# Transportplanung in Sammelladungsnetzwerken: Flexibilisierung und Automatisierung der Disposition

**Vom Fachbereich Wirtschaftswissenschaften**

**der Universität Kassel**

**zur Erlangung des akademischen Grades**

**Doktor der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften**

**genehmigte Dissertation**

**von**

**Dipl.-Ök. Marcus Gerasch**

**geboren am 06.10.1977 in Hannover**

**2010**

| | |
|---|---|
| **1. Gutachter:** | **Prof. Dr. R. Vahrenkamp** |
| **2. Gutachter:** | **Prof. Dr.-Ing. L. Schulze** |
| **Tag und Ort der Disputation:** | **11.11.2009 in Kassel** |

Materialfluss- und Logistiksysteme

Band 6

**Marcus Gerasch**

# Transportplanung in Sammelladungsnetzwerken: Flexibilisierung und Automatisierung der Disposition

D 34 (Diss. Univ. Kassel)

Shaker Verlag
Aachen 2010

**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.: Kassel, Univ., Diss., 2009

Dissertation an der Universität Kassel
Fachbereich Wirtschaftswissenschaften
Verfasser: Marcus Gerasch
Datum der Disputation: 11.11.2009

Copyright Shaker Verlag 2010
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-8924-9
ISSN 1438-4922

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 des Herausgebers

Spediteure und Logistikunternehmen forcieren den Aufbau von Transportnetzwerken mit Depots und Hubs, um Sendungen auf festen Routen zu sammeln und zu verteilen. Mit den Koordinaten der Versender und Empfänger wird die Transportkette bestimmt. Die bisherige Vorgehensweise ist dadurch gekennzeichnet, dass von einer festen Zuordnung von Versendern und Empfängern zu den einzelnen Depots ausgegangen wird. Die Folge ist, dass vorhandene Potentiale nicht ausgeschöpft werden.

Ansatzpunkt zur Verbesserung dieser Situation ist die Aufhebung von festen Zuordnungen. Ziel ist es, limitierte Ressourcen effizient einzusetzen und die dispositive Planung zu verbessern. Dazu wird eine Funktion formuliert, die die variablen und fixen Kosten der genutzten Kanten sowie die Handlingkosten der in Anspruch genommenen Knoten beinhaltet. Es wird ein Modell zur Planung von Systemverkehren entwickelt. Grundlage ist ein großer Auftragspool, dessen Sendungen in einem vollständig definierten Netzwerk von Versendern zu Empfängern geführt werden sollen.

Das entwickelte Modell basiert auf einem heuristischen Ansatz. Es umfasst unter anderem das Sortieren der Sendungsaufträge, die temporäre Anbindung von Empfängern und Versendern an das Transportnetzwerk sowie die Kürzeste-Wege-Suche. Abschließend wird das entwickelte Modell in ein rechnergestütztes Tool umgesetzt. Exemplarisch wird die Funktionalität des Modells bzw. des Tools nachgewiesen.

Der Verfasser hat mit der vorliegenden Arbeit neue wissenschaftliche Erkenntnisse gewonnen und innovative Möglichkeiten der Transportplanung in Sammelladungsnetzwerken aufgezeigt. Er hat als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Planung und Steuerung von Lager- und Transportsystemen (PSLT) der Leibniz Universität Hannover erfolgreich Forschungs- und Entwicklungsprojekte beantragt und bearbeitet. In zahlreichen Industrieprojekten hat er sich umfassendes Wissen in Logistik und Materialfluss erworben. Die vorliegende Dissertation ist das Ergebnis seiner wissenschaftlichen und praxisbezogenen Arbeit.

Hannover, im Dezember 2009

Lothar Schulze

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Zeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Planung und Steuerung von Lager- und Transportsystemen der Leibniz Universität Hannover entstanden. Das der vorliegenden Arbeit zu Grunde liegende Modell zur Tranpsortplanung in Sammelladungsnetzwerken wurde im Rahmen eines Forschungsprojektes entwickelt. Das Projekt „Ganzheitliche Distribution von Strecken- und Flächenverkehren durch kombinierten Einsatz modifizierter Operation Research-Verfahren“, kurz DiSFOR, wurde mit Mitteln aus dem Haushalt des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWI) über die Arbeitsgemeischaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF) im Auftrag der Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V. durchgeführt.

Herrn Professor Dr.-Ing. L. Schulze, Leiter des Fachgebietes, danke ich an dieser Stelle für die gute Zusammenarbeit und die wertvollen Anregungen während meiner Zeit am PSLT. Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. R. Vahrenkamp, Leiter des Fachgebietes Produktionswirtschaft und Logistik am Fachbereich WIrtschaftswissenschaften der Universität Kassel, für die Übernahme des Erstgutachtens und des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Für die produktive Zusammenarbeit und das gute Arbeitsklima bedanke ich mich bei meinen ehemaligen Kollegen. In besonderer Weise danke ich Herrn Dipl.-Oec. Dag Tegtmeyer für die langjährige wertvolle Unterstützung und die zahlreichen konstruktiven Diskussionen.

Neben meiner Familie möchte ich mich an dieser Stelle auch bei meinen guten Freunden bedanken. Während der Bearbeitung dieser Arbeit ist ihr Rückhalt eine wichtige Unterstützung gewesen.

Gütersloh, im Januar 2010

Marcus Gerasch

## Kurzfassung

Auch in heutigen Sammelladungsspeditionen ist die Disposition der Sendungen eine manuell durchgeführte Tätigkeit. In der Regel sind bestimmte Postleitzahlgebiete ausgewählten Gebietsspediteuren fest zugeordnet. Die Zuordnung von Sendungen zu Streckenverkehren wird anhand persönlicher Erfahrungen der Disponenten und momentan freier eigener Kapazitäten durchgeführt. Eine durchgängige Entscheidungsunterstützung durch EDV findet praktisch nicht statt. Daher ist auch die Auswahl möglicher Transportketten eingeschränkt: Ein Ausweichen auf Alternativen, die möglicherweise günstiger sind oder bei Engpässen als Ersatz genutzt werden können, ist nur schwer möglich und daher unüblich. In der derzeitigen betrieblichen Praxis sind kaum Einsparpotenziale zu heben, die über die normalen Netzwerkeffekte hinausgehen.

In der vorliegenden Arbeit wird ein Verfahren entwickelt, mit dem ein Auftragspool von Sendungen multikriteriell durch ein bestehendes Netzwerk geroutet werden kann. Hierbei wird anhand von Sendungsparametern, wie Größe und Gewicht, eine Verteilung auf bspw. Linienverkehre und Fremdkapazitäten vorgenommen. Im Netz und bei den Sendungen werden darüber hinaus Zeitfenster berücksichtigt. Nach der Modellentwicklung wird die Umsetzung des Modells in eine Software beschrieben. Die anschließende Validierung umfasst zum einen die Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse und zum anderen eine Bewertung der eingesetzten Heuristik.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Modell ist in der Lage, eine automatische Disposition in Sammelladungsnetzen durchzuführen. Dabei liegen die Vorteile gegenüber einer manuellen Disposition vor allem in der Anzahl überprüfter Transportketten sowie der sehr hohen Bearbeitungsgeschwindigkeit. Dennoch kann eine derartige Automatisierung nur im Rahmen eines Entscheidungsunterstützungssystems für die Disponenten oder zur Netzwerkanalyse sinnvoll eingesetzt werden.

## Schlagworte

- Sammelladung
- Transportplanung
- Transportkette

## Abstract

Even nowadays the transport planning in groupage freight forwarding companies is a task which is mostly done manually. Typically areas, which are defined by postcodes, are assigned to a certain forwarding company. The allocation from shipments to relations is done by personal experience of the dispatchers considering free capacities. Because there is no integrated computer aided decision support, the choice of alternative transport chains is highly limited. Therefore it is not routine to use alternative transport chains, which may be cheaper or can be used in the case of a bottleneck as a bypass. In the current situation it is nearly impossible to raise efficiency beyond the general network effects.

In this thesis a method is developed, which allows routing a pool of shipments through an existing network on multiple criteria. By considering shipment parameters like size and weight a good allocation to existing line hauls and external capacities from foreign forwarders is realised. The windows of the network and the shipments are also considered. After the development of the model the implementation into software is described. The following model validation includes on the one hand a plausibility check of the results and on the other hand the appraisal of the implemented heuristic.

With the model developed in this thesis it is possible to do an automatic transport planning in groupage freight networks. The big advantages in comparison to a manual planning are the high number of calculated transport chains and the short processing time. Nevertheless it is only reasonable to use such an automation within a decision support system controlled by the dispatcher or for the case of network analysis.

## Keywords

- Groupage freight
- Transport planning
- Transport chain

# Inhaltsverzeichnis

Seite

1 Einleitung ..... 1

2 Ausgangssituation, Stand der Technik und Aufgabenstellung ..... 3
2.1 Entwicklungen des Stückgutverkehrsmarktes ..... 3
2.2 Abgrenzung des Betrachtungsbereiches ..... 7
2.3 Forschungsdefizit ..... 8
2.4 Ziel der Arbeit ..... 9
2.5 Vorgehensweise ..... 10

3 Verkehrslogistik für Stückgüter ..... 12
3.1 Abgrenzung der Transportsysteme ..... 12
3.1.1 Ganzladung ..... 12
3.1.2 Teilladung ..... 14
3.1.3 Sammelladung ..... 15
3.2 Betriebliche Praxis des Sammelladungsverkehrs ..... 19
3.2.1 Planungsaufgaben ..... 20
3.2.2 Transportdurchführung ..... 22
3.2.3 Systembedingte Optimierungspotenziale ..... 24

4 Netze in der Verkehrslogistik ..... 27
4.1 Begriffsdefinitionen ..... 27
4.2 Netzwerktypen ..... 28
4.3 Effekte von H&S-Strukturen ..... 30
4.4 Transportnetze in der Praxis ..... 31
4.4.1 KEP-Dienste ..... 32
4.4.2 Systemverkehre für Sammelladungen ..... 32
4.4.3 Seecontainerverkehr und Luftfracht ..... 33
4.5 Formale Abbildung von Transportnetzen ..... 35

5 Ansätze zur Transportplanung ..... 37
5.1 Bedeutung des OR für die Transportplanung ..... 37

5.2 Systematisierung der Planungsprobleme ..... 38
5.2.1 Strategische Planung ..... 39
5.2.2 Taktische Planung ..... 41
5.2.3 Operative Planung ..... 42
5.2.4 Real-Time Planung ..... 45
5.3 Darstellung ausgewählter Transportprobleme ..... 46
5.3.1 Service-Network-Design-Problem ..... 46
5.3.1.1 Problembeschreibung ..... 46
5.3.1.2 Service-Network-Design Formulierungen ..... 47
5.3.1.3 Dynamische Erweiterungen ..... 50
5.3.2 Shortest-Path-Problem ..... 51
5.3.2.1 Label-Setting-Verfahren ..... 52
5.3.2.2 Label-Correcting-Verfahren ..... 55
5.3.2.3 Multikriterielle Verfahren ..... 57

6 Modellkonzeption zur ganzheitlichen Transportplanung ..... 62
6.1 Anforderungen an das Planungsmodell ..... 62
6.1.1 Kostenorientierung ..... 63
6.1.2 Kapazitätsrestriktionen ..... 67
6.1.3 Zeitrestriktionen ..... 69
6.1.4 Depotumschlag ..... 70
6.1.5 Sendungsorientierung ..... 71
6.2 Modellansatz ..... 72
6.2.1 Formale Modellformulierung ..... 72
6.2.2 Ansatz und Ablauf der heuristischen Vorgehensweise ..... 76
6.3 Beschreibung der Modelleingangsdaten ..... 80
6.3.1 Knoten ..... 81
6.3.1.1 Primäre Knoten ..... 81
6.3.1.2 Sekundäre Knoten ..... 84
6.3.2 Kanten ..... 85
6.3.3 Konditionen ..... 87
6.3.4 Transportaufträge ..... 88
6.4 Gestaltung der Berechnungsschritte ..... 89
6.4.1 Auftragssortierung ..... 89
6.4.2 Bestimmung von Entfernungen ..... 90

6.4.3 Auswahl von Subnetzen ....93
6.4.4 Definition der Kantengewichte ....96
6.4.5 Verortung ....100
6.4.6 Kürzeste-Wege-Suche ....104
6.5 Teilterminierung von Kanten ....108
6.5.1 Motivation ....108
6.5.2 Entwickelter Ansatz ....111

7 EDV-basierte Umsetzung ....120
7.1 Implementierung in ein Datenbankmanagementsystem ....120
7.2 Erleichterung der Datenpflege ....121
7.2.1 Verwalten der Knoten ....123
7.2.2 Verwalten der Transportrelationen ....124
7.2.3 Verwalten der Sendungen ....126
7.3 Ergebnisdarstellung ....127
7.3.1 Ergebnistabellen ....128
7.3.2 Visualisierung ....131
7.3.3 Ergebniskennzahlen ....133
7.4 Einbindung von MapPoint ....133
7.4.1 Datenpflege ....133
7.4.2 Visualisierung ....135
7.5 Software-Validierung ....136
7.5.1 Plausibilitätsprüfung ....136
7.5.2 Laufzeit ....141
7.5.3 Bewertung der Sortierungsheuristik ....142
7.5.3.1 Gestaltung einer übergeordneten Metaheuristik ....143
7.5.3.2 Versuche mit einem unterminierten Netzwerk ....146
7.5.3.3 Versuche mit einem terminierten Netzwerk ....149
7.5.3.4 Schlussfolgerungen ....151

8 Praktische Anwendbarkeit und weiterer Forschungsbedarf ....155
8.1 Notwendige Rahmenbedingungen ....155
8.1.1 Informationsverfügbarkeit ....155
8.1.2 Informationssicherheit ....156

8.2 Einsatzgebiete ..... 157
8.3 Nutzung als Entscheidungsunterstützungssystem ..... 160
8.4 Weiterer Forschungsbedarf ..... 162

9 Zusammenfassung ..... 166

10 Schrifttum ..... 168

## Abkürzungsverzeichnis

| | |
|---|---|
| CVRP | Capacitated-Vehicle-Routing-Problem |
| DNSD | Dynamic-Service-Network-Design |
| EDI | Electronic Data Interchange |
| EDIFACT | Electronic Data Interchange for Administration, Commerce and Transport |
| ERP | Enterprise Resource Planning |
| FAB | Früheste Abfahrt |
| FAN | Früheste Ankunft |
| FSND | Frequency-Service-Network-Design |
| GFT | Güterfernverkehrstarif |
| H&S | Hub and Spoke |
| JIT | Just-in-time |
| KEP-Dienste | Kurier-, Express- und Paketdienste |
| LE | Ladeeinheit |
| LHM | Ladehilfsmittel |
| LTL | Less-Than-Truckload |
| OR | Operations Research |
| SAB | Späteste Abfahrt |
| SAN | Späteste Ankunft |
| SNDP | Service-Network-Design-Problem |
| SPP | Shortest-Path-Problem |
| SPPTW | Shortest-Path-Problem with Time Windows |
| VRP | Vehicle-Routing-Problem |
| VRPTW | Vehicle-Routing-Problem with Time Windows |
| TE | Transporteinheit |
| TEU | Twenty Foot Equivalent Unit |
| tkm | Tonnenkilometer |
| TSP | Travelling-Salesman-Problem |

## Symbolverzeichnis

| | |
|---|---|
| $\underline{B}$ | Menge aller Verbindungen in Hubs |
| $c_{e(ij)}$ | Bewertung von $e(ij)$ |
| $c_{e(ij)}^{aktuell}$ | Bewertung von $e(ij)$ inkl. der aktuellen Sendung |
| $c_{e(ij)}^{dispo}$ | Bewertung von $e(ij)$ auf Basis der disponierten Sendungen |
| $c_{e(ij)}^{k}$ | Bewertung von $e(ij)$ anhand von Merkmal $k$ |
| $c_i$ | Kosten an $i$ |
| $c_{p(oi)}$ | Kosten des Pfades von $o$ nach $i$ |
| $c_{p(oi)}^{k}$ | Bewertung des Pfades von $o$ nach $i$ anhand von Merkmal $k$ |
| $D_{ij}$ | Großkreisentfernung zwischen $i$ und $j$ auf Basis des Erdradius |
| $d$ | Zielknoten |
| $E$ | Menge der Kanten eines Netzwerkes |
| $e$ | Kante des Graphen |
| $e^*$ | Kante des Graphen |
| $E^{FAB}$ | Menge aller Kanten, bei denen das FAB geändert wurde |
| $E^{SAN}$ | Menge aller Kanten, bei denen das SAN geändert wurde |
| $E_i^{Start}$ | Menge aller Kanten mit $i$ als Startknoten |
| $E_i^{Ziel}$ | Menge aller Kanten mit $i$ als Zielknoten |
| $e(ij)$ | Eindeutiger Index für eine gerichtete Kante von $i$ nach $j$ |
| $Eff(L_i)$ | Effiziente Teilmenge der Label für Knoten $i$ |
| $e_n$ | Kante an Position $n$ eines Pfades |
| $E^{perm}$ | Menge der dauerhaften Kanten eines Graphen |
| $F_{e(ij)}$ | Frequenz von $e(ij)$ |
| $f_{e(ij)}^{r}$ | Fixe Kosten des Transportes von $e(ij)$ im Nutzungsbereich $r$ |
| $G$ | Graph |
| $h_{e(ij)}$ | Handlingkosten an $e(ij)$ |
| $h_i$ | Handlingkosten an Knoten $i$ |
| $i$ | Knoten des Graphen |

| | |
|---|---|
| $(ij)$ | Gerichtete Kante von $i$ nach $j$ |
| $[ij]$ | Ungerichtete Kante zwischen $i$ und $j$ |
| $j$ | Knoten des Graphen |
| $k^{m}_{e(ij)}$ | Kapazität von $e(ij)$ in Mengeneinheit $m$ |
| $L$ | Menge der Label |
| $\underline{L}$ | Menge aller Kanten zwischen Terminals |
| $Lat_i$ | Breitengrad von Knoten $i$ |
| $Lon_i$ | Längengrad von Knoten $i$ |
| $L_i^{perm}$ | Menge der permanenten Label für Knoten $i$ |
| $L_i^{temp}$ | Menge der temporären Label für Knoten $i$ |
| $l_{p(oi)}$ | Eindeutiges Label für den Pfad von $o$ nach $i$ |
| $M_{ij}$ | Mittelpunktswinkel zwischen $i$ und $j$ auf dem Großkreis |
| $\underline{N}$ | Menge aller Knoten |
| $N(e)$ | Menge aller Nachfolgerkanten von Kante $e$ |
| $N(i)$ | Menge aller Nachbarknoten von $i$ |
| $n^{aktuell}_{e(ij)}$ | Prozentuale Nutzung von $e(ij)$ inkl. der aktuellen Sendung |
| $n^{dispo}_{e(ij)}$ | Prozentuale Nutzung von $e(ij)$ durch bereits disponierte Sendungen |
| $o$ | Startknoten |
| $O_e^r$ | Bereichsobergrenze für Bereich $r$ an Kante $e$ |
| $P$ | Menge der Knoten eines Graphen |
| $p(ij)$ | Pfad von $i$ nach $j$ |
| $Q$ | Schlange |
| $R$ | Menge der Bereiche $r$ einer Kostenfunktion |
| $s$ | Sendung |
| $SE$ | Schlangenende |
| $SK$ | Schlangenkopf |
| $\underline{T}$ | Menge aller Depots |
| $t^{AB}_{e(ij)}$ | Abfahrtszeitpunkt von $e(ij)$ an $i$ |
| $t^{AN}_{e(ij)}$ | Ankunftszeitpunkt von $e(ij)$ an $j$ |
| $t^{FAB}_{e(ij)}$ | Zeitpunkt der frühesten Abfahrt der Kante $e(ij)$ |

| | |
|---|---|
| $t_{e_n}^{FAB}$ | Zeitpunkt der frühesten Abfahrt der Kante $e_n$ |
| $\hat{t}_{e_n}^{FAB}$ | Hilfsvariable zur Zwischenspeicherung einer FAB für eine Kante $e_n$ |
| $\bar{t}_{e_n}^{FAB}$ | Binärvariable, die anzeigt, wenn das FAB einer Kante verändert wurde |
| $t_{e(ij)}^{FAN}$ | Früheste mögliche Ankunftszeit von $e(ij)$ |
| $t_{e_n}^{FAN}$ | Früheste mögliche Ankunftszeit von $e_n$ |
| $t_{e(ij)}^{SAB}$ | Späteste mögliche Abfahrtszeit von $e(ij)$ |
| $t_{e_n}^{SAB}$ | Späteste mögliche Abfahrtszeit von $e_n$ |
| $t_{e(ij)}^{SAN}$ | Späteste mögliche Ankunftszeit von $e(ij)$ |
| $t_{e_n}^{SAN}$ | Späteste mögliche Ankunftszeit von $e_n$ |
| $\hat{t}_{e_n}^{SAN}$ | Hilfsvariable zur Zwischenspeicherung einer SAN für $e_n$ |
| $\bar{t}_{e_n}^{SAN}$ | Binärvariable, die anzeigt, wenn das SAN einer Kante verändert wurde |
| $t_i^{FAB}$ | Früheste mögliche Abfahrtszeit an $i$ |
| $t_i^{FAN}$ | Früheste mögliche Ankunftszeit an $i$ |
| $t_i^{SAN}$ | Späteste mögliche Ankunftszeit an $i$ |
| $t_s^{FAB}$ | Früheste mögliche Abfahrtszeit für Sendung $s$ |
| $t_s^{SAN}$ | Späteste mögliche Ankunftszeit für Sendung $s$ |
| $t_{\max}^{od}$ | Maximal zulässige Transportzeit zwischen $o$ und $d$ |
| $t_{p(oi)}^{Ankunft}$ | Ankunftszeit an Knoten $i$ bei Nutzung von Pfad $p(oi)$ |
| $U_{e(ij)}^{r}$ | Bereichsuntergrenze für Bereich $r$ an $e(ij)$ |
| $V(e)$ | Menge aller Vorgängerkanten von $e$ |
| $V(j)$ | Menge der Vorgängerknoten von $j$ |
| $v_{e(ij)}^{r}$ | Variable Kosten des Transportes an $e(ij)$ im Nutzungsbereich $r$ |
| $x_{e(ij)}$ | Transportmenge an $e(ij)$ |
| $x_{e(ij)}^{Anteil}$ | Transportmenge an $e(ij)$ als Anteil der Kapazität von $e(ij)$ |
| $X_{e(ij)}^{m}$ | Gesamttransportmenge auf einer Kante $e(ij)$ in Mengeneinheit $m$ |
| $x_{e(ij)}^{s,m}$ | Transportmenge der Sendung $s$ an Kante $e(ij)$ in Mengeneinheit $m$ |
| $x_i^s$ | Handlingmenge der Sendung $s$ an Knoten $i$ |
| $x^{s,m}$ | Transportmenge der Sendung $s$ in Mengeneinheit $m$ |

| | |
|---|---|
| $x^{od}$ | Transportaufkommen zwischen Quelle $o$ und Senke $d$ |
| $y^{d}_{e(ij)}$ | Binärvariable für die Nutzung von $e(ij)$ für Fracht abgehend von $i$ zu einem Zielknoten $d$ |
| $y^{r}_{e(ij)}$ | Binärvariable zur Aktivierung von Kostenbereich $r$ für $e(ij)$ |
| $\delta^{od}_{e(ij)}$ | Binärvariable zur Aktivierung von $e(ij)$ als Teil des Pfades von $o$ nach $d$ |
| $\delta^{s}_{e(ij)}$ | Binärvariable zur Aktivierung von $e(ij)$ als Teil des Pfades von $s$ |
| $\Delta t_{e(ij)}$ | Gesamtdauer der Kante $e(ij)$ |
| $\Delta t_{e_n}$ | Gesamtdauer der Kante $e_n$ |
| $\varepsilon$ | Numerische Exzentrizität einer Ellipse |

## Bildverzeichnis

Seite
Bild 2.1: Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge, palettiertes Gut /KBA-2008/ ..... 4
Bild 2.2: Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge, gebündelte Güter /KBA-2008/ ..... 4
Bild 3.1: Planungsaufgabe des Ganzladungsverkehrs ..... 13
Bild 3.2: Planungsaufgabe des Teilladungsverkehrs ..... 15
Bild 3.3: Planungsaufgabe des Sammelladungsverkehrs ..... 18
Bild 3.4: Alternativen der Transportdurchführung ..... 23
Bild 4.1: Netzwerktypen der Verkehrslogistik ..... 28
Bild 5.1: Beispiele für Planungsprobleme eines Lkw-Transportunternehmens ..... 39
Bild 5.2: Label in multikriteriellen Verfahren ..... 59
Bild 6.1: Gängige Strukturen von Konditionen ..... 65
Bild 6.2: Mengenstaffeln auf Basis von Nebenklassenzuschlägen ..... 67
Bild 6.3: Ablauf der entwickelten Methodik zur ganzheitlichen Transportplanung .... 77
Bild 6.4: Zusammenhang des globalen Workflows und der Informationsbedarfe ..... 81
Bild 6.5: Beispielhafte euklidische Entfernungen und Straßenverbindungen ..... 92
Bild 6.6: Beispiele für die geografische Einschränkung des Transportnetzwerkes ... 94
Bild 6.7: Definition der Auswahlfläche ..... 95
Bild 6.8: Zusammensetzung der Transportdauer ..... 97
Bild 6.9: Approximation einer Tariftabelle durch ein Polynom 2. Grades ..... 100
Bild 6.10: Möglichkeiten der Zuordnung von Kunden und Depots ..... 101
Bild 6.11: Zuordnung von Depots zu Kunden durch absolute Entfernungen ..... 102
Bild 6.12: Zuordnung von Depots zu Kunden durch relative Entfernungen ..... 103
Bild 6.13: Beispielhaftes Transportnetzwerk mit Aufträgen ..... 110
Bild 6.14: Feste Terminierung der Kanten durch den ersten Auftrag ..... 110
Bild 6.15: Schrittweise Terminierung von Kanten ..... 112
Bild 6.16: Teilterminierung von Kanten ..... 113
Bild 6.17: Relevanz der Berücksichtigung von Abhängigkeiten ..... 114
Bild 6.18: Anpassungsnotwendigkeit bei abhängigen Kanten ..... 118
Bild 7.1: Entwickelte Datenbankstruktur in Access ..... 121
Bild 7.2: Hauptmenü ..... 122
Bild 7.3: Verwalten der Kunden- sowie der Depotdaten ..... 123

Bild 7.4: Verwalten der Transportrelationen ..... 125
Bild 7.5: Verwalten der Sendungen ..... 127
Bild 7.6: Alternativen der Ergebnisausgabe ..... 128
Bild 7.7: Visualisierungsmöglichkeiten ..... 132
Bild 7.8: Automatisierte Bestimmung der Geokoordinaten ..... 134
Bild 7.9: Routenplanung in MapPoint ..... 135
Bild 7.10: Netzwerkvisualisierung im MapPoint Kartenwerk ..... 136
Bild 7.11: Ein-Punkt-Crossover ..... 145
Bild 7.12: Fitnessentwicklung der Versuche ohne terminierte Kanten ..... 147
Bild 7.13: Genomstruktur bei höchster Fitness, unterminiertes Netz, Versuch 1 ..... 147
Bild 7.14: Genomstruktur bei höchster Fitness, unterminiertes Netz, Versuch 2 ..... 148
Bild 7.15: Einflussnahme der Individuen der Ausgangsgeneration ..... 149
Bild 7.16: Fitnessentwicklung der Versuche mit terminierten Kanten ..... 150
Bild 7.17: Genomstruktur bei höchster Fitness, terminiertes Netz, Versuch 3 ..... 150
Bild 7.18: Genomstruktur bei zweistufiger Sortierregel ..... 152
Bild 7.19: Versuchsverlauf mit ausschließlich zufällig erzeugten Genomen ..... 153
Bild 7.20: Genomstruktur des resultierenden Genoms ..... 154

## Tabellenverzeichnis

Seite

Tabelle 2.1: Auslastung der Kapazitäten im Stückgut-Kraftverkehr /KBA-2008/..... 5
Tabelle 6.1: Auszug Güterfernverkehrsentgelte, Frachttafeln Stückgut /GVE-2008/ 63
Tabelle 7.1: Netzgrößen beispielhafter Stückgutkooperationen /STÖ-2007/..... 120
Tabelle 7.2: Ausschnitt der Kantentabelle nach einem Berechnungslauf, Teil 1 .... 124
Tabelle 7.3: Ausschnitt der Kantentabelle nach einem Berechnungslauf, Teil 2 .... 124
Tabelle 7.4: Aufbereitung der Berechnungsergebnisse für die Tourenplanung..... 129
Tabelle 7.5: Aufbereitung der Berechnungsergebnisse für das Depothandling..... 129
Tabelle 7.6: Aufbereitung der Berechnungsergebnisse als Ladeliste..... 130
Tabelle 7.7: Ausschnitt des zu Grunde gelegten Auftragspools ..... 138
Tabelle 7.8: Ausschnitt einer beispielhaften Ergebnisliste..... 138
Tabelle 7.9: Auftragssortierungen für die Plausibilitätsprüfung..... 140

## Algorithmenverzeichnis

Seite
Algorithmus 5.1: Pseudo-Code des Dijkstra-Algorithmus ..... 53
Algorithmus 5.2: Pseudo-Code des FIFO-Algorithmus ..... 56
Algorithmus 5.3: Multikriterielles SPP ..... 60
Algorithmus 6.1: Entwickelter „Kürzeste-Wege-Algorithmus“ mit Zeitfenstern ..... 107
Algorithmus 6.2: Veränderung direkt betroffener Kantenzeitfenster ..... 115
Algorithmus 6.3: Dokumentation der Kantenabhängigkeiten ..... 117
Algorithmus 6.4: Berücksichtigung aller zeitlichen Abhängigkeiten im Netzwerk .... 119