Nutzung von Relay-Stationen	24
2.1.2.1 Key Lanes	24
2.1.2.2 Regional Fleets.....	25
2.1.3 Literaturüberblick.....	26
2.2 Quantitativ-methodische Forschungsarbeiten.....	36
2.3 Fazit	44

3	Ausgewählte Grundlagen: Touren- und Standortplanung	47
3.1	Tourenplanung.....	48
3.1.1	Vehicle Routing Problem	55
3.1.2	Vehicle Routing Problem mit Zeitfenstern	62
3.1.3	Vehicle Routing Problem mit Rücktransporten	65
3.1.4	Vehicle Routing Problem mit Abholungen und Auslieferungen	68
3.1.5	Vehicle Routing Problem mit Abholungen, Auslieferungen und Umladungen	74
3.1.6	Sonstige Varianten des Vehicle Routing Problems	78
3.2	Standortplanung.....	80
3.2.1	Location Routing Problem	82
3.2.2	Erweitertes Location Routing Problem	87
3.2.2.1	Mehrzieloptimierung	88
3.2.2.2	Abholungen und Auslieferungen.....	89
3.2.2.3	Umladungen.....	90
3.3	Fazit	91
4	Modell: Ein multikriterielles Location Routing Problem mit Abholungen, Auslieferungen, Umladungen und mehrfachem Fahrzeugeinsatz	93
4.1	Zielsetzung der Optimierung.....	94
4.2	Annahmen und Restriktionen	96
4.2.1	Netzwerk.....	96
4.2.2	Aufträge und Transportabwicklung.....	97
4.2.3	Fahrer und Lenkzeiten.....	98

4.2.4	Umladevorgänge und Aufbau von Relays	100
4.3	Abbildung als Formalmodell	100
4.3.1	Notation.....	101
4.3.1.1	Indizes.....	101
4.3.1.2	Mengen	101
4.3.1.3	Parameter.....	102
4.3.1.4	Entscheidungsvariablen	104
4.3.1.5	Abhängige Variablen	105
4.3.1.6	Weitere Symbole.....	105
4.3.2	Definition des zugrunde liegenden Netzwerks.....	105
4.3.3	Definition der Fahrzeuge und der Fahrzeiten	109
4.3.4	Zielfunktion.....	111
4.3.5	Restriktionen	111
4.3.5.1	Transportvorgänge im Allgemeinen.....	112
4.3.5.2	Zeitpunkte entlang der Touren, Wartezeiten, Lenkzeiten, Ruhezeiten und Durchlaufzeiten	113
4.3.5.3	Mehrfacher Fahrzeugeinsatz	119
4.3.5.4	Einrichtung von Relays	121
4.3.5.5	Lade- und Umladevorgänge	123
4.3.5.6	Bedingungen für eine beschleunigte Optimierung.....	127
4.4	Beispielhafte Anwendung.....	128
4.4.1	Datengrundlage.....	128
4.4.2	Auswertung: Minimierung der zurückgelegten Entfernung	132

4.4.3	Auswertung: Minimierung der auswärtigen Übernachtungen	136
4.4.4	Auswertung: Minimierung der Durchlaufzeit	142
4.4.5	Fazit	144
5	Lösungsverfahren: Problemdekomposition und heuristische Methoden	147
5.1	Hauptproblem: Standortplanung	150
5.2	Subproblem: Zuordnung von Fahrern/Fahrzeugen zu Standorten.....	153
5.3	Subproblem: Art der Abwicklung der Aufträge	156
5.4	Subproblem: Zuordnung von (Teil-) Aufträgen zu den Fahrern/Fahrzeugen	158
5.4.1	Vorgehensweise	159
5.4.2	Genetischer Algorithmus	165
5.4.2.1	Bestimmung der Chromosomenlänge und -struktur	168
5.4.2.2	Erzeugung und Bewertung der Initialpopulation	169
5.4.2.3	Erzeugung und Bewertung weiterer Generationen	171
5.5	Subproblem: Tourenplanung.....	175
5.5.1	Bestimmung der optimalen Touren	177
5.5.2	Heuristische Bestimmung von Touren	178
5.6	Fazit	184
6	Ergebnisse: Effiziente Lösungen	197
6.1	Generierung von Testinstanzen	198

6.2	Grundeinstellungen	201
6.3	Analyse der Testinstanzen.....	207
6.3.1	Effiziente Ränder.....	208
6.3.2	Statistische Untersuchung: Bedeutung der Anzahl an Relays für die Extremlösungen	210
6.3.3	Statistische Untersuchung: Zielkonflikt zwischen den Extremlösungen.....	213
6.3.4	Bedeutung von Zwischenlösungen.....	217
6.4	Fazit	219
7	Fazit: Zusammenfassung, Kritik und Ausblick.....	223
	Anhang.....	233
	Literaturverzeichnis	251

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Anteil der Entfernungsstufen an der Anzahl Fahrten und der beförderten Gütermenge im gewerblichen Fernverkehr.	8
Abbildung 2:	Hub-and-Spoke-Netzwerk.	22
Abbildung 3:	Zone Dispatching.	23
Abbildung 4:	Delivery Pipelines.	24
Abbildung 5:	Key Lanes.....	25
Abbildung 6:	Regional Fleets.	25
Abbildung 7:	Beispielhafte Tour für das Traveling Salesman Problem.	49
Abbildung 8:	Varianten der knotenorientierten Rundreisen.....	51
Abbildung 9:	Beispielhafte Tour mit Auslieferungen für das Traveling Salesman Problem.....	51
Abbildung 10:	Beispielhafte Lösung ohne Ausschluss von Kurzzyklen.....	55
Abbildung 11:	Beispielhafte Touren für das Vehicle Routing Problem.	56
Abbildung 12:	Beispiel für Touren des Vehicle Routing Problems mit Engpass Fahrzeugkapazität.....	60
Abbildung 13:	Beispiel für kürzere Touren durch Einsatz mehrerer Fahrzeuge im Vehicle Routing Problem.	61
Abbildung 14:	Beispielhafte Tour des Vehicle Routing Problems mit FTL-Abholungen und -Auslieferungen.	70
Abbildung 15:	Beispielhafte Tour für das Location Routing Problem.	84
Abbildung 16:	Abbildung des physischen Standorts eines Depots durch mehrere Knoten mit unterschiedlichen Funktionen.....	106
Abbildung 17:	Komponenten der ‚Zeitrechnung‘.....	114
Abbildung 18:	Aufrechnung der Lenk- und Pausenzeiten.	116

Abbildung 19:	Beispiel für den Zusammenhang zwischen Lenk- und Pausenzeit sowie Zeitpunkten der Tour.	117
Abbildung 20:	Menge der erzeugten Transportaufträge im Planquadrat mit einem Depot und drei potentiellen Standorten für Relays.	129
Abbildung 21:	Resultate der Entfernungsminimierung.	133
Abbildung 22:	Theoretische entfernungsminimale Lösung bei vernachlässigten Zeitrestriktionen für Fall 9 bei einem Depot.	134
Abbildung 23:	Entfernungsminimale Lösung für Fall 9 ohne Umladungen bei einem Depot unter Berücksichtigung der Zeitrestriktionen.	135
Abbildung 24:	Entfernungsminimale Lösung für Fall 9 mit Umladungen bei einem Depot unter Berücksichtigung der Zeitrestriktionen.	136
Abbildung 25:	Resultate der Minimierung auswärtiger Übernachtungen.	137
Abbildung 26:	Optimale Lösung für Fall 9 bei Minimierung auswärtiger Übernachtungen mit Umladungen und zwei Relays.	138
Abbildung 27:	Prozentuale Veränderung der auswärtigen Übernachtungen im Vergleich mit den Ergebnissen der ausschließlichen Entfernungsminimierung.	139
Abbildung 28:	Prozentuale Veränderung der zurückgelegten Entfernung im Vergleich mit den Ergebnissen der ausschließlichen Entfernungsminimierung.	140
Abbildung 29:	Durchschnittliche Anzahl Touren und deren Standardabweichung über alle Fälle je Kombination von Zielfunktion, Umladungen und Anzahl Depots bzw. Relays.	141
Abbildung 30:	Durchschnittlich zurückgelegte Strecken und Standardabweichung der Touren über alle Fälle je Kombination von Zielfunktion, Umladungen und Anzahl Depots bzw. Relays.	141

Abbildung 31:	Prozentuale Veränderung der Durchlaufzeiten im Vergleich mit den Ergebnissen der ausschließlichen Entfernungsm minimierung.	142
Abbildung 32:	Resultate der Durchlaufzeitminimierung.	144
Abbildung 33:	Dekomposition der Entscheidungsprobleme des vorgestellten Modells.	147
Abbildung 34:	Vorgeschlagenes iteratives Lösungsverfahren für das vorgestellte Modell.	149
Abbildung 35:	Flussdiagramm des Lösungsverfahrens der Standortplanung durch eine Greedy-Heuristik.	152
Abbildung 36:	Flussdiagramm der zu lösenden Subprobleme mit besonderer Hervorhebung des iterativen Verfahrens zur Zuordnung von Fahrern bzw. Fahrzeugen zu den Standorten.	155
Abbildung 37:	Flussdiagramm der zu lösenden Subprobleme mit besonderer Hervorhebung des genetischen Algorithmus zur Bestimmung einer geeigneten Auftragsallokation im Zusammenspiel mit der Tourenplanung.	164
Abbildung 38:	Zu durchlaufender Prozess des genetischen Algorithmus.	167
Abbildung 39:	Auswahlwahrscheinlichkeit der Chromosomen in Abhängigkeit von ihrer Fitness anhand der Roulette-Selektion.	173
Abbildung 40:	Beispielhaftes Four-Point-Crossover.	174
Abbildung 41:	Beispielhaftes One-Point-Crossover mit Mutation.	175
Abbildung 42:	Algorithmus zur Bestimmung der zu fahrenden Touren aller Fahrzeuge.	179
Abbildung 43:	Vereinfachter Pseudocode der Einfügeheuristik für Transporte zu Relays auf der ersten Planungsstufe.	181
Abbildung 44:	Vereinfachter Pseudocode der Nächste-Nachbar-Heuristik für die erste Stufe.	182
Abbildung 45:	Vorgeschlagenes iteratives Lösungsverfahren inkl. Lösungsansätzen für die jeweiligen Subprobleme.	185

Abbildung 46:	Optimalitätslücke bei isolierter Entfernungsminimierung anhand von Heuristik 1.	191
Abbildung 47:	Optimalitätslücke bei isolierter Entfernungsminimierung anhand von Heuristik 2.	192
Abbildung 48:	Optimalitätslücke bei isolierter Minimierung der anfallenden auswärtigen Übernachtungen anhand von Heuristik 1.....	193
Abbildung 49:	Optimalitätslücke bei isolierter Minimierung der anfallenden auswärtigen Übernachtungen anhand von Heuristik 2.....	193
Abbildung 50:	Optimalitätslücke bei isolierter Minimierung der Durchlaufzeiten anhand von Heuristik 1.....	194
Abbildung 51:	Optimalitätslücke bei isolierter Minimierung der Durchlaufzeiten anhand von Heuristik 2.....	195
Abbildung 52:	Platzierungen des Unternehmenssitzes und potentieller Relays in der Zielregion.	200
Abbildung 53:	Exemplarische Punktwolke aus Lösungen mit effizienten Rändern für ein und zwei Relays.	209
Abbildung 54:	Grafische Darstellung einer Lösung in AIMMS.....	234
Abbildung 55:	Eingabemöglichkeit der Optimierungsparameter in Microsoft Excel 2007.	235
Abbildung 56:	Beispielhafter Überblick über den mit Visual Basic for Applications (VBA) umgesetzten Programmcode des Lösungsverfahrens.	235
Abbildung 57:	Erreichbare Lösungen Fall 1.....	239
Abbildung 58:	Erreichbare Lösungen Fall 2.....	240
Abbildung 59:	Erreichbare Lösungen Fall 3.....	241
Abbildung 60:	Erreichbare Lösungen Fall 4.....	242
Abbildung 61:	Erreichbare Lösungen Fall 5.....	243
Abbildung 62:	Erreichbare Lösungen Fall 6.....	244
Abbildung 63:	Erreichbare Lösungen Fall 7.....	245
Abbildung 64:	Erreichbare Lösungen Fall 8.....	246
Abbildung 65:	Erreichbare Lösungen Fall 9.....	247
Abbildung 66:	Erreichbare Lösungen Fall 10.....	248

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht über bisherige simulationsbasierte Publikationen zu Relay-Netzwerken.....	28
Tabelle 2:	Übersicht über bisherige quantitativ-methodische Publikationen zu Relay-Netzwerken.....	39
Tabelle 3:	Beispielhafte Binärmatrix zur Zuordnung von jeweils drei (möglichen) Touren zu zwei Fahrzeugen.....	120
Tabelle 4:	Festgelegte Parameter für alle Fälle.	130
Tabelle 5:	Parametervariationen für alle Fälle.	131
Tabelle 6:	Durchschnittliche Berechnungszeiten der Instanzen bei drei Aufträgen.	132
Tabelle 7:	Beispielhafte Auftragsallokation zu drei Fahrzeugen als Basis für die spätere Darstellung der Chromosomen.	161
Tabelle 8:	Beispielhafte Auswahl eines Chromosoms durch die Roulette-Selektion.....	172
Tabelle 9:	Festgelegte Parameter für das heuristische Lösungsverfahren.	188
Tabelle 10:	Festgelegte Parameter für den genetischen Algorithmus.	189
Tabelle 11:	Gegenüberstellung der durchschnittlichen Berechnungszeiten je Fall (in Sekunden) und Zielfunktion bei erlaubten Umladungen.....	190
Tabelle 12:	Datengrundlage aller Testinstanzen in Kapitel 6.....	201
Tabelle 13:	Erprobte Gewichte der Zielfunktion je Fall.....	203
Tabelle 14:	„Extern“ vorgegebene Parameter.	205
Tabelle 15:	Konfiguration für den genetischen Algorithmus.....	205
Tabelle 16:	Parameter für das heuristische Lösungsverfahren.....	207
Tabelle 17:	Vergleich der durchschnittlich zurückgelegten Entfernungen (km) und Übernachtungen (π) der	

	jeweiligen Extrem Lösungen in Abhängigkeit von der Anzahl an eröffneten Relays.	211
Tabelle 18:	Teststatistik über die Veränderung der beobachteten Werte bei zusätzlichen Relays für die Extrem Lösungen der Entfernungsminimierung.	212
Tabelle 19:	Teststatistik über die Veränderung der beobachteten Werte bei zusätzlichen Relays für die Extrem Lösungen der Minimierung auswärtiger Übernachtungen.	213
Tabelle 20:	Vergleich der durchschnittlich erzielten Werte (Entfernung, Übernachtungen, Durchlaufzeit) der Extrem Lösungen je Relay.	214
Tabelle 21:	Teststatistik über die Differenz von Entfernungen, Übernachtungen und Durchlaufzeiten zwischen den Extrem Lösungen der Entfernungsminimierung und der Minimierung auswärtiger Übernachtungen für ein Relay.	216
Tabelle 22:	Teststatistik über die Differenz von Entfernungen, Übernachtungen und Durchlaufzeiten zwischen den Extrem Lösungen der Entfernungsminimierung und der Minimierung auswärtiger Übernachtungen für zwei Relays.	216
Tabelle 23:	Teststatistik über die Differenz von Entfernungen, Übernachtungen und Durchlaufzeiten zwischen den Extrem Lösungen der Entfernungsminimierung und der Minimierung auswärtiger Übernachtungen für drei Relays.	217
Tabelle 24:	Vergleich der Differenzen zwischen gemischten Lösungen (ohne Umwege) mit ein oder zwei Relays und der Extrem Lösung der Entfernungsminimierung mit einem Standort.	218
Tabelle 25:	Vergleich der Differenzen zwischen gemischten Lösungen (max. 5 % Umwege) mit ein oder zwei	

	Relays und der Extremlösung der Entfernungsminimierung mit einem Standort.	219
Tabelle 26:	Erzeugte Koordinaten der Aufträge.	234
Tabelle 27:	Überblick über Koordinaten der Relay-Standorte.	238
Tabelle 28:	Auftragsdaten Fall 1.	239
Tabelle 29:	Auftragsdaten Fall 2.	240
Tabelle 30:	Auftragsdaten Fall 3.	241
Tabelle 31:	Auftragsdaten Fall 4.	242
Tabelle 32:	Auftragsdaten Fall 5.	243
Tabelle 33:	Auftragsdaten Fall 6.	244
Tabelle 34:	Auftragsdaten Fall 7.	245
Tabelle 35:	Auftragsdaten Fall 8.	246
Tabelle 36:	Auftragsdaten Fall 9.	247
Tabelle 37:	Auftragsdaten Fall 10.	248
Tabelle 38:	Test auf Normalverteilung der Differenzen von Entfernung und Übernachtungen zwischen einem und zwei bzw. zwei und drei Relays bei Entfernungsminimierung.	249
Tabelle 39:	Test auf Normalverteilung der Differenzen von Entfernung und Übernachtungen zwischen einem und zwei bzw. zwei und drei Relays bei Minimierung auswärtiger Übernachtungen.	249
Tabelle 40:	Test auf Normalverteilung der Differenzen zwischen den Extremlösungen mit minimaler Anzahl Übernachtungen bzw. mit minimalen Entfernungen.	250

Abkürzungsverzeichnis

BPP	Bin Packing Problem
CVRP	Capacitated Vehicle Routing Problem
DARP	Dial-a-ride-Problem
DLZ	Durchlaufzeit
FTL	Full Truckload, Komplettladungsverkehr
LRP	Location Routing Problem
LRPSDP	Location Routing Problem with Simultaneous Deliveries and Pickups
LTL	Less than Truckload, Stückgutverkehr, Teilladungsverkehr
MMLRP	Many-to-many Location Routing Problem
NP	Nicht-Polynomial
PDP	Pickup and Delivery Problem
PDPT	Pickup and Delivery Problem with Transshipments
PDPTW	Pickup and Delivery Problem with Time Windows
PDVRP	Pickup and Delivery Vehicle Routing Problem
PtP	Point-to-point, Direktverkehre bzw. nicht über das Netzwerk abgewickelte Verkehre
RVRP	Rich Vehicle Routing Problem
tkm	Tonnenkilometer
TSP	Traveling Salesman Problem
VRP	Vehicle Routing Problem
VRPB	Vehicle Routing Problem with Backhauls
VRPBM	Vehicle Routing Problem with Backhauls and Mixed Loads
VRPMS	Vehicle Routing Problem with Multiple Synchronization Constraints

VRPSDP	Vehicle Routing Problem with Simultaneous Deliveries and Pickups
VRPTW	Vehicle Routing Problem with Time Windows
VRPPD	Vehicle Routing Problem with Pickups and Deliveries

Symbolverzeichnis

Indizes

c, s, z Indizes eines Knotens/Standorts
 $n, \tilde{n}, \hat{n}, \bar{n}$ Obergrenze der Anzahl Knoten einer Menge

f, f' Indizes eines Fahrzeugs
 $|F|$ Obergrenze der Anzahl Fahrzeuge

i, j Indizes eines Chromosoms bzw. eines Falls
 $popsize$ Obergrenze der Anzahl Chromosomen einer Population

Job Index eines Auftrags

$t, t', BestTour$ Indizes einer Tour
 $|T|$ Obergrenze der Anzahl Touren

Mengen

$AvailableRelays$ Menge der für einen Auftrag noch verfügbaren Relays auf einer Tour

D (Teil-) Knotenmenge der Standorte für Auslieferungen (Deliveries)

Dep (Teil-) Knotenmenge der (potentiellen) Depots

Dep^- (Teil-) Knotenmenge der (potentiellen) Depots für einkehrende Fahrzeuge

Dep^+ (Teil-) Knotenmenge der (potentiellen) Depots für ausfahrende Fahrzeuge

$ElementsInTour$ Menge der einer Tour zugeordneten (Abhol-) Aufträge

E	Kantenmenge bzw. Pfeilmenge
F	Menge aller Fahrzeuge
P	(Teil-) Knotenmenge der Standorte für Abholungen (Pickups)
$PickupsToRelay$	Menge der Aufträge, die nach Abholung zunächst zum Relay befördert werden
Pop	Aktuelle Population, Menge aller Chromosomen
Q	(Teil-) Knotenmenge für Subtour-Bedingungen
R	(Teil-) Knotenmenge der Standorte für Umladungen (Relay)
R^-	(Teil-) Knotenmenge für den Vorgang der Entladung bei Umladungen
R^+	(Teil-) Knotenmenge für den Vorgang der Beladung bei Umladungen
R_{copy}^-	(Teil-) Knotenmenge für den Vorgang der Entladung bei Umladungen
R_{copy}^+	(Teil-) Knotenmenge für den Vorgang der Beladung bei Umladungen
$RemainingNodes$	Menge der noch anzufahrenden Standorte auf einer Tour
S	Suchraum, Menge aller zulässigen Chromosomen
T	Menge aller Touren
V	(Gesamt-) Knotenmenge des Graphen

Parameter

a	frühester Zeitpunkt des Beobachtungszeitraums
a_s	frühester zulässiger Zeitpunkt für Anfahrt des Knotens s
α	Gewichtungsfaktor für auswärtige Übernachtungen in der Zielfunktion
b	spätester Zeitpunkt des Beobachtungszeitraums

b_s	spätester zulässiger Zeitpunkt für Anfahrt des Knotens s
β	Gewichtungsfaktor für zurückgelegte Entfernungen in der Zielfunktion
γ	Gewichtungsfaktor für benötigte Durchlaufzeit in der Zielfunktion
$const$	Konstante
d_s	Nachfragemenge des Standorts s nach einer Auslieferung
del_{sf}	Binärmatrix zur Zuordnung von Fahrzeugen zum Transportsegment ‚Auslieferung‘ eines Auftrags s im Rahmen der Lösungsheuristik
dis_{sz}	Entfernung zwischen den Knoten s und z
κ_{cz}	Binärmatrix zur Zuordnung des Originalknotens eines Relays c zu dessen Kopien z
λ_{max}	maximal zulässige (gesetzliche) Tageslenkzeit eines Fahrers, bevor eine Pause eingelegt werden muss
$\bar{\lambda}$	obere Schranke für die ununterbrochene Lenkzeit, die in Bedingung (4.13) definiert wird, um in Bedingung (4.14) als hinreichend große Zahl eingesetzt zu werden
M	hinreichend große Zahl
p	abzuholende (einheitliche) Transportmenge je Standort
p_s	abzuholende Transportmenge des Standorts s
$penalty$	Strafterm
pu_{sf}	Binärmatrix zur Zuordnung von Fahrzeugen f zum Transportsegment ‚Abholung‘ eines Auftrags s im Rahmen der Lösungsheuristik
Π	vorgeschriebene Dauer der Tagesruhezeit eines Fahrers
q	Kapazität eines Fahrzeugs

r_{max}	Maximale Anzahl geöffneter Relays
\bar{r}_s	Parametrisierte Entscheidungsvariable r_s zur Festlegung von geöffneten Standorten s im Rahmen der Lösungsheuristik
rt_{sf}	Binärmatrix zur Zuordnung von Fahrzeugen f zum Transportsegment ‚Relay-Transport‘ eines Auftrags s im Rahmen der Lösungsheuristik
ρ_{ft}	Binärmatrix zur Zuordnung von mehrfachen Fahrzeugeinsätzen (Touren) t im betrachteten Untersuchungszeitraum zu dem entsprechenden Fahrzeug f
Spd	Geschwindigkeit der Fahrzeuge, z. B. km/h
ϑ_{sz}	Fahrzeit zwischen den Knoten s und z
$\vartheta_{sz}^{service}$	benötigte Zeit für Ladevorgänge am Knoten s bei anschließender Weiterfahrt nach z
τ	maximale Anzahl möglicher Touren je Fahrzeug bzw. einzuplanender Schichten im betrachteten Zeitraum
\bar{u}_z^s	Binärparameter für die Zulässigkeit der Umladung eines Auftrags s an einem Relay z im Rahmen der Lösungsheuristik
\bar{w}	obere Schranke für die Wartezeit an einem Standort
ω	Faktor für die anteilige Anrechnung von Warte- und Servicezeiten (für Ladevorgänge) auf die Lenkzeiten von Fahrern
x_{coord}_s	x-Koordinate des Knotens s
y_{coord}_s	y-Koordinate des Knotens s
φ_{sf}	Binärmatrix zur Zuordnung von Fahrern bzw. Fahrzeugen f zu Relays s im Rahmen der Lösungsheuristik
ψ	generelle Zulässigkeit von Umladungen an Relays

Entscheidungsvariablen

λ_{st}	$\in \mathbb{R}_0^+$	zunächst abhängige Variable, die die errechnete, ununterbrochene Lenkzeit eines Fahrers der Tour t am Knoten s angibt, jedoch im Rahmen der Optimierung auch autonom höher gesetzt werden kann, um eine vorzeitige Ruhepause zu erzwingen
r_s	$\in \{0,1\}$	Entscheidung, ob am Standort s ein Relay eröffnet wird
θ_{st}	$\in \mathbb{R}_0^+$	zunächst abhängige Variable, die den Zeitpunkt der Anfahrt des Knotens s durch Tour t anhand des Zeitpunkts der Ankunft bzw. Abfahrt am vorherigen Knoten und der deterministischen Fahrzeit dazwischen angibt. Im Rahmen der Initialisierung kann jedoch jeweils für den ersten Knoten einer Tour (entspricht dem Depot) der Zeitpunkt der Abfahrt frei gesetzt werden (Startbedingung)
u_{zf}^s	$\in \{0,1\}$	Entscheidung, ob der Auftrag mit dem Abholknoten s am Standort z auf dem Fahrzeug f geladen ist
\tilde{u}_{zt}^s	$\in \{0,1\}$	Entscheidung, ob der Auftrag mit dem Abholknoten s am Relay z auf der Tour t geladen ist
w_{zf}	$\in \mathbb{R}_0^+$	Entscheidung, ob bzw. wie lange vor dem Anfahren des Knotens z mit dem Fahrzeug f gewartet werden soll
w_{zt}	$\in \mathbb{R}_0^+$	Entscheidung, ob bzw. wie lange vor dem Anfahren des Knotens z auf der Tour t gewartet werden soll
x_{sz}	$\in \{0,1\}$	Entscheidung, ob die Strecke zwischen s und z Teil der Tour ist
x_{szf}	$\in \{0,1\}$	Entscheidung, ob die Strecke zwischen s und z Teil der Tour von Fahrzeug f ist

x_{szt}	$\in \{0,1\}$	Entscheidung, ob die Strecke zwischen s und z Teil der Tour t ist
y_{sf}	$\in \{0,1\}$	Entscheidung, ob Knoten s auf der Tour von Fahrzeug f angefahren wird

Abhängige Variablen

DLZ_s	$\in \mathbb{R}_0^+$	Durchlaufzeit des Auftrags vom Abholungsknoten s bis zu dessen Auslieferung
km_t	$\in \mathbb{R}_0^+$	zurückgelegte Entfernung auf einer Tour t
l_s	$\in \mathbb{R}_0^+$	Zuladung des Fahrzeugs nach Verlassen des Knotens s
l'_f	$\in \mathbb{R}_0^+$	Zuladung des Fahrzeugs f nach Verlassen des Depots
π_{st}	$\in \mathbb{N}_0$	Anzahl der auf der Tour t am Knoten s einzulegenden Übernachtungen aufgrund der bis dahin überschrittenen Tageslenkzeit
θ_s	$\in \mathbb{R}_0^+$	Zeitpunkt der Anfahrt des Knotens s
θ_{sf}	$\in \mathbb{R}_0^+$	Zeitpunkt der Anfahrt des Knotens s durch Fahrzeug f
ZF	$\in \mathbb{R}$	Zielfunktionswert

Variablen der Lösungsheuristik

chr	$\in \mathbb{N}$	Chromosom, Zeichenkette
$fit(chr)$	$\in \mathbb{R}_0^+$	Fitnesswert eines Chromosoms
$Pr(chr)$	$\in [0,1]$	Auswahlwahrscheinlichkeit eines Chromosoms
$rand$	$\in [0,1]$	Zufallszahl
$ZF(chr)$	$\in \mathbb{R}_0^+$	Zielfunktionswert eines Chromosoms

Weitere Symbole für allgemeine Darstellungen und Klassifikationen

$G = (V, E)$	Graph mit Knotenmenge V und Kanten- bzw. Pfeilmenge E
μ	Erwartungswert einer Zufallsvariable
ν	Erwartungswert einer Zufallsvariable