

Einfluss vernetzter Verkehrsteilnehmer auf die dynamische Verkehrsumlegung

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des Grades

**DOKTOR der Ingenieurwissenschaften
Dr.-Ing.**

genehmigte Dissertation von:
Dipl.-Ing. Nils Rinke

**Schriftenreihe des Instituts für Risiko und Zuverlässigkeit
Band 1**

Referent: apl. Prof. Dr.-Ing. Volker Berkhahn
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Bernhard Friedrich
Tag der Promotion: 15.06.2017

Schriftenreihe des Instituts für Risiko und Zuverlässigkeit
herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Michael Beer

Band 1

Nils Rinke

**Einfluss vernetzter Verkehrsteilnehmer
auf die dynamische Verkehrsumlegung**

Shaker Verlag
Aachen 2017

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.: Hannover, Leibniz Univ., Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5390-6

ISSN 2566-8595

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

Abstract

Traffic networks all over the world are facing a large increase of traffic volume within the next few years. According to the FEDERAL MINISTRY OF TRANSPORT AND DIGITAL INFRASTRUCTURE the traffic volume of private transport in Germany alone will increase from 2004 to 2025 by nearly 20 percent (BMVI, 2007). To manage this challenge, large expansions of the traffic networks as well as innovative appliances and services for traffic control are necessary.

Due to the development of information technologies and the increasing number of drivers with GPS navigation equipment, improvement of individual route guidance has seen increased interest; BMW CONNECTED DRIVE BMW Group (2017) and TOMTOM LIVE SERVICES TomTom International BV (2017) were recently established to address this subject. These services share a commonality in that the best route for the driver is considered independently of other drivers. As a consequence, huge levels of congestion can emerge on the main routes, while minor routes remain less frequented. To reduce congestions and therefore to raise the travel comfort of all road users, a homogeneous assignment of guidable drivers is necessary, even if this means a higher travel time for several drivers. Therefore an estimation of the traffic flow when choosing a possible route has to be integrated in the route choice algorithm. This problem is classified as *multi user class Dynamic Traffic Assignment* (muc DTA) (Peeta u. Ziliaskopoulos, 2001).

The traffic network contains *unequipped* drivers (without navigation equipment), which mainly choose their route considering empirical knowledge of the typical traffic situation. In case of unexpected changes of the traffic situation, unequipped drivers usually do not receive this information pertaining to unexpected changes of the traffic situation and so they are unlikely to alter their route. Additionally, *equipped* drivers, which follow a computed best route, are modeled. This user class receives traffic information hence they may change their route, if a new best route is calculated. In this thesis, an additional class, called *connected* drivers, is integrated. Connected drivers receive their route by a central server. Additionally, members of this class send their current information of the travel times to the central server, in which the route data of all connected drivers are collected. The main objective is to assign each connected driver the route, which optimizes the overall travel time in the network.

In this work, a simulation based assignment model for detecting the influence and optimizing the routes of connected drivers in a network of trunk roads is developed. The choice set generation must ensure a fast calculation of distinct routes between every

OD pair. Therefore a modified *Choice Routing* algorithm (CAMVIT, 2009) is used. The route choice depends on the user class and is based on Matschke (2007). For unequipped drivers a C-Logit model (Cascetta u. a., 1996) is used, in which several cost factors are considered. Equipped drivers use the best route according to generalized travel times. Connected drivers use a complex cost function to determine the best route. A new cost factor is developed, taking into account the route choice of other connected drivers.

To evaluate the route choice, an adapted *Intelligent Driver Model* (Treiber u. Kesting, 2010) for the microscopic simulation of traffic flow is developed. This model provides a simple way to reproduce individual driving behavior via a small number of parameters.

Finally a mesoscopic optimization of the combined route choice of each connected driver via a genetic algorithm is established. Every combination is evaluated by the macroscopic measured travel time in the simulation, taking into account the change of the route of connected drivers. This optimization process is repeated until a convergence criterion is met.

It shows that the proposed method achieves a maximal reduction of total travel time of 30 % (20 % for connected drivers), depending on the number of connected drivers. Even if the unequipped drivers are assigned in a nearly optimal way, e.g. using the convex combination method, the total travel time can be reduced by 10 % (4 % for connected drivers). It turns out, that the unequipped drivers receive the best benefit due to the connected drivers.

Furthermore, the influence of connected drivers on the traffic system can be divided into three domains. For low penetration rates ($< 10\%$) a strong reduction of the congestion lengths is established. In the domain with penetration rates between 10 – 15 % to approx. 60 – 70 %, the connected drivers are divided on the best route and the first alternative route, so that the reduction of the congestion lengths are less than in the first domain. In the third domain with high penetration rates ($> 60 - 70\%$), the system can be influenced significantly, leading to hugh reductions in congestion.

keywords: Dynamic Traffic Assignment, connected drivers, routing, micro simulation, evolutionary algorithms.

Zusammenfassung

Die prognostizierte Zunahme des Verkehrsvolumens auf den Verkehrsnetzen stellt eine große Herausforderung für öffentliche Einrichtungen sowie Automobilhersteller und kommerzielle Verkehrsdienstleister dar. Laut dem Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur steigt allein der Individualverkehr auf dem deutschen Straßennetz bis 2025 um circa 20 Prozent (BMVI, 2007). Um diesen Anstieg zu bewältigen, müssen umfangreiche Investitionen in die Infrastruktur getätigt sowie innovative Anlagen der Verkehrssteuerung und Verkehrsdienste entwickelt werden.

Aufgrund der Entwicklung der Informationstechnologie und des steigenden Anteils an Fahrzeugen mit Endgeräten zur Navigation sind in den letzten Jahren verschiedene Dienste wie BMW CONNECTED DRIVE (BMW Group, 2017) und TOMTOM LIVE SERVICES (TomTom International BV, 2017) entstanden, welche die individuelle Routenführung verbessern. Alle diese Dienste versuchen die Routenführung für den Nutzer des Dienstes ohne Berücksichtigung der Auswirkungen auf das Gesamtsystem zu verbessern. Dies führt in der Regel dazu, dass die Hauptrouten und die nächstbesten Alternativrouten stark belastet werden und somit eine Staummeidung bis zur Entwicklung eines weiteren Staus vollzogen wird. Dabei bleiben niedrig priorisierte Alternativrouten zu meist ungenutzt. Um das Stauvorkommen zu reduzieren und somit eine Erhöhung des Reisekomforts für alle Verkehrsteilnehmer zu erzielen, muss eine homogene Aufteilung der steuerbaren Verkehrsteilnehmer erfolgen. Dazu muss die Routenwahl dieser steuerbaren Verkehrsteilnehmer eine Abschätzung der zukünftigen Entwicklung des Verkehrsablaufs berücksichtigen.

Dieses Problem wird in der Literatur als *multi user class Dynamic Traffic Assignment* (muc DTA) bezeichnet (Peeta u. Ziliaskopoulos, 2001). Dabei werden die im Verkehrsnetz befindlichen Verkehrsteilnehmer entsprechend ihres Informationsstands in Gruppen eingeteilt. *Nicht navigierte* Verkehrsteilnehmer wählen ihre Route üblicherweise durch ihren Erfahrungsschatz bzw. durch statisches Kartenmaterial bei fehlender Ortskenntnis. Sie erhalten keine oder evtl. durch den Verkehrsfunk verspätete Meldung über unerwartete Ereignisse und wechseln üblicherweise nicht oder erst verzögert ihre Route. Zusätzlich existieren *navigierte* Verkehrsteilnehmer, welche die vom Navigationsgerät berechnete beste, typischerweise schnellste, Route wählen. Sie erhalten Verkehrsnachrichten und können daraufhin die Route wechseln, wenn eine bessere Route berechnet wurde. Ferner wird in dieser Arbeit durch *vernetzte* Verkehrsteilnehmer eine weitere Gruppe modelliert. Vernetzte Verkehrsteilnehmer tauschen ihre Informationen, wie die aktuelle

Reisezeit, über einen zentralen Server aus. Die Herausforderung besteht darin, jedem vernetzten Verkehrsteilnehmer eine Route durch den zentralen Server bereitzustellen, welche die beste Verteilung im Sinne des Systemoptimums ermöglicht.

Dazu wird in dieser Arbeit ein simulationsbasiertes Umlegungsverfahren verwendet, welches den Einfluss von vernetzten Verkehrsteilnehmern abbildet und deren Routenwahl optimiert. Zur Bestimmung potenzieller Routen für jede Quelle-Ziel-Beziehung wird ein modifizierter Choice-Routing-Algorithmus (CAMVIT, 2009) verwendet, da dieser Routen hinsichtlich ihrer Eigenständigkeit bewertet und auswählt. Das Entscheidungsmodell für jede Verkehrsteilnehmergruppe ist angelehnt an die Arbeit von Matschke (2007). Für nicht navigierte Verkehrsteilnehmer wird ein C-Logit-Modell (Cascetta u. a., 1996) benutzt, in welchem verschiedene Routenwahlkriterien als Kostenfaktoren berücksichtigt werden. Navigierte Verkehrsteilnehmer wählen immer die beste Route basierend auf generalisierten Kosten. Für die vernetzten Verkehrsteilnehmer wird eine komplexe Kostenfunktion für die Bestimmung der besten Route verwendet. Dabei wird ein Kostenfaktor zur Abschätzung der Reisezeit unter Berücksichtigung der Routenwahl anderer vernetzter Verkehrsteilnehmer entwickelt.

Zur Evaluierung der Routenwahl wird ein angepasstes Intelligent-Driver-Modell (Treiber u. Kesting, 2010) innerhalb einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation verwendet. Dieses Modell ermöglicht durch die Wahl weniger Parameter die Abbildung verschiedenster Fahrweisen.

Schließlich wird mittels eines genetischen Algorithmus eine mesoskopische Optimierung der Routenwahl aller vernetzter Verkehrsteilnehmer vorgenommen. Dazu werden mögliche Kombinationen der Routenwahl auf Basis der in der Simulation erfassten Reisezeiten bewertet, wobei der Effekt der Änderung einer Route integriert wird. Der iterative Ablauf von Simulation und Optimierung wird solange wiederholt, bis Konvergenz zwischen den Reisezeiten aufeinanderfolgender Iterationsschritte erfüllt ist.

Die Ergebnisse zeigen, dass mit steigender Durchdringungsrate der vernetzten Verkehrsteilnehmer die Gesamtreisezeit stetig sinkt und dabei abhängig vom Szenario eine Reduzierung der Gesamtreisezeit von bis zu 30 % erzielt. Des Weiteren lassen sich im vorliegenden Szenario drei Bereiche unterschiedlicher Ausprägung des Einflusses identifizieren. Im Bereich geringer Durchdringungsraten ($< 10\%$) reagiert das Gesamtsystem sehr schnell auf die Existenz vernetzter Verkehrsteilnehmer und sowohl Reisezeiten als auch die Staulängen reduzieren sich stark. Im Bereich der Durchdringungsraten von $10 - 15\%$ bis ca. $60 - 70\%$ verteilen sich die vernetzten Verkehrsteilnehmer so auf die Routen, dass zwar ein Reisezeitgewinn erfolgt, die Staulängen sich allerdings nur geringfügig reduzieren. Im Bereich hoher Durchdringungsraten ($> 60 - 70\%$) wirkt sich die Umlegung der vernetzten Verkehrsteilnehmer sehr stark auf das System aus, so dass die Staulängen in diesem Bereich drastisch sinken.

Schlüsselwörter: Dynamische Verkehrsumlegung, vernetzte Verkehrsteilnehmer, Routensuche, mikroskopische Verkehrsflusssimulation, evolutionäre Algorithmen.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	iii
1. Einleitung	1
1.1. Technologie in der Navigation	2
1.2. Staumeidung anstelle von Stauvermeidung	3
1.3. Optimierung der Routenwahl	4
1.4. Zielsetzung	5
1.5. Stand der Technik	6
2. Verkehrstechnische Grundlagen	9
2.1. Verkehr	9
2.1.1. Verkehrsgebiet	10
2.1.2. Verkehrsablauf	10
2.1.3. Kenngrößen des Verkehrsablaufs	11
2.1.4. Zusammenhang der Kenngrößen	15
2.2. Verkehrstelematik	17
2.2.1. Verkehrsfunk	18
2.2.2. Online-Verkehrsinformationssysteme	20
2.2.3. Verkehrstelematik für die individuelle Routenführung	21
3. Verkehrsplanung	23
3.1. Verkehrsnetzmodell	25
3.2. Routensuchverfahren	27
3.2.1. Alternativroutensuche	29
3.2.2. Choice-Routing	30
3.2.3. Dynamische Routensuche	36
3.3. Diskrete Entscheidungstheorie	38
3.3.1. Probit-Modell	41
3.3.2. Logit-Modell	42
3.3.3. C-Logit-Modell	44
3.4. Verkehrserzeugung	46
3.5. Verkehrsverteilung	46
3.6. Verkehrsaufteilung	47
3.7. Verkehrsumlegung	48
3.7.1. Grundlagen der Optimierung	49

3.7.2.	Formulierung	50
3.7.3.	Statische Verkehrsumlegung	53
3.7.4.	Dynamische Verkehrsumlegung	57
4.	Modellierung des Verkehrsablaufs	63
4.1.	Klassifikation	63
4.2.	Mikroskopische Verkehrsflussmodelle	68
4.2.1.	Klassische Fahrzeugfolge-Modelle	70
4.2.2.	Intelligent-Driver-Modell	76
4.2.3.	Spurwechselmodelle	90
4.2.4.	Validierung	99
5.	Modellierung von Szenarien für die vernetzte Verkehrsumlegung	103
5.1.	OpenStreetMap	104
5.1.1.	Datenmodell	104
5.1.2.	Überführung der digitalen Straßenkarte	107
5.2.	Modellierung von Verkehrsteilnehmergruppen	111
5.2.1.	Nicht-navigierte Verkehrsteilnehmer	111
5.2.2.	Navigierte Verkehrsteilnehmer	113
5.2.3.	Vernetzte Verkehrsteilnehmer	114
5.3.	Entscheidungsmodell der Verkehrsteilnehmergruppen	116
5.3.1.	Aktuelle Kosten	118
5.3.2.	Historische Kosten	120
5.3.3.	Kostenfaktoren vernetzter Verkehrsteilnehmer	122
5.3.4.	Zusammensetzung des Entscheidungsmodells	125
6.	Mesoskopische Optimierung der Routenwahl	129
6.1.	Genetische Algorithmen	130
6.1.1.	Repräsentation	133
6.1.2.	Evolutionäre Operatoren	134
6.1.3.	Ablauf	139
6.2.	Optimierung der Routenwahl	140
6.2.1.	Erzeugung der Startpopulation	141
6.2.2.	Problemspezifischer Genetischer Algorithmus	143
6.3.	Zusammensetzung des Gesamtmodells	145
6.3.1.	Preprocessing	145
6.3.2.	Processing	146
7.	Evaluierung	149
7.1.	Beschreibung des Testszenarios	149
7.2.	Optimierung des ungestörten Verkehrsablaufs	153
7.3.	Optimierung des gestörten Verkehrsablaufs	164
7.4.	Parameterstudie	168

8. Ergebnisdiskussion	171
9. Zusammenfassung und Ausblick	177
Literaturverzeichnis	181
A. Programmstruktur	193
A.1. Basismodul	193
A.2. Modul zur Verkehrsflusssimulation	195
A.3. Modul zur Verkehrsumlegung	197
A.4. Beispiel einer OpenStreetMap	198
B. Szenarien	201
B.1. Historische Kosten	201
B.1.1. Austauschformat	202
B.2. Verkehrsmengenkarten	203
B.3. Verteilung der Verkehrsteilnehmer	205

Abbildungsverzeichnis

2.1. Verkehrsgebiet der Stadt Hannover inklusive detaillierter Betrachtung des Aegidientorplatzes.	11
2.2. Verkehrsstärke an einem Messquerschnitt innerhalb eines zeitlichen Beobachtungsintervalls.	12
2.3. Verkehrsdichte zu einem Messzeitpunkt innerhalb eines räumlichen Beobachtungsintervalls.	14
2.4. Exemplarisches Fundamentaldiagramm mit Darstellung der drei Phasen: freier Verkehrszustand (linke Kurve), synchronisierter Verkehrszustand (blauer Bereich als Repräsentation einer Punktwolke mit großer Streuung) sowie breiter Stau (rechte Kurve). Angelehnt an Kemper (2006); Original: Kerner (2003).	16
2.5. Darstellung der drei Beziehungen, erstellt aus Messwerten der A9 (aus Schick, 2003).	17
3.1. Darstellung der fünf besten (Alternativ-)Routen, bestimmt mittels Choice-Routing.	33
3.2. Darstellung der fünf besten (Alternativ-)Routen, bestimmt mittels des Algorithmus nach Yen.	34
3.3. Detailbetrachtung der Alternativrouten, bestimmt mittels des Algorithmus nach Yen.	35
3.4. Verarbeitung einer Verkehrsmeldung innerhalb der betroffenen Kanten (aus Helling, 2006).	37
3.5. Darstellung der Angebots-Nachfrage-Beziehung mit zugehörigem Gleichgewicht.	48
3.6. Typischer Verlauf der belastungsabhängigen BPR-Funktion.	54
4.1. Kenngrößen in Fahrzeugfolgmodellen.	70
4.2. Freie Beschleunigung für ein stehendes Kfz ($a = 1,0 \text{ m/s}^2$, $v_{0,i} = 50 \text{ km/h}$).	78
4.3. Freie Beschleunigung für ein stehendes Kfz ($\delta = 4$, $v_0 = 50 \text{ km/h}$).	79
4.4. Darstellung des Gleichgewichtsanteils und des dynamischen Anteils für verschiedene Geschwindigkeitsdifferenzen ($s_0 = 2 \text{ m}$, $\delta = 4$, $a = 1,0 \text{ m/s}^2$, $b = 1,5 \text{ m/s}^2$).	80
4.5. Anfahrt an eine LSA in 60 m Entfernung für ein Fahrzeug ($\delta = 4$, $v_0 = 50 \text{ km/h}$, $a = 1,0 \text{ m/s}^2$).	82

4.6.	Annäherungsverhalten für ein Fahrzeug ($\delta = 4$, $v_0 = 130$ km/h, $a = 1,0$ m/s ²) an ein vorausfahrendes Fahrzeug ($v_0 = 100$ km/h).	83
4.7.	Anpassung der Maximalbeschleunigung durch exponentielle Glättung	85
4.8.	Freie Beschleunigung für ein stehendes Kfz ($\delta = 4$, $v_0 = 50$ km/h) mit der Maximalbeschleunigung nach Gl. (4.62).	86
4.9.	Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm für die freie Beschleunigung eines stehenden Fahrzeugs ($\delta = 4$, $v_0 = 130$ km/h) mit der Maximalbeschleunigung a_{max} nach Gl. (4.62) bzw. a nach Gl. (4.52).	87
4.10.	Annäherungsverhalten für ein Fahrzeug ($\delta = 4$, $v_0 = 130$ km/h, $a = 1,0$ m/s ² , $c = 0,99$) mit CAH an ein vorausfahrendes Fahrzeug ($v_0 = 100$ km/h).	88
4.11.	Kenngrößen bei einem Spurwechsel eines Fahrzeugs i nach links.	92
4.12.	Klassifikation der verschiedenen Fahrertypen in Abhängigkeit der sicheren Bremsverzögerung b_{safe} und dem Höflichkeitsfaktor p (aus Treiber u. Kesting, 2009).	93
4.13.	Einteilung in Einflusszonen im Bereich vor einer Abfahrt.	95
4.14.	Ablauf des Fahrstreifenwechsels bei einer Anfrage. Die potenziellen Folgefahrzeuge (grau) überprüfen die Anfrage auf Grundlage der Beschleunigung \tilde{a}_{pf} (a). Bei erfolgreicher Anfrage reguliert das Fahrzeug pf seinen Abstand bis ein Fahrstreifenwechsel möglich ist (b).	97
4.15.	Anpassung der Wunschgeschwindigkeit.	98
4.16.	Darstellung der real erfassten und simulierten Verkehrsstärken pro Stunde aufgetragen über einen Tag Betrachtungsdauer.	100
4.17.	Darstellung der real erfassten und simulierten Verkehrsstärken pro 15 min aufgetragen über einen Tag Betrachtungsdauer.	101
5.1.	Darstellung des Datenmodells einer OpenStreetMap.	104
5.2.	Exemplarische Darstellung des Strukturmodells.	109
5.3.	Beispiel des innerstädtischen Knotenpunktes <i>Vahrenwalder Platz</i> . (a). Luftaufnahme (Kartendaten: Google, DigitalGlobe) (b). Ansicht der vorhandenen node-Objekte in OpenStreetMap (© OpenStreetMap-Mitwirkende).	110
5.4.	Motive der Routenwahl der Befragten (aus Matschke, 2007).	112
5.5.	Prinzip der Datenübertragung vernetzter Teilnehmer.	114
5.6.	Schema des Entscheidungsmodells der drei Verkehrsteilnehmergruppen.	117
5.7.	Schema des Iterationsprozess zur Bestimmung historischer Kosten. Angelehnt an Matschke (2007).	122
5.8.	Detailliertes Schema des Entscheidungsmodells (angelehnt an Matschke, 2007).	127
6.1.	Repräsentation eines Lösungskandidaten als Individuum.	134
6.2.	Beispiel der beiden kombinierenden Rekombinationsoperatoren.	137
6.3.	Beispiel der beiden Mutationsoperatoren am Beispiel des fünften Gens g_c^5 , welches vor Anwendung das Allel g_c^{52} verwendet.	139

6.4.	Detaillierter Aufbau des Preprocessings.	146
6.5.	Detaillierter Aufbau des Processings.	148
7.1.	Darstellung des Testszenarios	150
7.2.	Darstellung der Umlegungsergebnisse der statischen Verkehrsumlegung mit der konvexen Kombination. Die Färbung der Streckenabschnitte erfolgt entsprechend dem Quotienten Belastung/Kapazität von Blau (0) bis Rot (≥ 1).	154
7.3.	Darstellung der Umlegungsergebnisse der statischen Verkehrsumlegung mit dem C-Logit-Modell unter ausschließlicher Berücksichtigung historischer Kosten.	155
7.4.	Darstellung des Fitnessverlaufs über die Generationen des ersten Iterationsschritts.	157
7.5.	Darstellung der Gesamtreisezeit aller Verkehrsteilnehmer sowie der mittleren und maximalen Staulängen je Durchdringungsrate der vernetzten Verkehrsteilnehmer (Verteilung der nicht-navigierten Verkehrsteilnehmer mittels des C-Logit-Verfahrens).	158
7.6.	Darstellung der mittleren Reisezeit der vernetzten und nicht-navigierten Verkehrsteilnehmer (Verteilung der nicht-navigierten Verkehrsteilnehmer mittels dem C-Logit-Verfahren).	159
7.7.	Darstellung der Gesamtreisezeit aller Verkehrsteilnehmer sowie der mittleren und maximalen Staulängen je Durchdringungsrate der vernetzten Verkehrsteilnehmer (Verteilung der nicht-navigierten Verkehrsteilnehmer mittels konvexer Kombination).	160
7.8.	Darstellung der mittleren Reisezeit der vernetzten Verkehrsteilnehmer und der nicht-navigierten Verkehrsteilnehmer (Verteilung der nicht-navigierten Verkehrsteilnehmer mittels konvexer Kombination).	161
7.9.	Darstellung der Gesamtreisezeit aller Verkehrsteilnehmer sowie der mittleren und maximalen Staulängen je Durchdringungsrate der vernetzten Verkehrsteilnehmer (Verteilung der nicht-navigierten Verkehrsteilnehmer mittels Alles-oder-Nichts-Umlegung).	162
7.10.	Darstellung der mittleren Reisezeit der vernetzten Verkehrsteilnehmer (Verteilung der nicht-navigierten Verkehrsteilnehmer mittels Alles-oder-Nichts-Umlegung).	163
7.11.	Darstellung des Testszenarios mit Markierung der Unfallstelle.	164
7.12.	Darstellung der Gesamtreisezeit aller Verkehrsteilnehmer sowie der mittleren und maximalen Staulängen im gestörten Verkehrsablauf je Durchdringungsrate der vernetzten Verkehrsteilnehmer (Verteilung der nicht-navigierten Verkehrsteilnehmer mittels des C-Logit-Verfahrens).	165
7.13.	Darstellung der mittleren Reisezeit der vernetzten Verkehrsteilnehmer bei gestörtem Verkehrsablauf (Verteilung der nicht-navigierten Verkehrsteilnehmer mittels des C-Logit-Verfahrens).	166

7.14. Darstellung der Gesamtreisezeit aller Verkehrsteilnehmer sowie der mittleren und maximalen Staulängen im gestörten Verkehrsablauf je Durchdringungsrate der vernetzten Verkehrsteilnehmer (Verteilung der nicht-navigierten Verkehrsteilnehmer mittels konvexer Kombination).	167
7.15. Darstellung der mittleren Reisezeit der vernetzten Verkehrsteilnehmer bei gestörtem Verkehrsablauf (Verteilung der nicht-navigierten Verkehrsteilnehmer mittels konvexer Kombination).	168
7.16. Prozentuale Verteilung der vernetzten Verkehrsteilnehmer auf die fünf möglichen Routen zwischen Quelle 1 und Senke 8 je Durchdringungsrate (Verteilung der nicht-navigierten Verkehrsteilnehmer mittels des C-Logit-Verfahrens).	169
7.17. Prozentuale Verteilung der vernetzten Verkehrsteilnehmer auf die fünf möglichen Routen zwischen Quelle 1 und Senke 8 je Durchdringungsrate (Verteilung der nicht-navigierten Verkehrsteilnehmer mittels konvexer Kombination).	170
A.1. UML-Klassendiagramm für das Basismodul.	194
A.2. UML-Klassendiagramm für das Modul zur Verkehrsflusssimulation.	196
A.3. UML-Klassendiagramm für das Modul zur Verkehrsumlegung.	197
B.1. Konvergenzverlauf der Bestimmung der historischen Kosten. Als Konvergenzkriterium wird der RMSE $\epsilon < 20$ zwischen zwei Iterationsschritten verwendet.	201
B.2. Auszug einer XML-Datei zur Speicherung der historische Kosten für jeden Iterationsschritt und Simulationsdurchlauf.	202
B.3. Prozentuale Verteilung der vernetzten Verkehrsteilnehmer auf die fünf möglichen Routen zwischen Quelle 8 und Senke 1 je Durchdringungsrate (Verteilung der nicht-navigierten Verkehrsteilnehmer mittels des C-Logit-Verfahrens).	205
B.4. Prozentuale Verteilung der vernetzten Verkehrsteilnehmer auf die fünf möglichen Routen zwischen Quelle 8 und Senke 1 je Durchdringungsrate (Verteilung der nicht-navigierten Verkehrsteilnehmer mittels der konvexen Kombination).	206

Tabellenverzeichnis

3.1.	Kennwerte der berechneten Routen aus Abbildung 3.1.	32
3.2.	Kennwerte der berechneten Routen aus Abbildung 3.2.	35
3.3.	Reduktionsfaktoren für unterschiedliche Verkehrsbehinderungen (Original: Daimler-Chrysler (2000); entnommen aus Helling (2006)).	36
3.4.	Quelle-Ziel-Matrix.	47
4.1.	Beschleunigungsvermögen für Klein- bzw. Mittelklasse-Pkws (s. Lohse u. Schnabel, 2011a).	84
6.1.	Gegenüberstellung der Begriffe aus der Biologie und der Optimierung	131
6.2.	Klassifikation evolutionärer Algorithmen.	133
7.1.	Verwendete Quelle-Ziel-Matrix.	151
7.2.	Kennwerte der berechneten Routen zwischen der Quelle 1 und der Senke 8.	152
7.3.	Kennwerte des Intelligent-Driver-Modells für die verschiedene Fahrzeugtypen.	152
7.4.	Verteilung der Fahrzeugtypen auf die Verkehrsteilnehmergruppen.	153
7.5.	Parameter des genetischen Algorithmus.	153
7.6.	Kennwerte des Verkehrsablaufs für die zwei Iterationsschritte bei einer Anzahl vernetzter Verkehrsteilnehmer von 2428.	156

Algorithmenverzeichnis

3.1. Dijkstra-Algorithmus	28
3.2. Choice-Routing-Algorithmus	31
3.3. Sukzessiv-Verfahren	55
3.4. Konvexe Kombination	57
3.5. Simulationsbasierte Umlegungsverfahren	61
6.1. Schematischer Ablauf eines genetischen Algorithmus	140
6.2. Erzeugung der Startpopulation	142
6.3. Problemspezifischer genetischer Algorithmus	144