

Entwicklung eines dynamischen Routingverfahrens zur Integration von kommunalen Verkehrsmanagementmaßnahmen in die hybride Navigation

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. Gordon Isaac
geboren am 24.03.1985 in Hannover

Referent: apl. Prof. Dr.-Ing. Volker Berkhahn

Koreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernhard Friedrich

Tag der Promotion: 06.03.2019

Abstract

Especially in urban areas a breakdown of the infrastructure due to high traffic demand can frequently be observed nowadays. Road and city authorities are faced with a prognosis of increasing traffic demand for the next years. Therefore, they are forced to define traffic management measures to being able to cope with the predicted traffic demand. These measures include alternative routes, so called *Strategic Routes*, which are usually communicated to the driver via variable message signs or radio signal. As of now these routes are not being considered by navigation systems. Many vehicles are equipped with the necessary technical requirements to integrate those traffic management measures into the navigation for some years now.

As a part of this thesis, a detailed analysis found different reasons that prevented an integration of these Strategic Routes. A missing definition and standardisation of strategies is one of the more organisational points. Other challenges can be found in the georeference or the algorithmic consideration of a Strategic Route.

To gain a better understanding of strategies and their acceptance a user study is performed to find the factors to make a “good” route. The evaluation of this study is done using a machine learning approach and finds that besides the length and duration of a route no further factors have a significant influence on the rating of a route. Following, some suggestions for the digitalisation and standardisation for Strategic Routes are made. To find a suitable georeference different approaches are evaluated. A modified version of the openLR referencing system is able to reference Strategic Routes with a sufficient quality. By extending an A* route search algorithm Strategic Routes can be considered during a route search. This thesis shows the necessary adaptations and extensions of the algorithm. Finally, a routing server is implemented, which can receive traffic management measures and concurrently communicate to a test vehicle. Routes calculated in the vehicle are communicated to the server and are checked for a Strategic Route based on the implemented route search algorithm. In case a better route can be found, this route is sent to vehicle and adopted in the navigation system. Based on this prototype the overall system functionality is proven in different areas.

The thesis closes with a traffic simulation which evaluates the effects of a Strategic Routing system on the overall traffic network performance. The results show that the implementation of a Strategic Routing system can lead to travel time improvements for users of the system as well as drivers not using the system. Even for the overall network improvements of the average travel time can be achieved. Among other criteria, the level of improvement is dependent on the equipment rate of the vehicles with the strategic routing system. The simulation shows a

peak of improvement at a rate of about 20%. At this rate a reduction of travel time of about 23% can be reached. The simulation also shows, that these values highly depend on the given infrastructure and especially on the character of the chosen Strategic Route.

Zusammenfassung

Vor allem in urbanen Gegenden entstehen heutzutage häufig Staus durch Überlastung der Infrastruktur. Die prognostizierte Zunahme des Verkehrs für die kommenden Jahre zwingt Städte und Verkehrsbetreiber Maßnahmen zu ergreifen, um die Verkehrsmengen auch zukünftig aufnehmen zu können. Zu diesem Zweck werden verschiedene Verkehrsmanagementmaßnahmen getroffen. Zu diesen Maßnahmen zählen Alternativrouten, sogenannte *Strategische Routen*, welche dem Verkehrsteilnehmer über Hinweisschilder oder den Rundfunk kommuniziert werden. Diese Routen werden bis heute jedoch nicht von Navigationsgeräten berücksichtigt. Seit einigen Jahren verfügen Fahrzeuge über die notwendigen technischen Voraussetzungen um diese Verkehrsmanagementmaßnahmen in die Navigation zu integrieren.

Im Rahmen dieser Arbeit wird durch eine detaillierte Untersuchung festgestellt, dass verschiedene Gründe existieren, welche eine Integration dieser Strategischen Routen bisher verhindert hat. Zu den organisatorischen Schwachstellen zählen eine fehlende Definition und Standardisierung von Strategischen Routen, hierüber hinaus existieren Herausforderungen durch die Georeferenzierung und Berücksichtigung der Strategien bei der Routenberechnung.

Um ein besseres Verständnis von Strategien und dessen Akzeptanz zu erhalten, wird zunächst durch eine Nutzerbefragung erhoben, anhand welcher Faktoren eine Route als „gut“ befunden wird. Die Auswertung erfolgt auf Basis eines Machine-Learning-Ansatzes und zeigt, dass neben einer Länge der Route und der Reisezeit keine weiteren Faktoren relevanten Einfluss auf die Bewertung einer Route haben. Anschließend werden Vorschläge für eine Digitalisierung und Standardisierung von Strategischen Routen erstellt. Um hierbei eine geeignete Georeferenzierung verwenden zu können, werden unterschiedliche Ansätze betrachtet und schließlich eine Weiterentwicklung des Verfahrens openLR erstellt, welche in der Lage ist, diese Strategien zu referenzieren. Durch eine durchgeführte Modifikation des A*-Routensuch-Algorithmus ist es möglich, die Strategischen Routen bei der Routensuche zu berücksichtigen. Die Arbeit schildert die hierfür notwendigen Anpassungen und Weiterentwicklungen des Algorithmus. Schließlich wird ein Routing-Server aufgebaut, welcher in der Lage ist Verkehrsmanagementinformationen zu empfangen und gleichzeitig mit einem Versuchsfahrzeug kommunizieren kann. Im Fahrzeug berechnete Routen werden an den Server geschickt und mit Hilfe der implementierten Routensuche, auf eine Strategische Route untersucht. Liegt einer Verbesserung durch eine solche Route vor, wird diese ans Fahrzeug zurück kommuniziert und dort in die Navigation übernommen. Auf Basis dieses Prototypens wird an verschiedenen Testfeldern die Funktion des Gesamtsystems validiert.

Die Arbeit schließt mit einer Verkehrssimulation zu Evaluierung der Auswirkungen auf das gesamthafte Verkehrsnetz. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass durch die Nutzung eines Strategischen Routings Einsparungen in der Reisezeit sowohl für die Nutzer, als auch für Verkehrsteilnehmer, welche das System nicht nutzen, erzielt werden können. Auch bei Betrachtung des Gesamtnetzes kann im Durchschnitt Reisezeit eingespart werden. Die Höhe der Einsparungen ist unter anderem von dem Ausstattungsgrad der Fahrzeuge mit dem System abhängig. In der Simulation werden bis zu einem Ausstattungsgrad von ca. 20% Einsparungen erreicht. Dabei kann eine Reduktion der Reisezeit von bis zu 23% erreicht werden. Die Simulationen zeigen aber auch, dass diese Werte sehr stark von der vorliegenden Infrastruktur und insbesondere von der Beschaffenheit der Strategie abhängig sind.

Schlagworte

Navigation, Routingalgorithmen, Verkehrsmanagement, Strategische Routen

keywords

Navigation, routing algorithms, Traffic Management, Strategic Routes

Inhaltsverzeichnis

Abstract	iii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	2
1.2 Grundidee	3
1.3 Ziel der Arbeit	3
1.4 Aufbau der Arbeit	4
2 Aktueller Stand der Forschung und Technik	5
2.1 Forschungsprojekt MoBiNet	6
2.2 Forschungsprojekt INVENT	8
2.3 Forschungsprojekt dMotion	10
2.4 Forschungsprojekt simTD	12
2.5 Traffic Management 2.0	13
2.5.1 Park und Ride Informationen der Stadt Salzburg	13
2.5.2 Better informed on the Road 2013-2023	14
2.5.3 Opus	14
2.6 Verkehrsmanagementzentralen	15
2.7 Der Mobilitäts-Daten-Marktplatz MDM	16
2.8 Entwicklung der Navigationssysteme	18
2.9 Schlussfolgerung	21
3 Grundlagen	23
3.1 Graphen	24
3.1.1 Repräsentation eines Straßennetzes als Graph	24
3.1.2 Berechnung von kürzesten Wegen in Graphen	25
3.1.3 Laufzeitoptimierung von Routenalgorithmien	31
3.1.4 Berechnung von Alternativrouten in Graphen	34
3.2 Verkehrstechnische Grundlagen	37
3.2.1 Verkehrsfluss	37
3.2.2 Verkehrsqualität	39
3.2.3 Mikroskopische Verkehrsbetrachtung	40
3.2.4 Entscheidungsmodelle	42
3.2.5 Verkehrsumlegungsmodelle	43

3.2.6	Systemoptimum versus Nutzergleichgewicht	44
4	Konzipierung der Methodik	47
4.1	Voruntersuchungen	48
4.2	Evaluierung bisheriger Verkehrsinformationssysteme	48
4.3	Ein erster Strategischer Routingservice	51
4.4	Entwicklung von notwendigen Handlungsfeldern	54
5	Entwicklung des Strategischen Routings	57
5.1	Definition von Strategie	58
5.1.1	Allgemeingültige Strategien	59
5.1.2	Trigger-Strategie	60
5.2	Evaluation der Nutzeranforderungen	62
5.2.1	Entwicklung einer Evaluierungsmethodik	62
5.2.2	Durchführung der Umfrage	63
5.2.3	Merkmalextraktion	65
5.2.4	Ranking Algorithmen	66
5.2.5	Trainingsphase	68
5.2.6	Bewertung	70
5.2.7	Weitere Verwendungsmöglichkeit	70
5.3	Der strategische Routing-Algorithmus	73
5.3.1	Berücksichtigung allgemeingültiger Strategien	73
5.3.2	Berücksichtigung von fahrtrelationsbezogenen Strategien	79
5.4	Aufbau eines Prototypen für hybrides Routing	88
5.4.1	Anforderungen	88
5.4.2	Verteilte Systeme	89
5.4.3	Dienste-orientierte Architektur	89
5.4.4	Gesamtarchitektur des Serveraufbaus	90
5.4.5	Routingengine	90
5.4.6	Fahrzeugintegration	91
5.4.7	Einbindung der Strategien	93
5.4.8	TMC-HERE-Matcher	94
5.4.9	openLR-Decoder	94
5.4.10	Strategie-Prozessor	94
5.4.11	Ablauf der Routenberechnung und Strategie-Verwaltung	95
5.5	Digitalisierung von Strategien	98
5.5.1	Standardisiertes Austauschformat für Strategien	98
5.5.2	Entwicklung eines Strategie-Editors zur Erstellung von Strategien	100
5.6	Georeferenzierung	102
5.6.1	Traffic Message Channel (TMC)	102
5.6.2	Dynamische Georeferenzierung	103

5.6.3	OpenLR	104
5.6.4	Tauglichkeit von OpenLR für Strategisches Routing	105
5.6.5	Optimierung der OpenLR-Encodierung	107
6	Anwendung und Evaluation der Ergebnisse	111
6.1	Anwendung des Routing-Systems im Testfeld Allianz Arena	113
6.1.1	Versuchsdurchführung	114
6.1.2	Ergebnisse	114
6.2	Strategievalidierung im Testfeld Düsseldorf	116
6.2.1	Bewertung der Strategie mit XFC-D-Informationen	117
6.2.2	Bildung einer Vertrauensbewertung	120
6.2.3	Konsequenzen aus der Strategie-Bewertung	121
6.3	Anwendung allgemeingültiger Strategien	122
6.3.1	Zusatzinformationen zu bestehenden Verkehrsinformationen	122
6.3.2	Vorzugsnetze	123
6.3.3	Informationen für besondere Flotten	125
6.4	Erkenntnisse aus den Testfeldern	127
7	Verkehrsflusssimulation	129
7.1	Grundlagen der Verkehrsflusssimulation	130
7.2	Verkehrsflusssimulationssoftware	131
7.3	Simulation mit einem künstlichen Straßennetz	133
7.3.1	Netzwerktopologie	134
7.3.2	Verkehrserzeugung	135
7.3.3	Verkehrsteilnehmer	135
7.3.4	Sperrungs-Szenario	137
7.3.5	Routenwahl	138
7.3.6	Anzahl an Simulationsdurchläufen	138
7.3.7	Network Performance Indikator	139
7.3.8	Simulationsdurchführung	139
7.3.9	Simulationsergebnisse	139
7.3.10	Erkenntnisse aus der Verkehrssimulation in einem künstlichen Netz	148
7.4	Simulation mit einem realen Straßennetz	149
7.4.1	Modifikation des Verkehrsnetzes	149
7.4.2	Erzeugen und Validieren der Verkehrsnachfrage	150
7.4.3	Routenwahl	151
7.4.4	Kalibrierung des Netzes	152
7.4.5	Differenzierung der Verkehrsteilnehmer	153
7.4.6	Programmerweiterung für AIMSUN	153
7.4.7	Beschreibung der Simulation	154
7.4.8	Ergebnisse der Simulation	155

7.5	Schlussfolgerung	159
8	Ausblick und Zusammenfassung	161
8.1	Ausblick	162
8.1.1	Steigende Bedeutung der Umweltbeeinflussung	162
8.1.2	Veränderungen durch hochautomatisiertes Fahren	162
8.1.3	Veränderungen durch vollautomatisiertes Fahren	163
8.1.4	Forschungsprojekt Socrates 2.0	163
8.2	Zusammenfassung	164
	Literaturverzeichnis	167

Abbildungsverzeichnis

2.1	Verkehrsbeeinflussung im Ballungsraum München [Friedrich u. a., 2002]	7
2.2	Wegepunkteverfahren im Projekt INVENT [Navteq, 2006]	8
2.3	Teilnetzverfahren im Projekt INVENT [Navteq, 2006]	9
2.4	Strategie im Projekt dMotion [Böhme et al., Amt für Verkehrsmanagement, Landeshauptstadt Düsseldorf, 2009]	10
2.5	Interaktion der unterschiedlichen ITS Partner	13
2.6	Darstellung der Meldekette von Verkehrsinformationen [Bogenberger, 2003])	19
2.7	Verkehrslagedarstellung des Dienstes "Real Time Traffic Information"(RTTI) von BMW [BMW Group Presse Club Deutschland, 2011]	20
3.1	Darstellung einer digitalen Karte als Graph [Sämann, 2011]	24
3.2	Untersuchte Kanten links: Dijkstra-Algorithmus, rechts: A*-Algorithmus	30
3.3	Verdeutlichung der untersuchten Kanten bei einem Levelswitching	32
3.4	Suchraum des normalen Dijkstra- (rot) und des bidirektionalen Dijkstra-Algorithmus (blau)	34
3.5	Choice-Routing zur Alternativroutenberechnung [Jones u. Brown, 2009]	35
3.6	Fundamentaldiagramm des Verkehrsflusses [Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), 2010]	38
3.7	Einteilung nach Level of Service [Transportation Research Board of the National Academies of Science, USA, 2000]	41
3.8	Floating Car Daten im Zeit-Weg-Diagramm	42
4.1	Visualisierung der unterschiedlichen Ergebnisse der Routenanfragen [Lerner u. Kellermann, 2010]	49
4.2	Internetseite zur Kommunikation der Sperrzeiten	52
4.3	Ergebnis der Routenanfrage mit dem Demonstrator	53
5.1	Alternativrouten im urbanen Bereich [Google LLC, 2015]	63
5.2	Darstellung der Routen bei der Nutzerumfrage [Google LLC, 2015]	64
5.3	Ranking der Routen bei der Nutzerumfrage	64
5.4	Erfasste Straßen bei der Nutzerumfrage	65

5.5	Beispielhafte Verteilung der Wahrscheinlichkeit eines Rankings . . .	68
5.6	Systemarchitektur für ein individuelles Routing nach [Park u. a., 2007]	71
5.7	Wichtung der einzelnen Parameter der Routenbewertung	72
5.8	Lage der Trigger-Strategien im Suchbaum	80
5.9	Lage der Trigger-Strategien im Suchbaum der Rückwärtssuche . . .	81
5.10	Ablauf des Strategischen Routings für harte Trigger	82
5.11	Ablauf des Strategischen Routings mit Erweiterung der Suchbäume	84
5.12	A*-Algorithmus mit erweiterten Suchbäumen	87
5.13	Architektur des Routingservers	91
5.14	Fahrzeugdarstellung des hybriden Routings	92
5.15	Ablaufdiagramm des Strategie-Imports	96
5.16	Ablaufdiagramm von Routenanfragen	97
5.17	Erweiterung des Datex-II Schemas um Strategien	99
5.18	Benutzeroberfläche des Strategieeditors	100
5.19	TMC Location Codes im Münchner Norden [Pollesch, 2011]	102
5.20	Location Reference Points von OpenLR	104
5.21	OpenLR Fehler durch unterschiedliche Distanzangaben	106
5.22	Feine topologische Unterschiede	107
5.23	Missmatch eines OpenLR Points	107
5.24	Unterschiedliche Attributierung der betrachteten Karten am Beispiel FRC	108
6.1	links: Wechselverkehrszeichen zur AllianzArena, rechts: Lage der Allianz Arena im Münchner Norden	113
6.2	Vorschlag der Strategischen Route im Navigationssystem des Versuchsträgers	115
6.3	Die übernommene Strategische Route	115
6.4	Verteilung von Detektoren im Stadtgebiet Düsseldorf	117
6.5	dMotion Strategie 271378101377	118
6.6	Geschwindigkeitsmessungen der betroffenen Detektoren	119
6.7	Durch FCD ermittelte Geschwindigkeiten	120
6.8	Anwendungsbeispiel für eine allgemeingültige Strategie	123
6.9	Rote Routen der Stadt München [Landeshauptstadt München, Referat für Stadtplanung und Bauordnung, 2005]	124
6.10	Fahrstreifen für die Olympische Flotte in London [MGN Ltd., 2011]	125
6.11	Adaption der Olympic Route in einem BMW-Navigationssystem . . .	126
7.1	Verwendetes künstlich erzeugtes Straßennetz	134
7.2	Zeitlich verteilte Verkehrsstärke	135
7.3	Sperrung und statische Routen im erste Verkehrsnetz	137
7.4	Durchschnittliche Reisezeit der Szenarien mit und ohne RTTI	140

7.5	Durchschnittliche Reisezeit der Szenarien mit strategischem Routing	141
7.6	Prozentuale Abweichungen der Gesamtreisezeit bezogen auf das Szenario ohne Strategien	143
7.7	Gesamtreisezeitverluste je Szenario	144
7.8	Durchschnittliche Reisezeitveränderung je Fahrzeuggruppe bezogen auf die durchschnittliche Reisezeit je Fahrzeuggruppe ohne Strategien	145
7.9	Durchschnittliche Reisezeitveränderung je Fahrzeuggruppe bezogen auf die durchschnittliche Reisezeit ohne Strategien	146
7.10	Durchschnittliche Reisezeit je Start-Ziel-Beziehung	147
7.11	Tagesganglinie der in der Simulation verwendeten Verkehrsnachfrage [Matschke, 2007]	150
7.12	Gegenüberstellung der Verkehrsdichte aus der Simulation und der real aufgetretenen Geschwindigkeit [Google LLC, 2015]	152
7.13	Strategische Routen und Sperrung im Simulationsnetz	155
7.14	Durchschnittliche Reisezeit gemittelt über alle Fahrzeuge	156
7.15	Durchschnittliche Fahrstrecke gemittelt über alle Fahrzeuge	156
7.16	Durchschnittliche Reisezeit der PKW des Fernverkehrs	157
7.17	Durchschnittliche Fahrstrecke der PKW des Fernverkehrs	157

Tabellenverzeichnis

7.1	Mittlere Reisezeiten je Szenario	142
7.2	Gesamtreisezeitverluste je Szenario	143
7.3	Durchschnittliche Reisezeit je Fahrzeuggruppe	145

Abkürzungsverzeichnis

ABDS	Autobahndirektion Südbayern
ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobil-Club
AIDA	Automatic Incident Detection Algorithm
AIT	Austrian Institute of Technology
API	Application Programming Interface
BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen
BMW	Bayerische Motoren Werke
DAB	Digital Audio Broadcasting
DCG	Discounted cumulative gain
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
dMotion	Düsseldorf in Motion - Forschungsprojekt
DTV	Durchschnittliche tägliche Verkehrsmenge
dWiSta	Dynamischer Wegweiser mit integrierten Stauinformationen
ERTICO	European Road Transport Telematics Implementation Coordination Organisation
FCD	Floating Car Data
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
FOW	Form of Way
FRC	Functional Road Class
FTP	File Transfer Protocol
GIP	Graphen Integrations Plattform
ID	Identifikator
IDCG	Ideal Discounted Cumulative Gain
INVENT	Intelligenter Verkehr und Nutzergerechte Technik - <i>Forschungsprojekt</i>
IVH	Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau Hannover
IVS	Institut für Verkehr und Stadtbauwesen Braunschweig
HBS	Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen
LRP	Location Reference Point
LSA	Lichtsignalanlage
MDM	Mobilitätsdatenmarktplatz
MoBiNet	Mobilität im Ballungsraum München - <i>Forschungsprojekt</i>
NDCG	Normalized discounted cumulative gain
NIV	Netzausgleich Individualverkehr - <i>Teilprojekt von INVENT</i>
OCIT	Open Communication Interfaces for Road Traffic Control Systems
OD	Origin-Destination - <i>Start-Ziel-Beziehung</i>
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
OTS	Open Traffic Systems - <i>Standardisiertes Austauschformat</i>
PKW	Personenkraftwagen

PTV Planung Transport Verkehr - *Softwareunternehmen*
RDS Radio Data System
RTTI Realtime Traffic Information
SAM Strategiemanager - *Software entwickelt im Forschungsprojekt MoBiNet*
simTD Sichere Intelligente Mobilität Testfeld Deutschland - *Forschungsprojekt*
SOA Serviceorientierte Architektur
TEC Traffic Event Compact
TFP Traffic Flow and Prediction
TISA Traveller Information Services Association
TM 2.0 Traffic Management 2.0 - *Europäische Initiative*
TMC Traffic Message Channel
TPEG Transport Protocol Experts Group
TSS Transport Simulation Systems - *Softwareunternehmen*
VMZ Verkehrsmanagementzentrale
WGS'84 World Geodetic System 1984
WVZ Wechselverkehrszeichen
XFCD Extended Floating Car Data
XML Extensible Markup Language
ZVM Zentralstelle Verkehrsmanagement der Stadt München

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Straßenkarte aus Papier kann bereits als Relikt der Vergangenheit bezeichnet werden, da immer mehr Navigationsgeräte, sowohl mobile, als auch bereits fest eingebaute Modelle in Automobile Einzug halten. Auch eine dynamische Zielführung zur Meidung von Stausituationen ist heute bereits standardmäßiger Bestandteil einer Vielzahl moderner Navigationsgeräte. Dennoch gehören Staus, sowohl auf Autobahnen, als auch innerstädtisch weiterhin zu Alltagssituationen vieler Autofahrer. Der Allgemeine Deutsche Automobil Club (ADAC) gibt sogar den Navigationssystemen eine Mitschuld bei der Verursachung von Staus [Brieter et al., 2010]. Vor allem beim Umfahren von Autobahnstaus würden Navigationsgeräte Routen vorschlagen, welche die zusätzliche Verkehrsmenge nicht aufnehmen könnten und somit entstünden weitere Staus.

In der Tat wurden 2011 rund 83% der Staustunden durch Überlastungen der Infrastruktur ausgelöst [Wiebel, 2012]. Dies liegt oftmals an der stetig steigenden Verkehrsnachfrage. Diese Situation wird sich auch in Zukunft weiter verschärfen. So wird davon ausgegangen, dass der Kraftfahrzeug-Bestand bis 2030 um weitere 8,5% steigen wird. Hierdurch wird die Verkehrsleistung des Individualverkehrs um rund 10% zunehmen [Schubert et al., 2014]. Noch stärkere Auswirkungen auf die Verkehrssituation werden durch den Güterverkehr prognostiziert. Die Transportleistung im Güterverkehr wird bis 2030 voraussichtlich um rund 38% steigen. Diese Zahlen verdeutlichen, dass die Infrastruktur zukünftig einer deutlich höheren Belastung widerstehen muss und es bedarf vielerorts einer Steigerung der vorhandenen Kapazität. Dieser Handlungsbedarf ist auch Verkehrsbetreibern bekannt. Jedoch ist es in vielen Fällen, vorwiegend innerorts, auf Grund der historisch gewachsenen Baulage der Infrastruktur nicht möglich, die Kapazität durch einen Ausbau zu steigern. Erreicht ein Verkehrssystem an diesen Orten seine Kapazitätsgrenze, so muss zumeist auf verkehrstechnische Maßnahmen zur Vermeidung von Überstauungen zurückgegriffen werden. Eine Möglichkeit besteht in kapazitätssteigernden Maßnahmen, wie Fahrstreifenfreigaben oder Anpassung der Schaltprogramme der Lichtsignalanlagen. Zusätzlich kann Verkehr auf Alternativrouten mit ausreichend Kapazität umgeleitet werden. Diese Maßnahmen werden dem Verkehrsteilnehmer in der Regel via Wechselwegweisern oder Rundfunk kommuniziert. Eine Übertragung, auch in aktuelle Navigationsgeräte, erfolgt nach heutigem Stand meist nicht. Genau diese autarke Vorgehensweise führt oftmals zu Problemen bei den Infrastrukturbetreibern. Ein Verkehrsteilnehmer folgt, vor allem in ihm unbekanntem Gebieten, stets den Anweisungen des Navigationsgerätes, ohne diese zu hinterfragen. Die Verkehrsstrategien eines Straßenbetreibers bleiben somit unbeachtet oder stehen eventuell sogar im Konflikt zu den Informationen des Navigationssystems. Die Integration der Verkehrss-

strategien in die Routenführung des Navigationssystems kann an dieser Stelle von gegenseitigem Nutzen sein. So würde den Verkehrsbetreibern ein stärkerer Einfluss auf die Verkehrsteilnehmer ermöglicht werden, welche wiederum von dem lokalen Wissen der Verkehrsbetreiber profitieren können.

1.2 Grundidee

Zukünftig werden Verkehrsbetreiber verstärkt Einfluss auf die Steuerung der Verkehrsteilnehmer nehmen müssen. Neben der Bewältigung zusätzlichen Verkehrsaufkommens mit der aktuellen Infrastruktur, werden auch weitere Ziele notwendig, wie beispielsweise die Einhaltung von Umweltrichtlinien [Boltze u. a., 2008]. Im Rahmen dieser Arbeit wird untersucht, welche Schritte bis zu einer Integration von Verkehrsmanagementmaßnahmen in die Routenführung eines Navigationssystems notwendig sind. Neben diversen organisatorischen Problemen, welche in dieser Arbeit weitgehend unberücksichtigt bleiben, sind vor allem unterschiedliche wissenschaftliche und technische Fragestellungen offen. Auch die Auswirkungen, welche die Nutzung eines solchen Systems sowohl auf Individualfahrzeuge, als auch für das Gesamtverkehrssystem darstellt, ist zu untersuchen. Diese Arbeit ermittelt und untersucht zunächst die notwendigen Schritte bis zu einer prototypischen Umsetzung eines strategischen Routings (vgl. Kapitel 5.1). Hierzu werden Methodiken und Algorithmen entwickelt, um Strategien in eine Routensuche integrieren zu können. Diese werden in einen prototypischen Fahrzeugdemonstrator integriert. Des Weiteren werden die Auswirkungen sowohl auf die individuelle Zielführung eines Individualfahrzeugs an unterschiedlichen Feldtests, als auch die Auswirkungen auf das Gesamtverkehrssystem durch eine mikroskopische Verkehrsflusssimulation untersucht.

1.3 Ziel der Arbeit

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung aller notwendigen Bausteine eines Strategischen Routings ohne dabei Vereinfachungen zu treffen, welche einer Umsetzung im Wege stehen. Auf Basis dieser Ansätze und Untersuchungen sollen sowohl Verkehrsbetreiber, als auch Navigationsdienstleister aufbauen können, um ein solches System in die Serie zu überführen.

Die Thematik der Verbesserung der Routenführung eines Navigationssystems kann beliebig komplex betrachtet werden. In dieser Arbeit wird der Fokus auf die Entwicklung eines neuartigen Routingansatzes gelegt, welcher zusätzliche Daten

von lokalen Verkehrsbetreibern in die Navigation integriert. Eine Verbesserung der Routenführung kann ebenfalls durch weitere Maßnahmen, wie die Verbesserung von Erfassung, Kommunikation und Interpretation der Verkehrsinformationen, erreicht werden. Eine Optimierung des Verkehrssystems kann beispielsweise auch durch die Verlagerung des Verkehrs auf unterschiedliche Verkehrsmodalitäten (Intermodales Routing) erreicht werden. Diese und ähnliche Themen werden im Rahmen dieser Arbeit nicht vertieft.

1.4 Aufbau der Arbeit

Diese Arbeit gliedert sich in acht Kapitel. In Kapitel 2 wird zunächst der aktuelle Stand der Forschung und Technik aufgezeigt, um die Ausgangslage für die folgenden Untersuchungen und Entwicklungen darzulegen. Anschließend werden in Kapitel 3, zum besseren Verständnis der folgenden Kapitel, notwendige Grundlagen erläutert. Kapitel 4 schildert eine kleine Voruntersuchung, welche zur Identifizierung der notwendigen Handlungsfelder dient. Durch diese Handlungsfelder wird eine Methodik zur Untersuchung der Thematik entwickelt. Deren Umsetzung wird in Kapitel 5 detailliert behandelt. In Kapitel 6 werden anschließend die Auswirkungen der Verfügbarkeit eines solchen Systems an unterschiedlichen Testfeldern untersucht. Kapitel 7 schildert die Untersuchung der Auswirkungen auf das Gesamtsystem mit Hilfe einer Verkehrsflusssimulation. Geschlossen wird die Arbeit mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick in Kapitel 8.

2 Aktueller Stand der Forschung und Technik

2.1 Forschungsprojekt MoBiNet

Das Forschungsprojekt "Mobilität im Ballungsraum München"(MoBiNet) untersuchte bereits 1998 bis 2003 mit unterschiedlichen Partnern aus Behörden, Universitäten und der Wirtschaft intelligente und kooperative Verkehrsmanagementmaßnahmen [MOBINET-Partner, 2003]. Der Untersuchungsraum umfasste dabei sowohl den Autobahnring (A99) um München, als auch den Mittleren Ring (B2R) im Stadtgebiet. Zur Generierung von Fahrempfehlungen im Rahmen des Forschungsprojektes wurden die Messwerte von 600 Detektoren auf Autobahnen und weiteren 1.400 innerstädtischen Messpunkten genutzt. Das System wurde allerdings so konzipiert, dass zukünftig weitere Datenquellen zum Beispiel Bewegungsdaten von Mobiltelefonen oder Fahrzeugen (sogenannte Floating Car Data - FCD) angeschlossen werden könnten. Entwickelt wurde eine strategische Steuerung für den Motorisierten Individualverkehr (SAM), welche zentral Daten sammelt und auf dessen Basis strategische Empfehlungen trifft. Dazu wurden unterschiedliche zuvor ausgearbeitete und verkehrsrechtlich abgestimmte Szenarien mit der aktuellen Verkehrssituation verglichen und auf Tauglichkeit überprüft. Die beste Strategie wurde anschließend einem Operator zur Aktivierung vorgeschlagen. Die Kommunikation der getroffenen Maßnahmen an den Fahrer erfolgte über mehrere Schilderbrücken, sowie neu entwickelte Stauinfotafeln, welche den Stauzustand auf dem Mittleren und dem Autobahn-Ring illustrierten (vgl. Schilderdarstellung in Abb 2.1).

Ziel der Strategien AIDA (Automatic Incident Detection Algorithm) war es, mit unterschiedlichen Maßnahmen den Verkehr bestmöglich über das Verkehrsnetz zu verteilen. Zu diesen Maßnahmen zählten unter anderem

- Alternativrouten,
- Zuflussoptimierungen,
- adaptive Lichtsignalsteuerungen,
- ereignisorientierte Netzsteuerungen,
- dynamische Fahrstreifensignalisierungen und
- Vorzugsnetze.

Diese Maßnahmen dienten dazu, den Verkehr entweder auf Straßen zu lenken, welche noch über ausreichend Kapazität verfügten (zum Beispiel durch Alternativrouten) oder gezielt die Kapazität von Straßenabschnitten in die benötigte Richtung zu erhöhen (zum Beispiel durch Lichtsignalsteuerung). Innovativ an dem Forschungsprojekt MoBiNet war vor allem diese Integration unterschiedlichster Maßnahmen in den Entwicklungsprozess der Strategien.

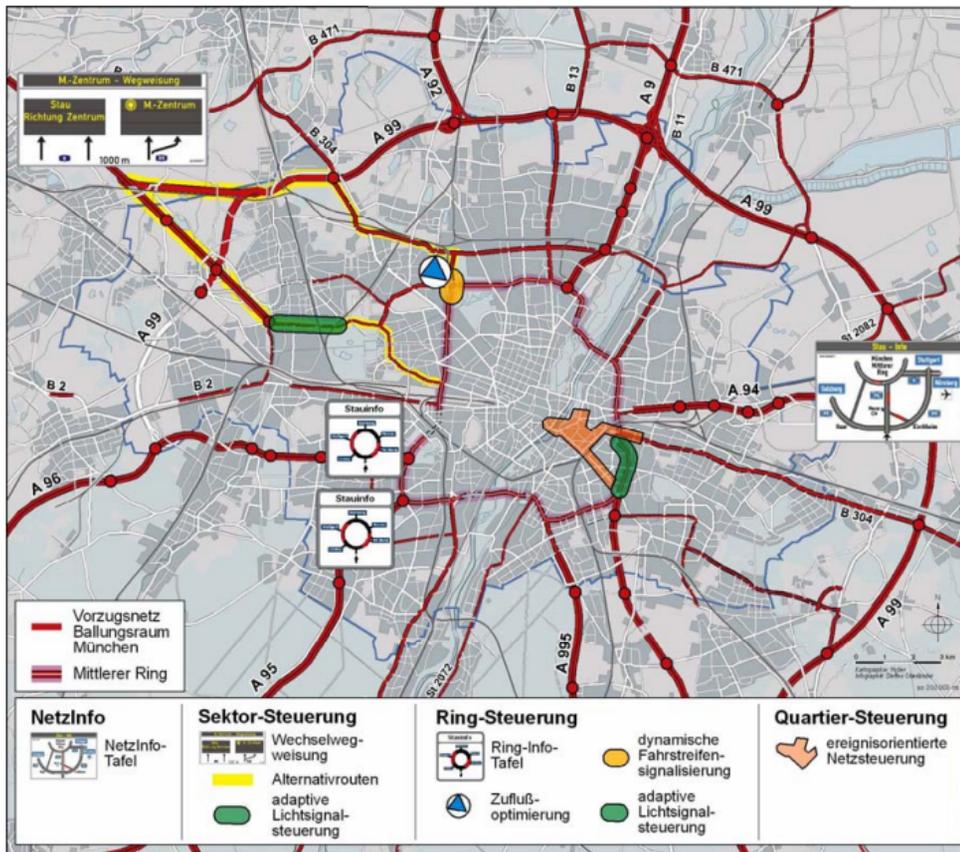


Abbildung 2.1: Verkehrsbeeinflussung im Ballungsraum München [Friedrich u. a., 2002]

2.2 Forschungsprojekt INVENT

Das Forschungsprojekt INVENT (Intelligenter Verkehr und Nutzergerechte Technik), gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung, mit einer Laufzeit von 2001 bis 2005, beinhaltete ein Teilprojekt „Netzausgleich Individualverkehr“ (NIV), welches zwei unterschiedliche Herangehensweisen zum strategischen Routing untersuchte. Dabei wurden ein Wegepunkteverfahren und ein Teilnetzverfahren entwickelt. Das Teilnetzverfahren nutzte dabei die Datenübertragung zum Fahrzeug via digitalem Hörfunk (DAB). Beim Teilnetzverfahren wurde die Routenanfrage an einen Server weitergeleitet, welcher auf Basis der dort vorliegenden erweiterten Wissensbasis eine bessere Route berechnete und diese über Wegepunkte ans Fahrzeug kommunizierte [Bogenberger u. Neuherz, 2006].

Abbildung 2.2 zeigt die Auswirkung beim Einsatz des Wegepunkteverfahrens. Im linken Abschnitt ist die herkömmliche Route des Navigationssystems zu sehen, welche auf Grund des eingezeichneten Staus berechnet wurde. Die Ausweichroute führt dabei durch einen nicht durch Verkehrsinformationen erfassten Bereich. Im rechten Bild wird die „Strategische Route“ gegenübergestellt, welche auf Basis einer „zentralen Wissensbasis“ [Bogenberger u. Neuherz, 2006] berechnet wurde. Ebenfalls ersichtlich sind die Wegepunkte, welche an das Fahrzeug kommuniziert worden sind.

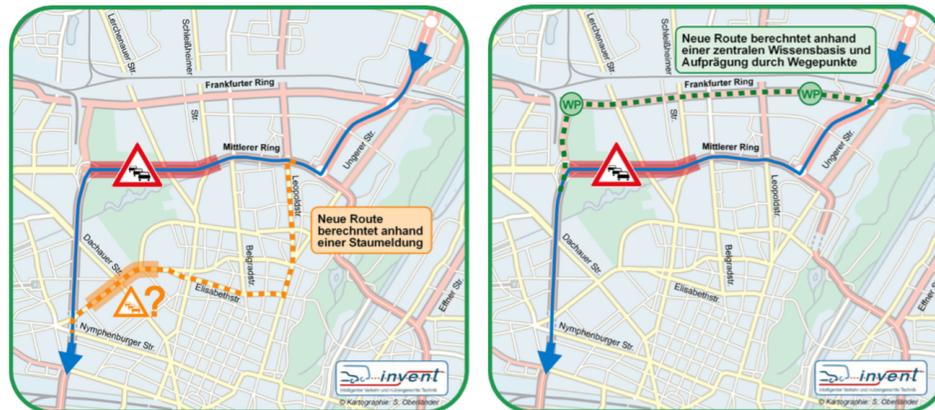


Abbildung 2.2: Wegepunkteverfahren im Projekt INVENT [Navteq, 2006]

Als besondere Herausforderungen im Projekt wurde unter anderem die Wahl der Wegepunkte identifiziert und daher die Verwendung eines Georeferenzierungsverfahrens empfohlen. Die Route wurde vorab ermittelt und ist nicht ohne Weiteres veränderbar, da sie im Demonstrator statisch vorversorgt wurde und nur für entsprechende Fahrbeziehungen ausgeliefert wird.

Abb. 2.3 verdeutlicht die Idee hinter dem Teilnetzverfahren. Bei dieser Herangehensweise wird für einen bestimmten Bereich eine neue Kartenebene, der sogenannte Kartenlayer erstellt, welcher neben den Verkehrsinformationen auch Strategien berücksichtigt. Als Strategien werden dabei definierte Routen bzw. Routenabschnitte und deren Umfahrungen bezeichnet. An dieser Stelle werden Navigationsgeräte unterschiedlicher Generationen unterschieden. Die erste Generation sind demnach Navigationsgeräte, welche rein auf statischem Kartenmaterial routen, die zweite Generation ist in der Lage dynamische Verkehrsinformationen zu berücksichtigen und die dritte Generation ermöglicht es ein dynamisches Netz zu nutzen. Das neue Teil-Netz-Update wird dabei jeweils über DAB bereitgestellt [Navteq, 2006].

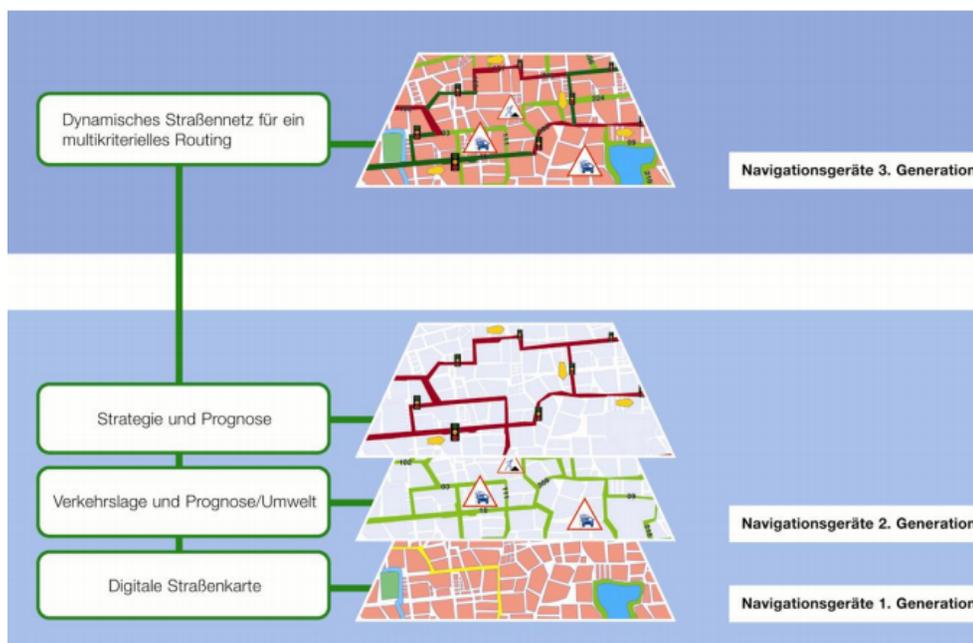


Abbildung 2.3: Teilnetzverfahren im Projekt INVENT [Navteq, 2006]

Das Projekt INVENT ist besonders von Interesse, da es erstmals auch eine Integration ins Fahrzeug und an portable Endgeräte betrachtet und dabei zwei grundlegend unterschiedliche Verfahren vorstellt. Diese werden in dem Kapitel 5.4 näher betrachtet.

2.3 Forschungsprojekt dMotion

Das Projekt Düsseldorf in Motion (dMotion) hatte eine Projektlaufzeit von 2005 bis 2009 und wurde gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. In dem Arbeitspaket 300 „Baulastträgerübergreifendes Strategiemangement“ wurden erste notwendige Schritte für die Umsetzung eines *Strategischen Routings* mit öffentlichen und privaten Baulastträgern unternommen. Das sehr weitgreifende Projekt umfasste sowohl die Erstellung der Strategien, als auch deren Kommunikation und Anzeige auf dWiSta (Dynamischer Wegweiser mit integrierten Stauinformationen) und Variotafeln und die Integration ins Fahrzeug [Gevas Software GmbH, 2009]. Im Rahmen des Projekts wurde eine Detailplanung für 23 hoheitliche und baulastträgerübergreifende Strategien durchgeführt. Die Detailplanung umfasste dabei unter anderem die Abstimmung mit allen beteiligten Organisationen, die Definition der Auslöse- und Rücknahmebedingungen einer Strategie, die Anpassung der Infrastruktur auf die Strategien und die standardisierte Digitalisierung der Strategiedaten [Böhme et al., Amt für Verkehrsmanagement, Landeshauptstadt Düsseldorf, 2009].

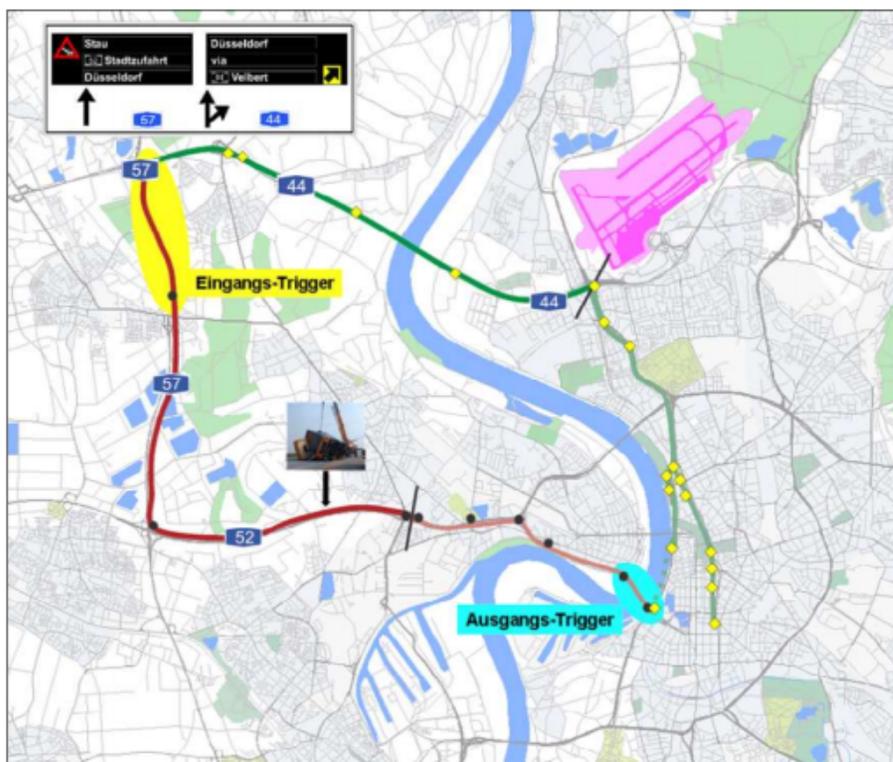


Abbildung 2.4: Strategie im Projekt dMotion [Böhme et al., Amt für Verkehrsmanagement, Landeshauptstadt Düsseldorf, 2009]

Für jede Strategie wurde eine Hauptroute mit einem Start- und einem Zielabschnitt definiert, welche als Bedingung zur Auslösung für eine Strategie angesehen wurde. Wenn ein Fahrzeug eine Route geplant hatte, welche diese beiden Abschnitte beinhaltete, wurden bis zu zwei zuvor festgelegte Alternativen angeboten. Abbildung 2.4 zeigt in Rot die Hauptroute mit den beiden Triggern in Gelb und Blau. Zwei Alternativrouten, welche über Wegepunkte (gelbe Punkte) führen, werden in Grün dargestellt. Für die Kommunikation der Strategien wurde der Open Traffic Systems (OTS) 2.0 [Open Traffic Systems City Association, 2017] Standard verwendet. Dabei handelt es sich um eine, im Rahmen des Projekts weiterentwickelte Version von OTS. Das Protokoll wird durch eine XML-Struktur festgelegt und referenziert Routen mittels TMC-Locations (Traffic Message Channel - vgl. 5.6.1). Zur Berechnung der aktuellen Verkehrslage wurden dynamische (unter anderem Detektordaten) und statische Daten (unter anderem historische Verkehrsdaten und Verkehrsleitpläne) fusioniert. Auf Basis dieser Verkehrslage wurde anschließend die Schaltung von Strategien zur Steuerung des Verkehrsflusses vorgenommen [Schmidt u. Hoffmann, 2010].

Besonders erwähnenswert an diesem Projekt ist die ganzheitliche Betrachtung der Problemstellung eines Strategischen Routings. So wurden neben den rein technischen Aspekten, welche unter anderem das Einrichten der Kommunikationsketten, Digitalisierung der Strategien und der Integration ins Fahrzeug umfassten, auch viele organisatorische Hürden erstmals untersucht und überwunden. Die Verwendung eines einheitlichen Kommunikationsstandards und die Regelung der Kooperation und Priorisierung der Strategien unterschiedlicher Baulastträger ist wegweisend für zukünftige Projekte dieser Art.

2.4 Forschungsprojekt simTD

Die Untersuchungen im Forschungsprojekt simTD [Weiß et al., 2013] konzentrierten sich vor allem auf die Fragestellung, inwieweit die Kommunikation von erweiterten Verkehrsmeldungen über die Infrastruktur ins Fahrzeug (sogenannte Car-to-X Kommunikation) möglich ist. Hierzu installierten simTD-Experten im gesamten Versuchsgebiet mehr als 100 Kommunikationsmodule am Straßenrand, sogenannte Roadside-Units: 80 an Autobahnen und Bundesstraßen im Rhein-Main-Gebiet sowie 23 an Lichtsignalanlagen (LSA) im Stadtgebiet Frankfurt am Main. Neben den Roadside-Units wurde eine simTD-Versuchszentrale auf dem Gelände der Verkehrszentrale Hessen eingerichtet, welche als zentraler Knotenpunkt der Kommunikation diente. Darüber hinaus wurden mehrere simTD-Fahrzeuge mit zusätzlichen Sensoren ausgestattet, welche es ermöglichten, Verkehrseignisse wie Staus oder gefährliche Fahrsituationen (z. B. Glätte) zu erkennen und sowohl an andere Fahrzeuge (Car-to-Car) und an die Roadside-Units zu kommunizieren. Im Zeitraum von Juli bis Dezember 2012 wurde ein großer Feldversuch mit über 41.000 Versuchsstunden insgesamt über 1,6 Millionen Fahrkilometer absolviert. Die Ergebnisse des Versuchs zeigen, dass vor allem auf Autobahnen Car-to-X eine valide Möglichkeit zur Kommunikation der Daten darstellt [Weiß et al., 2013]. Sowohl Fahrzeuge, welche mit der neuen Technologie ausgestattet wurden, als auch andere Fahrzeuge profitierten von verbesserten Reisezeiten. Es ist damit die Tendenz zum Systemoptimum, also den Zustand, bei dem die Summe der Verluste im gesamten Verkehrsnetz minimal ist (vgl. Kapitel 3.2.6), zu beobachten.

Die zukünftigen Entwicklungen auf diesem Gebiet werden zeigen, ob sich ein Car-to-X bzw. car-to-car Ansatz durchsetzen kann. Sehr nachteilig sind die hohen Investitionskosten des Car-to-X Ansatz, welche aus einer enorm aufwändigen Ausrüstung der Infrastruktur resultieren. Dem gegenüber steht der Ansatz der Kommunikation mit einem zentralen Server via Mobilfunk. Da bei diesem Ansatz keine Infrastrukturaufrüstungen nötig werden, wird im Rahmen dieser Arbeit eine Fahrzeug-Server-Kommunikation Anwendung finden. Für die Entwicklungen und Untersuchungen dieser Arbeit steht die Art der Datendarreichung jedoch im Hintergrund und könnte ebenso auf einer Kommunikation der Daten durch Car-to-X Technologien erfolgen.

2.5 Traffic Management 2.0

Eine Erkenntnis aus den genannten Forschungsprojekten ist, dass ein strategisches Routing oder der Austausch von komplexeren Verkehrsinformationen im Allgemeinen nur durch Zusammenarbeit verschiedener Parteien entlang der ganzen Wertschöpfungskette möglich sind. Vor diesem Hintergrund wurde unter der Schirmherrschaft der ERTICO die aktuell noch laufende (Stand 2019) Initiative „Traffic Management 2.0“ (TM 2.0) gegründet.

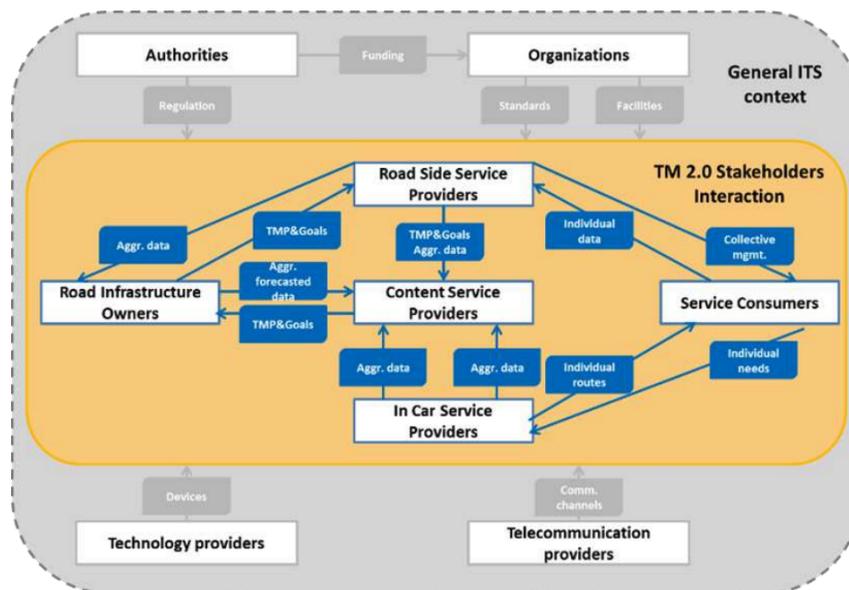


Abbildung 2.5: Interaktion der unterschiedlichen ITS Partner

Abbildung 2.5 zeigt die notwendige, komplexe Struktur des Zusammenspiels, für dessen Austausch zwischen den unterschiedlichen Partnern die Initiative eine Plattform bilden soll [Rodrigues et al., 2016]. Traffic Management 2.0 gliedert sich in unterschiedliche Task-Forces, in welchen Service Provider, Navigationsdienstleister, öffentliche Behörden und Forschungsinstitutionen an konkreten Anwendungsfällen zusammenarbeiten.

2.5.1 Park und Ride Informationen der Stadt Salzburg

Vorwiegend an Wochenenden sorgen Besucherströme in der Stadt Salzburg regelmäßig für eine Überlastung des innerstädtischen Verkehrs. Um dies zu verhindern muss eine Strategie der Verkehrsverlagerung angestrebt werden. Hierzu wurden Sonderbuslinien von relevanten Park-&-Ride Stationen eingerichtet, um die

Touristen zur Verwendung der öffentlichen Verkehrsmittel zu bewegen. Diese Maßnahme bleibt allerdings fast wirkungslos, da die Touristen auf ihre Navigationsgeräte vertrauen, welche nicht über die Alternativen ÖPNV Angebote informieren. In dieser Task-Forcen arbeiten die zuständigen Behörden der Stadt Salzburg zusammen mit den Verkehrsbetreibern, Navigations Providern sowie Service Providern daran, eine Ende-zu-Ende Kommunikation der ÖPNV-Stationen und Abfahrzeiten in Echtzeit bis in die Endgeräte zu erreichen.

2.5.2 Better informed on the Road 2013-2023

Das niederländische Verkehrsministerium hat das Aktionsprogramm "Better informed on the Road 2013-2023" ins Leben gerufen, um einen offenen Standard zur Kommunikation von erweiterten Verkehrsinformationen zu ermöglichen. In diesem Rahmen wurde das Protokoll DVM-Exchange [Vrancken et al., 2012] entwickelt, welches sowohl inhaltlich, als auch technische Standardisierungen für unterschiedliche Verkehrsinformationen liefert. Hierüber hinaus wurde in Helmond ein „Traffic Innovation Centre“ gegründet, welches Informationen auf der Autobahn A58 erfasst und diesem Protokoll kommuniziert. Studien sollen zeigen, ob Geschwindigkeitsempfehlungen, welche im Fahrzeug angezeigt werden, die Bildung von Stauwellen, welche wiederum zur Überlastung der Autobahn bei Eindhoven führen, verhindern werden können.

2.5.3 Opus

Im Rahmen des Projektes Opus [Bundesanstalt für Straßenwesen, 2015] wurden von dem Hessischen Verkehrsbetreiber Hessen Mobil, Momatec und TomTom zwei Konzeptpapiere entwickelt. Hierzu wurde das unterschiedliche Routingverhalten von Verkehrsbetreibern und Navigations Providern gründlich analysiert. Das entstandene strategisches Konzept schlägt die Kooperation unterschiedlicher Partner vor, da nur so eine stratetisches Routing erreicht werden kann. Ein technisches Konzept beschreibt Überlegungen zu Schnittstellen und Formaten, die hierzu benötigt werden. Die entwickelten Überlegungen sollen anhand eines Feldtests erprobt werden und anschließend in eine Produktentwicklung einfließen.

2.6 Verkehrsmanagementzentralen

Jede deutsche Großstadt verfügt über eine Vielzahl unterschiedlicher Verkehrsinfrastrukturkomponenten, welche zur Regelung des bisweilen hoch komplexen Verkehrssystems eingesetzt werden. Die Koordination all dieser Komponenten obliegt den Verkehrsmanagementzentralen (VMZ). Diese Zentralen sind – genau wie die Städte selbst – über viele Entwicklungen gewachsen und daher von Stadt zu Stadt sehr unterschiedlich. An dieser Stelle sei nur ein kurzer Überblick über einige Technologien gegeben, um ein grundlegendes Verständnis zur Entstehung von Verkehrsstrategien zu erlangen. Nach [Sandrock u. Riegelhuth \[2014\]](#) zählt zu den Hauptaufgaben der Verkehrsmanagementzentralen

- die Koordination und das Management bei Veranstaltungen und Baustellen,
- die Ausweisung von Alternativrouten,
- eine emissionsabhängige Verkehrssteuerung und
- die Reduzierung von Staus und die Verbesserung des Gesamtverkehrsablaufs.

Eine wichtige Rolle spielt die Datenerfassung und Situationserkennung, wozu Detektoren unterschiedlicher Art eingesetzt werden. Anwendung finden zumeist Magnetfeldsensoren, optische Videodetektoren, sowie Ultraschall- oder Radardetektoren [[Sandrock u. Riegelhuth, 2014](#)]. Einige Städte, wie beispielsweise Dresden, binden auch Flotten kommunizierender Fahrzeuge, welche sogenannte Floating Car Data senden, zur Datenerfassung ein [[Franke, et al., 2010](#)]. Auf Basis der erfassten Daten ist es den Städten möglich mit Hilfe von detaillierten Verkehrsumlegungsmodellen und Verkehrssimulationen Rückschlüsse auf die Entwicklung des Verkehrszustandes zu ziehen. Durch das vorhandene lokale Wissen einer Stadt ist es zusätzlich möglich, Besonderheiten oder Detailwissen über das übliche Verkehrsverhalten zu berücksichtigen und in geeigneten Maßnahmen zu berücksichtigen. Die Regelung und Überwachung des Verkehrszustandes erfolgt aus einer Verkehrsmanagementzentrale heraus, in welcher interdisziplinär zwischen Straßenbetreibern, Meldezentralen, Betreibern des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) und teilweise auch der Polizei zusammen gearbeitet wird [[Transport for London, 2007](#)]. In der Zentrale werden Verkehrslagen erfasst und bewertet, um anschließend Maßnahmen abzustimmen, umzusetzen und zu überwachen. Zu solchen Maßnahmen zählen im Wesentlichen:

- Netzbeeinflussung mittels dynamischer Wegweiser oder (dynamischer) Informationstafeln
- Streckenbeeinflussung über Lichtsignalsteuerung oder Streckenbeeinflussungsanlagen (zum Beispiel durch Fahrstreifenfreigaben oder dynamischer Geschwindigkeitsregulierung)

- Knotenbeeinflussung über Lichtsignalsteuerung
- ÖPNV-Bevorrechtigung
- Umweltgerechte Steuerung
- Parkleitsysteme
- Kommunikation von Verkehrsmeldungen

Die meisten der größeren deutschen Städte verfügen über Verkehrsmanagementzentralen zur Steuerung des Verkehrs. Eine Verkehrsmanagementzentrale steht einer großen Herausforderung gegenüber, da das System an viele Komponenten aus unterschiedlichsten Generationen angeschlossen werden muss. Die Verkehrsinfrastruktur unterliegt nur einem sehr langsamen Wandel. Viele Komponenten, wie zum Beispiel Beschilderungsanlagen oder Lichtsignalanlagen aus unterschiedlichen Jahrzehnten, müssen nebeneinander eingegliedert funktionieren. Des Weiteren unterliegen VMZ einem sehr hohen Sicherheitsstandard, da besonders sicherheitskritische Schaltungsaufgaben (zum Beispiel bei Lichtsignalanlagen (LSA)) übernommen werden. Um Angriffe aus dem Internet zu verhindern, existieren bei einigen VMZ daher keine öffentlichen Schnittstellen zur Steuerung oder Kommunikation mit sicherheitskritischen Systemen. Dem gegenüber steht aktuell eine sich rasant entwickelnde Consumer-Elektronik-Branche, welche die VMZ in einem zum Teil anachronistischen Licht erscheinen lassen. Diesen Fakten ist es geschuldet, dass eine Kommunikation von Verkehrsdaten direkt aus der Verkehrsmanagementzentrale nicht trivial und oft mit hohem Aufwand verbunden ist.

2.7 Der Mobilitäts-Daten-Marktplatz MDM

Der Mobilitätsdatenmarktplatz (MDM) ist aus einer Innovationsinitiative der Bundesregierung und des daraus geförderten Projektes Metadatenplattform Verkehrsdaten des Individualverkehrs entstanden. Der MDM verfolgt das Ziel, eine einheitliche Plattform zu bieten, über welche Verkehrsdaten von Serviceanbietern, der öffentlichen Hand, Rundfunkanstalten und anderen Verwendern ausgetauscht werden können [[Bundesanstalt für Straßenwesen, 2010](#)]. Neben der rein technischen Plattform verfolgt der MDM weiterhin das Ziel, die Standardisierung von Austauschformaten voranzutreiben und ein einheitliches Rechteverwaltung bereitzustellen, über welches die Empfänger autorisiert werden können. Anbieter können Dienste über eine technische Web-Schnittstelle bereitstellen und diese anschließend über das Web-Portal des MDM anbieten. Interessierte Abnehmer können Nutzungsrechte beantragen und sobald ein Vertrag zwischen Anbieter und Abnehmer zustanden gekommen ist, können die Daten über den MDM ausgetauscht werden. Insbesondere für Abnehmer von Daten aus unterschiedlichen

Quellen, bietet die Plattform einen hohen Mehrwert, da die Daten auf einheitliche Art und Weise in einem einheitlichen Format bezogen werden können. Der MDM setzt auf das Datex II Format (vgl. Kapitel 5.5), welches sich unter anderem auch durch die Bindung des MDM an das Format, als europäisches Standardformat etabliert hat.

2.8 Entwicklung der Navigationssysteme

Die Navigation geht zurück bis in die Anfänge der Menschheit. Anfangs war die Orientierung stark an den Sternen ausgerichtet, bis diese Methodik Unterstützung durch den Kompass, welcher sich nach dem Magnetfeld der Erde ausrichtet, bekam. Seit 1958 verwendete zunächst das Militär der USA erste Satellitennavigationsgeräte [Wolfschmidt, 2009]. Diese Technologie bildet die Grundlage für moderne Navigationssysteme. Generell lassen sich Navigationsgeräte in drei Generationen unterteilen:

- Zur ersten Generation der Navigationsgeräte werden die rein statisch agierenden Systeme gezählt. Diese verfügten über eingespieltes Kartenmaterial mit konstanten Gewichten auf den Straßenkanten. Eine definierte Routenberechnung führte daher zu jeder Zeit zu einem identischen Ergebnis. Honda brachte 1981 das erste Navigationssystem auf den Markt [Kayton, 1990].
- Die zweite Generation von Navigationssystemen war in der Lage unidirektionale Kommunikationswege zu nutzen. Die Kommunikation erfolgt dabei zumeist über RDS (Radio Data System), später über DAB (Digital Audio Broadcasting), da diese Informationsquellen dank eines flächendeckenden Broadcasts einfach zugänglich sind. 1997 wurde mit der Einführung von RDS-TMC (Traffic Message Channel) der Grundstein für die Kommunikation von Verkehrsmeldungen gelegt. Diese Generation der Navigationsgeräte war somit bereits in der Lage, Informationen über Verkehrsstörungen zu empfangen, zu verarbeiten und auf Basis dieser Information eine dynamische Neuberechnung der optimalen Route durchzuführen, um somit den Stau zu umfahren [Mikolaschek u. Bozyazi, 2005].
- Aktuelle Navigationsgeräte werden der dritten Generation zugeordnet. Diese Geräte sind mit Mobilfunktechnologien ausgestattet. Diese Entwicklung bringt zwei entscheidende Vorteile mit sich: Zum einen ist durch eine deutliche Steigerung der Bandbreite die Bereitstellung von sehr detaillierten Informationen möglich; zum anderen verfügt das Gerät somit über einen bidirektionalen Kommunikationsweg.

Die Etablierung einer bidirektionalen Kommunikation bietet sehr weitreichende Vorteile. Es ist erstmals möglich, individuelle Anfragen an einen Server oder eine Infrastrukturkomponente zu richten, indem bei der Anfrage Eigenschaften des Fahrers mitgeteilt werden. So ist es möglich, Routenanfragen mit Start- und Zieldefinition oder Routenkriterien individuell zu beantworten. Ein weiterer entscheidender Vorteil der bidirektionalen Anbindung besteht in der Kommunikationsfähigkeit des Navigationsgerätes. Durch Sammlung von Bewegungsdaten des Fahrzeuges ist es erstmals möglich, vollkommen automatisch Verkehrsmeldungen zu generieren, zu bestätigen oder zu widerlegen. Hierzu sendet das Fahrzeug

sogenannte Floating Car Data (FCD) an einen Content-Provider, welcher diese Informationen wiederum mit Informationen aus anderen Quellen zu einer aktuellen Verkehrslage fusioniert (vgl. Abbildung 2.6).

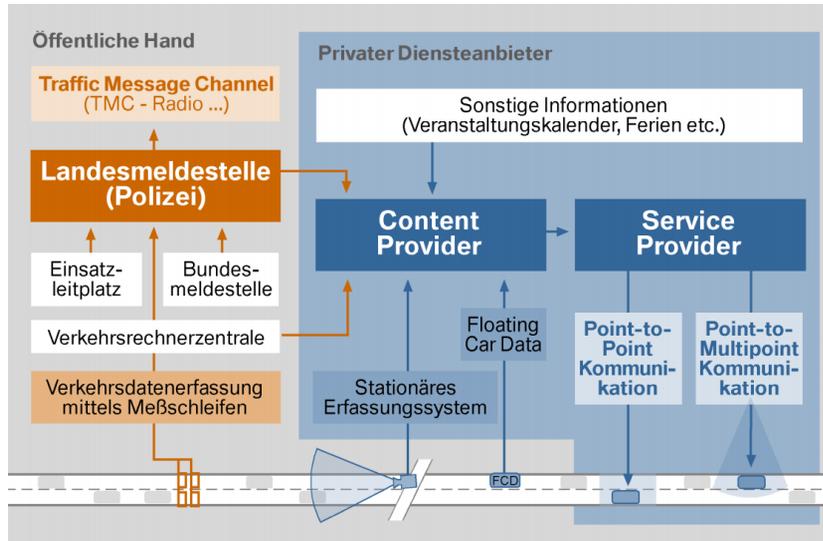


Abbildung 2.6: Darstellung der Meldekette von Verkehrsinformationen [Bogenberger, 2003]

Bedingt durch die geringe Bandbreite wurden bei der zweiten Generation von Navigationssystemen nur Verkehrsinformationen über signifikante Störungen kommuniziert. In der dritten Generation hingegen ist es nun möglich flächendeckende Informationen inklusive detaillierter Reisezeitangaben zu kommunizieren. Diese können über Level-of-Service-Stufen in unterschiedlichen Farben (zum Beispiel grün, gelb, rot) auf der Karte visualisiert werden, aber auch genutzt werden, um bei der Routenberechnung sehr präzise Reisezeitberechnungen durchzuführen. Abbildung 2.7 zeigt eine übliche Darstellung und Detailtiefe der Verkehrsinformationen. Diese ist zumeist auf das Hauptstraßennetz begrenzt.

Zur Kommunikation detaillierter Verkehrsinformationen wurde von der EU durch die European Broadcasting Union das TPEG Projekt (Transport Protocol Experts Group) ins Leben gerufen. Dieses Konsortium entwickelte bis 2003 den TPEG-Standard, welcher es unter anderem ermöglicht, TEC (Traffic Event Compact) Verkehrsmeldungen und TFP (Traffic Flow and Prediction) Verkehrsflussmeldungen standardisiert zu übertragen [European Broadcasting Union, 2007]. Das Projekt wird durch die TISA [Traveller Information Services Association, 2015] stetig weiterentwickelt und ermöglicht des Weiteren die Kommunikation unterschiedlichster Routen und Verkehrszustände.

2 Aktueller Stand der Forschung und Technik

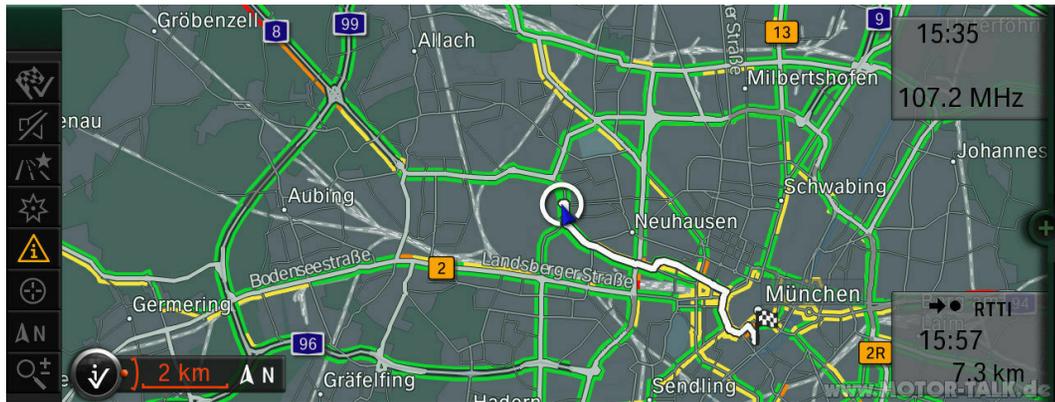


Abbildung 2.7: Verkehrslagedarstellung des Dienstes "Real Time Traffic Information"(RTTI) von BMW [BMW Group Presse Club Deutschland, 2011]

2.9 Schlussfolgerung

Die Recherche zum aktuellen Stand der Forschung zeigt, dass sich bereits viele Forschungsprojekte dem Thema Strategisches Routing gewidmet haben. Die Fragestellung wurde schon aus unterschiedlichen Perspektiven betrachtet.

So wurden im Projekt Invent zwei verschiedene Herangehensweisen zur Kommunikation der Informationen untersucht: Die Kommunikation von ganzen Teilnetzen und von einzelnen Routen, wobei sich die Kommunikation der Route über Wegepunkte als schwierig herausstellte. Im Projekt Mobinet wurden bereits Live-Verkehrsinformationen zur Validierung der Strategien eingesetzt, zunächst nur über Detektordaten, aber Vorbereitungen für weitere Informationen wurden getroffen. Die Kommunikation erfolgte in diesem Projekt bereits über echte Stauinfotafeln, wodurch die Informationen bereits in der Realität kommuniziert wurden.

Die größten Fortschritte bezüglich des Strategischen Routings erfolgten im Projekt dMotion. Es wurde eine große Anzahl von Strategien entwickelt. Die Kommunikation erfolgte nicht mehr punktuell, sondern großflächig über dWiSta-Tafeln. Zusätzlich fand eine baulastträger-übergreifende organisatorische Abstimmung statt. Die Übertragung erfolgte über ein proprietäres, aber standardisiertes Übertragungsformat. Zur Georeferenzierung wurde mit TMC bereits ein echtes Georeferenzierungsformat genutzt.

Das Projekt simTD untersuchte mit car-to-X, car-to-car und via Mobilfunk verschiedene mögliche Kommunikationswege.

Eine Recherche zum aktuellen Stand der Technik zeigt, dass in Verkehrsmanagementzentralen bereits technisch und organisatorisch aufwändige Verfahren angewendet werden, um den Verkehr vorherzusagen und zu steuern. Eine Kommunikation der abgeleiteten Informationen erfolgt allerdings zumeist über Schilder und Anzeigetafeln.

Mit dem Mobilitäts-Daten-Marktplatz bestehen erstmals Bestrebungen, Verkehrsinformationen an zentraler Stelle und standardisiert bereit zu stellen, so dass diese von Dritten verwendet werden können. Die aktuelle Generation von Navigationssystemen verfügt erstmals in großen Ausstattungsraten über eine Mobilfunkverbindung, so dass eine bidirektionale Kommunikation mit dem Fahrzeug möglich ist. Somit wird das Fahrzeug einerseits in die Lage versetzt, Rückmeldung zu den kommunizierten Verkehrsinformationen zu liefern, des Weiteren ermöglicht der Mobilfunk nahezu unbegrenzt große Mengen an Informationen zu kommunizieren.

Diese neuen technischen Möglichkeiten und die großen Bestrebungen und Untersuchungen zum Thema Strategisches Routing werfen unweigerlich die Frage auf, warum die Entwicklungen noch zu keinem einsatzbereiten Produkt geführt haben und ob unter der Betrachtung noch ungelöste Herausforderungen bestehen. Um dieser Fragestellung auf den Grund zu gehen, wird in Kapitel 4 zunächst ein einfacher Demonstrator aufgebaut, welcher dazu dienen soll, an einem realen Produkt die Herausforderungen zu evaluieren. Auf Basis dieser Erkundung werden anschließend die weiteren Schritte dieser Arbeit festgelegt.

3 Grundlagen

3.1 Graphen

Zur Modellierung eines Straßennetzes wird die digitale, topographische Karte häufig in einen Graphen überführt. Auch in dieser Arbeit werden die Untersuchungen auf Basis von Graphen durchgeführt. Daher wird an dieser Stelle ein grober Überblick über die Grundlagen der Graphentheorie gegeben. Weiterführende Beschreibungen sind beispielsweise [Damrath u. Pahl \[2000\]](#) zu entnehmen.

3.1.1 Repräsentation eines Straßennetzes als Graph

Allgemein stellt ein Graph eine Menge von Objekten dar, welche durch Relationen untereinander in Beziehung gesetzt werden. Zur Darstellung eines Straßennetzes wird dieses in Knoten und Kanten eingeteilt. Ein Graph G wird definiert als Verknüpfung der Menge an Knoten V und der Menge an Relationen R zwischen diesen:

$$G := (V; R) \quad R \subseteq V \times V \quad (3.1)$$

Bei der Abbildung eines Straßennetzes stellen die Knoten die Knotenpunkte im Straßennetz und die Kanten, die Relationen zwischen ihnen, nämlich die Straßen dar (vgl. Abbildung 3.1).

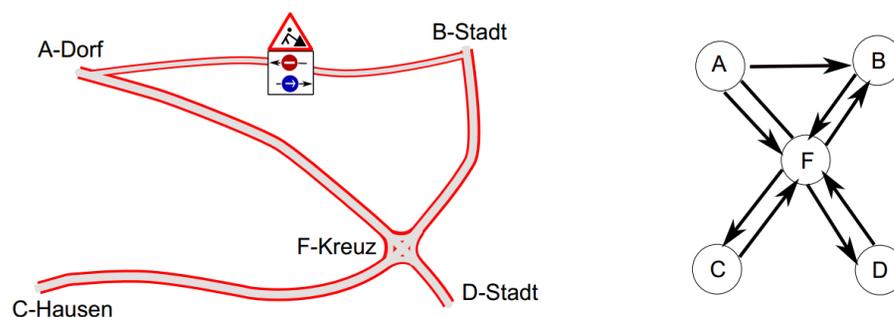


Abbildung 3.1: Darstellung einer digitalen Karte als Graph [Sämann, 2011]

Es werden unterschiedliche Arten von Graphen unterschieden. Ein *Schlichter Graph* stellt die einfachste Struktur eines Graphen dar [Damrath u. Pahl, 2000]. Die Kanten eines solchen Graphen sind gerichtet und es können Relationen von Kanten auf sich selbst (sogenannte Schlingen) existieren. Diese Art von Graph ist für eine Darstellung eines Straßennetzes nicht ausreichend. Ein schlichter Graph mit ausschließlich antireflexiven und symmetrischen Relationen wird *Einfacher Graph* genannt. In diesem existieren also keine Schlingen und ausschließlich ungerichtete Kanten [Damrath, 2005]. In der Praxis findet auch der Gerichtetete

Graph häufig Anwendung. Im Gegensatz zum Einfachen Graphen genügt dieser nicht der Forderung nach symmetrischen Relationen, verfügt also über gerichtete und ungerichtete Kanten. Letztere werden dabei als Kanten, welche in beide Richtungen befahrbar sind, gedeutet. Da sich die Relationen jeweils auf die Beziehung zwischen genau zwei Knoten beschränkt, gelten diese Relationen als binär und können durch eine Matrix dargestellt werden:

$$R = \begin{array}{c} \begin{array}{ccccc} A & B & C & D & F \\ \hline \end{array} \\ \left(\begin{array}{ccccc} 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{array} \right) \begin{array}{l} | A \\ | B \\ | C \\ | D \\ | F \end{array} \end{array}$$

Die Knoten und Kanten verfügen weiterhin über unterschiedliche Attribute. Die Lage der Knoten wird meist über WGS'84-Koordinaten angegeben. Die Attribute der Kanten sind deutlich detaillierter, mindestens wird jedoch ein Attribut für die Kosten zur Durchfahung der Kanten angegeben. Dies kann beispielsweise die Länge der Kante oder durch zusätzliche Angabe einer Geschwindigkeit, die zur Durchfahung benötigte Reisezeit sein. Je nach Detaillierung der digitalen Karte, können sowohl Kanten als auch Knoten über beliebig viele Attribute verfügen (vgl. hierzu digitale Karten von [Here Global B.V. \[2011\]](#)).

3.1.2 Berechnung von kürzesten Wegen in Graphen

Die Aufgabe von Navigationssystemen liegt in der Berechnung von optimalen Routen durch ein Straßennetz. Dabei kann der Nutzer ein Routenkriterium (z. B. schnellste oder kürzeste Route vorgeben). In der Graphentheorie bedeutet dies algorithmisch eine Minimierung der Wegekosten bei der Suche eines Pfades durch den Graphen. Als ein Pfad wird dabei die Kombination unterschiedlicher Kanten zu einem Weg durch den Graphen verstanden. Bei Navigationssystemen wird dies als Route bezeichnet. Zur Lösung dieser Minimierungsaufgabe wurden bereits unterschiedlichste Algorithmen entwickelt. An dieser Stelle seien nur die zwei bekanntesten und verbreitetsten Algorithmen geschildert.

Dijkstra-Algorithmus

Der Dijkstra-Algorithmus wurde bereits 1959 von E. W. Dijkstra veröffentlicht [Dijkstra, 1959] und ist bis heute der bekannteste Algorithmus zur Bestimmung von kürzesten Wegen in Graphen. Der Dijkstra-Algorithmus bedient sich zur Routensuche zwei unterschiedlicher Listen, einer Kandidatenliste für noch zu untersuchende Knoten und einer Liste für bereits betrachtete Knoten. Zu Beginn wird nur der Startknoten in die Kandidatenliste überführt. In jedem Berechnungsschritt wird der Knoten mit der geringsten Distanz zum Startknoten aus der Kandidatenliste entnommen und in die Liste der bereits untersuchten Knoten überführt. Anschließend werden für diesen Knoten jeweils die Nachfolgeknoten bestimmt und überprüft, ob der Weg über diesen betrachteten Knoten einen neuen kürzesten Weg zum Nachfolgeknoten liefert. Sollte dies der Fall sein, so wird der neue, kürzeste Weg im Nachfolgeknoten vermerkt und dieser Knoten ebenfalls in die Kandidatenliste aufgenommen. Diese Schritte werden solange wiederholt, bis die Kandidatenliste abgearbeitet ist oder der Zielknoten erreicht wurde. Im Folgenden ist der Algorithmus als Pseudocode dargestellt [Rinke, 2015]:

Algorithmus 3.1 Dijkstra-Algorithmus

Eingabe: Startknoten: k_s , Zielknoten: k_t
1: $v(k) = \text{null} \forall k \in N, d(k) = \infty \forall k \in N$
2: $d(k_s) = 0, E = \{\}$
3: lege k_s in C
4: **while** C nicht leer **do**
5: bestimme k aus C mit $\min(d(k)) \forall k \in C$
6: **if** $k == k_t$ **then**
7: Fertig.
8: **end if**
9: Entferne k aus C
10: Speichere k in E
11: **for** alle Nachfolgeknoten n von k **do**
12: **if** $d(k) + f(n) < d(n)$ **then**
13: $d(n) = d(k) + f(k, n)$
14: $v(n) = k$
15: **if** $n \notin E$ **then**
16: füge n in C ein
17: **end if**
18: **end if**
19: **end for**
20: **end while**

- N : Menge aller Kanten im Netz
- C : Kandidatenliste
- E : Liste der bereits untersuchten Knoten
- k : Knoten k
- $d(k)$: Kosten von k zum Startknoten
- $v(k)$: Vorgängerknoten von k
- $n(k)$: Nachfolgerkante von k
- $f(k, n)$: Kosten für die Kanten von Knoten k zu Knoten n

Nachdem der Algorithmus durchlaufen ist, kann die kürzeste Route ermittelt werden, da für alle Knoten der Route, beginnend beim Zielknoten, der jeweilige Vorgänger gespeichert wurde.

Der Vorteil des Dijkstra-Algorithmus liegt in der Verwendung der Kandidatenliste, in welche nur Knoten überführt werden, für welche eine Verwendung bei der Routensuche sinnvoll erscheint. Dadurch muss nicht über alle Knoten eines Graphen iteriert werden, sondern es werden nur Knoten betrachtet, welche eine Distanz kleiner als die Distanz zum Ziel aufweisen. Dies schlägt sich vor allem bei großen Graphen, wie komplexen Verkehrsnetzen, positiv auf die Rechenzeit aus. Außerdem findet der Algorithmus in jedem Fall die kürzeste Route und benötigt dafür keine Iterationen im Gegensatz zu dem ebenfalls sehr bekannten Moore-Bellman-Ford-Algorithmus [Moore, 1959]. Die meisten heute verwendeten Routensuchalgorithmen basieren im Kern auf dem Dijkstra-Algorithmus. Eine der bekanntesten Weiterentwicklungen stellt der A*-Algorithmus dar.

Routenkriterien

Der Dijkstra-Algorithmus minimiert die Kosten, welche zwischen zwei Knoten, also auf einer Kante, vermerkt sind. Im einfachsten Fall ist dies die Distanz zwischen den beiden Knoten. Der Algorithmus berechnet dann die kürzeste Route zwischen Start- und Zielknoten. Deutlich häufiger findet das Routenkriterium ‚schnellste Route‘ Anwendung. Zur Nutzung dieses Kriteriums muss die Reisedauer, also die der Fahrt auf einer Kante, minimiert werden. Die Dauer jeder Kante berechnet sich aus Länge und Geschwindigkeit des jeweiligen Kantensegments. Mit dem Dijkstra-Algorithmus können theoretisch beliebige Kosten minimiert werden. So ist beispielsweise auch die Verwendung von Kraftstoffverbrauch oder Energiebedarf zur Berechnung einer verbrauchsamen Route möglich. Des Weiteren ist es auch möglich, verschiedene Kosten zu kombinieren. Beispielsweise ist die Berechnung einer kürzesten Route oftmals nicht sinnvoll, weil teilweise Teilstrecken entstehen, welche zwar die kürzeste Route aufweisen, aber eine enorm erhöhte Reisezeit entstehen lassen. In diesem Fall könnte eine Kombination aus Reisezeit

und Strecke eine deutlich bessere Lösung liefern. Um dies zu realisieren, kann eine Kostenfunktion für die Kosten zur Überfahung einer Kante aufgestellt werden, welche wiederum alle beeinflussenden Größen in Relation stellt.

A*-Algorithmus

Der Dijkstra-Algorithmus bietet für zwei nahegelegene Knoten eine effiziente Methode zur Berechnung der kürzesten Route. Da zur Laufzeit des Algorithmus jedoch alle Knoten in Reichweite des Ziels betrachtet werden, entsteht in großen Netzen, wie beispielsweise Verkehrsnetzen und insbesondere bei langen Routen ein hoher Rechenaufwand, da sehr viele Kombinationen berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wurden diverse Optimierungen für den Dijkstra-Algorithmus entwickelt. Der A*-Algorithmus wurde erstmals 1968 von [Hart u. a. \[1968\]](#) vorgestellt. Bei dem A*-Algorithmus handelt es sich um einen sogenannten informierten Algorithmus, da eine Heuristik zum Einsatz kommt, welche die verbleibende Distanz zum Ziel abschätzt. Diese Distanz wird bei der Routensuche des Dijkstra-Algorithmus beim Vergleich der Reisekosten zusätzlich addiert.

$$f_h(k) \geq f(k) + h(k) \quad (3.2)$$

$f_h(k)$: Kosten der Kante k unter Einbeziehung der Heuristik

$f(k)$: reale Kosten der Kante k

$h(k)$: Heuristik der Kante k

Eine mögliche Heuristik stellt die Luftlinien-Heuristik dar. Diese Heuristik schätzt die mindestens noch anfallenden Kosten zum Ziel ab und berücksichtigt diese bei der Wahl der Kandidaten. Durch dieses Vorgehen werden Kanten, welche sich weiter vom Ziel entfernen, bestraft und die Suche findet gerichtet aufs Ziel statt. Es werden durch dieses Verfahren weniger Knoten in die Kandidatenliste aufgenommen und somit auch weniger Kanten untersucht. Hierdurch entsteht eine deutlich verkürzte Laufzeit des Algorithmus. Insbesondere betrachtet der Dijkstra-Algorithmus auch jene Kanten, die sich auf der vom Ziel abgewandten Seite des Startknoten befinden, da rein mathematisch auch diese für die kürzeste Route in Frage kommen. Der A*-Algorithmus eliminiert mit der Restkostenabschätzung diese These. Der A*-Algorithmus hat im Pseudo-Code folgende Darstellung:

Algorithmus 3.2 A*-Algorithmus

Eingabe: Startknoten: k_s , Zielknoten: k_t

- 1: $v(k) = \text{null} \forall k \in N, d(k) = \infty \forall k \in N$
- 2: $d(k_s) = 0, E = \{\}$
- 3: lege k_s in C
- 4: **while** C nicht leer **do**
- 5: bestimme k aus C mit $\min(d(k) + h(k)) \forall k \in C$
- 6: **if** $k == k_t$ **then**
- 7: Fertig.
- 8: **end if**
- 9: Entferne k aus C
- 10: Speichere k in E
- 11: **for** alle Nachfolgeknoten n von k **do**
- 12: **if** $d(k) + f(n) < d(n)$ **then**
- 13: $d(n) = d(k) + f(k, n)$
- 14: $v(n) = k$
- 15: **if** $n \notin E$ **then**
- 16: füge n in C ein
- 17: **end if**
- 18: **end if**
- 19: **end for**
- 20: **end while**

N : Menge aller Kanten im Netz
 C : Kandidatenliste
 E : Liste der bereits untersuchten Knoten
 k : Knoten k
 $d(k)$: Kosten von k zum Startknoten
 $v(k)$: Vorgängerknoten von k
 $n(k)$: Nachfolgerkante von k
 $f(k, n)$: Kosten für die Kanten von Knoten k zu Knoten n
 $h(k)$: Heuristik zur Restkostenabschätzung von Knoten k zum Ziel

Abbildung 3.2 stellt die untersuchten Kanten bei einer Routenberechnung vom Münchner Osten in den Münchner Westen dar. Im linken Teil sind die Ergebnisse für den Dijkstra-Algorithmus, im rechten Teil der Abbildung die Ergebnisse für den A*-Algorithmus dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass der A*-Algorithmus signifikant weniger Kanten untersucht. Insbesondere die Äste nach Norden, Westen und Süden brechen die Routensuche deutlich früher ab.

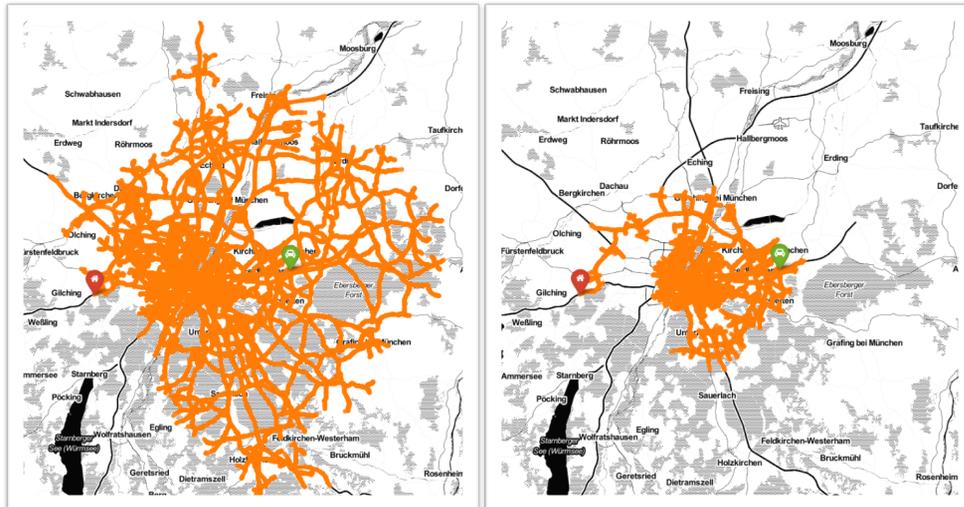


Abbildung 3.2: Untersuchte Kanten links: Dijkstra-Algorithmus, rechts: A*-Algorithmus

Zu beachten ist jedoch, dass durch die Berechnung der Restkostenabschätzung für jeden betrachteten Knoten eine erhebliche Steigerung des Berechnungsaufwands herbeigeführt wird.

Wahl der Heuristiken des A*-Algorithmus

Zur Anwendung können unterschiedliche Heuristiken kommen, insbesondere ist die verwendete Heuristik abhängig von der angewendeten Kostenfunktion. Da die Heuristik eine Restkostenabschätzung durchführt, ist es wichtig, dass die geschätzten Kosten mindestens noch anfallen. Bei der Wahl der Heuristik sollte daher beachtet werden, dass diese die tatsächlich verbleibenden Kosten zum Ziel stets unterschätzt, um möglichst keine Kanten auszuschließen, welche sich auf dem kürzesten Weg befinden [Damrath, 2005]. Für die Berechnung des kürzesten Weges zwischen zwei Knoten eignet sich als Heuristik die jeweilige Luftliniendistanz. Dabei ist offensichtlich, dass diese den verbleibenden Weg zum Ziel stets unterschätzt. Wird als Kriterium nicht die kürzeste Wegstrecke, sondern die kürzeste Reisezeit gewählt, so müssen Reisezeiten verglichen werden. Zur Berechnung dieser muss wiederum eine Geschwindigkeit gewählt werden, welche die Heuristik nicht überschätzen lässt. Daher kann an dieser Stelle auf die in digitalen Karten vorhandene Maximalgeschwindigkeit von 130 km/h zurückgegriffen werden. Werden andere Routenkriterien gewählt, muss jeweils eine geeignete Heuristik für die entsprechenden Kosten gewählt werden.

3.1.3 Laufzeitoptimierung von Routenalgorithmern

Bei Straßengraphen handelt es sich meist um sehr große Graphen mit teilweise mehreren Millionen Knoten und Kanten. In derart großen Graphen entstehen trotz der Optimierungen des A*-Algorithmus sehr große Laufzeiten für eine Routenberechnung, welche weitere Anpassungen bedingen. Die hohen Laufzeiten resultieren aus der Eigenschaft der vorgestellten Algorithmen stets viele mögliche Links zu betrachten, um definitiv die beste Route zu finden. Befindet sich ein Verkehrsteilnehmer jedoch in einiger Distanz sowohl zum Ziel als auch zum Startpunkt, so ist in diesem Bereich die Betrachtung von Straßen geringer Straßenklasse nicht notwendig. Befindet sich ein Verkehrsteilnehmer auf einer Straße mit hoher Straßenklasse, beispielsweise auf einer Bundesstraße oder Autobahn, welche zum gewünschten Ziel führt, so ist das Abbiegen auf eine Erschließungsstraße in großer Entfernung zum Ziel nicht notwendig. Daher kann in einem solchen Fall die Untersuchung von Kanten mit geringer Straßenklasse vollständig vernachlässigt werden.

Levelswitching

Eine einfache Umsetzung dieser Optimierung kann durch ein Levelswitching erreicht werden. Bei dem Levelswitching handelt es sich um ein weiteres Kriterium, welches erfüllt sein muss, bevor ein Knoten in die Kandidatenliste aufgenommen wird. Hierzu wird die Distanz vom Knoten zum Ziel und zum Start untersucht. Auf Basis der geringeren dieser beiden Distanzen und der Straßenklasse der verbindenden Kante wird entschieden, ob die Kante einen geeigneten Weg darstellt und der Knoten in die Kandidatenliste aufgenommen wird. Ist die Straßenkategorie gering und die Entfernung sowohl zum Start, als auch zum Ziel hoch, so kann die entsprechende Kante direkt ausgeschlossen werden. Die Karte beispielsweise der Firma HERE ist in fünf Straßenkategorien eingeteilt. Eine mögliche Parametrisierung für das Levelswitching sieht wie folgt aus [[Here Global B.V., 2011](#)]. Kanten mit einem Level von 0 oder 1 werden immer betrachtet, Kanten mit dem folgenden Level, nur dann wenn sie innerhalb des angegebenen Radius von Start oder Ziel liegen:

- Level 2: bis 100 km
- Level 3: bis 50 km
- Level 4: bis 20 km

In Abbildung 3.3 sind die untersuchten Kanten bei einem Levelswitching mit oben genannten Parametern unter Verwendung eines A*-Algorithmus dargestellt. Wie deutlich erkennbar ist, werden im Bereich um den Start- und Zielpunkt jeweils

sehr viele Alternativen untersucht. Mit steigender Entfernung werden nur noch wenige Kanten betrachtet.

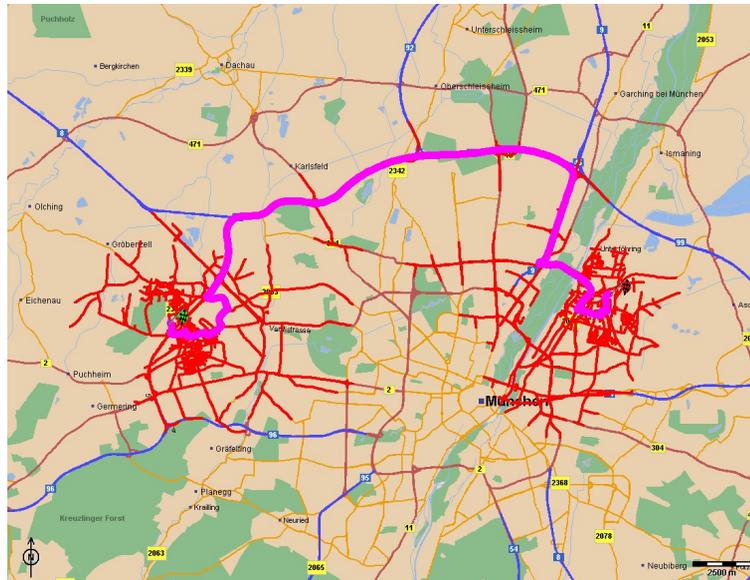


Abbildung 3.3: Verdeutlichung der untersuchten Kanten bei einem Levelswitching

Hierarchische Graphen

Durch das Levelswitching wird bereits eine sehr hohe Effizienzsteigerung erreicht. Werden Routensuchalgorithmen allerdings in Navigationssystemen verbaut, so werden an sie extrem hohe Ansprüche gestellt, da trotz der beschränkten Hardware, Routenergebnisse in wenigen Sekunden berechnet werden müssen. Das Levelswitching verwirft Kandidaten-Knoten außerhalb eines bestimmten Gebietes relativ schnell, muss diese allerdings trotzdem auf Entfernung zum Ziel und Straßenklasse überprüfen. Die hierarchischen Graphen verfolgen grundsätzlich einen ähnlichen Ansatz: Je nach Straßenkategorie werden bestimmte Knoten und Kanten nicht weiter betrachtet. Dies wird über die Aufteilung des Graphen in unterschiedliche Teilgraphen, in Abhängigkeit von der Straßenklasse erreicht. Hierzu werden je Straßenklasse sogenannte Levelgraphen erstellt, wobei (G_0, \dots, G_k) jeweils ein Teilgraph des jeweiligen Graphen niedrigeren Levels ist: $G_0 \subseteq G_1 \subseteq G_2 \subseteq \dots \subseteq G_n$ [Car, 1996]. Jeder Knoten, der sowohl im Graph G_i als auch im Graph G_{i+1} enthalten ist, fungiert als Übergangsknoten zwischen den unterschiedlichen Graphen. Wird während der Routensuche eine bestimmte Entfernung, sowohl zum Ziel, als auch zum Startknoten erreicht, erfolgt über den nächstgelegenen Übergangsknoten der Übergang auf den nächst höheren hierarchischen Graphen. Der Algorithmus führt die Berechnung vom Start- und Zielknoten gleichzeitig durch, so dass

auch in der Umgebung des Zielknotens ein Levelaufstieg existiert. Durch dieses Vorgehen, können Routenteile, welche sich in einer großen Entfernung zu Start- und Zielknoten befinden, sehr schnell berechnet werden, da die Berechnung auf stark ausgedünnten Graphen erfolgt. Im Gegensatz zum Levelswitching, müssen Kanten geringer Straßenklasse nicht betrachtet werden, da diese in den entsprechenden Graphen nicht enthalten sind. Die Berechnung der hierarchischen Graphen kann in einem einmaligen Preprocessing erfolgen.

Weitere Laufzeitverbesserungen

Eine weitere Optimierung des Dijkstra-Algorithmus stellt der bidirektionale Dijkstra-Algorithmus dar. Bei diesem Algorithmus kommt neben der normalen Dijkstra-Suche auch eine Rückwärtssuche, also eine Suche vom Ziel- zum Start-Knoten zum Einsatz [Nicholson, 1966]. Diese kann selbstverständlich nicht im normalen Graphen durchgeführt werden, da es sich bei einem Verkehrsnetz nicht um einen symmetrischen Graphen mit gleichen Randbedingungen für jede Kante handelt. Es würden also potentiell unterschiedliche Routen für die Hin- und Rückrichtung gefunden werden. Daher wird ein Rückwärtsgraph erstellt, welcher die gleichen Knoten, wie der normale Graph enthält, allerdings sind in diesem Graph alle Kanten umgedreht. Für jede Kante k von u nach $v \in N$ existiert nun eine Kante k^R von v nach $u \in N^R$. Dabei stellen k^R und N^R jeweils die Reversion der Kante k bzw. der Kantenmenge N dar. Eine Rückwärtssuche kann in diesem Graphen nun mit dem unveränderten Dijkstra-Algorithmus vom Ziel zum Startknoten durchgeführt werden und liefert die selbe Route, wie die Vorwärtssuche. Der Vorteil besteht in der Verknüpfung der Vorwärts- und der Rückwärtssuche. Werden beide Suchen gleichzeitig gestartet und der zu untersuchende Knoten, jeweils so definiert, dass es der Knoten mit den geringsten Kosten aus beiden Kandidatenlisten ist, so kann die Suche abgebrochen werden, sobald ein Knoten von beiden Suchen gefunden wurde. Dann enthält der bei der Suche berechnete Vorwärtssuchbaum die kürzeste Route vom Startpunkt zu diesem gemeinsamen Knoten und der Rückwärtssuchbaum die kürzeste Route von diesem Knoten zum Ziel. Die Kombination der beiden Routen ergibt die kürzeste Route zwischen Start und Ziel

Abbildung 3.4 zeigt idealisiert die Suchbäume der Routensuchen. Es ist leicht zu erkennen, dass der Suchraum der Vorwärts- und Rückwärtssuche (blau) auch in Kombination deutlich kleiner ist, als der Suchbaum des normalen Dijkstra (rot). Daher ist der bidirektionale Dijkstra deutlich effizienter, als ein normaler Dijkstra. Die berechneten Routen sind dabei identisch. Der exakte Rechenzeitvorteil ist abhängig von der Beschaffenheit des Netzes am Start- und Zielpunkt. Verallgemeinert lässt sich die Kardinalität der untersuchten Kanten vom bidirektionalen

Dijkstra angeben mit $O(b^{d/2})$ im Vergleich zum normalen Dijkstra mit $O(b^d)$ [Holte et al., 2016].

Weitere gängige Verfahren, um die Rechenzeit eines Routingalgorithmus zu verkürzen, nutzen Vorberechnungen von Distanzen oder Teilnetzen (vgl. Goldberg u. Harrelson [2005]) oder vereinfachen den Graphen durch Einfügen von Abkürzungen für gängige Wege (vgl. Geisberger u. a. [2012]). Auf Grund der Vielzahl an Optimierungsmöglichkeiten für den Dijkstra-Algorithmus wird an dieser Stelle auf eine weitere Ausführung verzichtet.

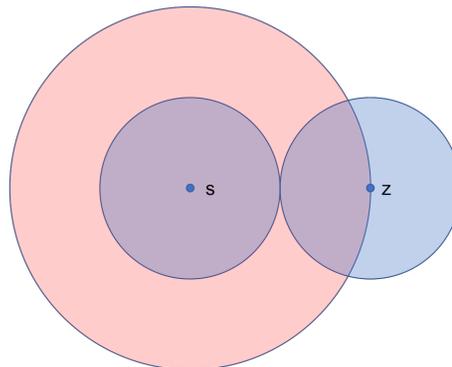


Abbildung 3.4: Suchraum des normalen Dijkstra- (rot) und des bidirektionalen Dijkstra-Algorithmus (blau)

3.1.4 Berechnung von Alternativrouten in Graphen

Es existieren unterschiedlichste Algorithmen zur Berechnung von Alternativrouten in Graphen. Viele Verfahren bieten Lösungen zur Ermittlung der k -kürzesten Routen in einem Graphen, also zur Bestimmung der zweit-, dritt- bis k -schnellsten Route für eine Start-Ziel-Beziehung. Zu den ersten und bekanntesten Algorithmen gehören der Algorithmus nach Yen [1971] oder Eppstein [1994]. Diese Algorithmen entfernen einzelne Kanten oder Knoten der schnellsten Route nacheinander und berechnen anschließend im modifizierten Graph eine neue Route. Die so ermittelten Routen werden dann nach dem zu optimierenden Kriterium sortiert und so neue beste Routen bestimmt. Für die Anwendung in einem Straßennetz sind diese Algorithmen aus mehreren Gründen nicht gut geeignet. Zum einen führt diese Art von Algorithmus sehr viele Routenberechnungen durch, was bei einer Anwendung auf einen großen Graphen zu sehr hohen Rechenzeiten führen würde. Des Weiteren bestimmen diese Algorithmen zumeist Routen, welche der ursprünglichen Routen sehr ähnlich sind. Übertragen auf ein Straßennetz, würden Routen ermittelt werden, welche nur kleine Umwege nutzen würden und möglichst schnell wieder auf die ursprüngliche Route führen, zum Beispiel durch

Nutzung von Parallelfahrbahnen oder ungünstigen Manövern an Knotenpunkten. Diese stellen keine sinnvollen Alternativen dar.

Einen für Straßennetze deutlich besser geeigneten Ansatz verfolgen die Penalty- oder Pareto-Algorithmen. Penalty-Algorithmen [Dees et al, 2010] berechnen ebenfalls zunächst die schnellste Route und bestrafen anschließend die Nutzung der Kanten dieser Route, indem die Kantengewichte hochgesetzt werden. Bei einer erneuten Berechnung werden nun andere Routen verwendet. Im Extremfall - bei sehr starker Erhöhung der Kantengewichte - wird die Route vollständig gemieden und eine andere Route bestimmt. In diesem Fall werden allerdings auch die guten Teile der Route gemieden. Sinnvoller ist daher die Wahl einer milderen Erhöhung der Kantengewichte, um nur diejenigen Teile der Route zu meiden, bei denen auch eine Alternative mit ähnlichen Kosten existiert. Dieses Verfahren eignet sich daher vor allem um kleinräumige Alternativen mit ähnlichen Kosten zu ermitteln. Die Pareto-Algorithmen [Delling u. Wagner, 2009a] modifizieren das Suchkriterium der Routensuche, um Routen zu ermitteln, welche anderen Faktoren genügen. Bei der Routensuche werden zum Beispiel nicht nur die Geschwindigkeiten, sondern auch die Routenlänge, Mautgebühren oder Emissionen berücksichtigt. Dies führt in vielen Situationen zu sinnvollen Ergebnissen, verändert jedoch die Optimierungsgröße, weshalb an dieser Stelle auf eine nähere Betrachtung verzichtet wird. Einen anderen Ansatz verfolgt das Choice-Routing [Jones u. Brown, 2009]. Bei diesem Ansatz werden, wie auch schon bei der Optimierung beschrieben (vgl. Kapitel 3.1.3), zunächst ein Suchbaum für die Vorwärts- und die Rückwärtssuche aufgestellt (vgl. Abbildung 3.5).

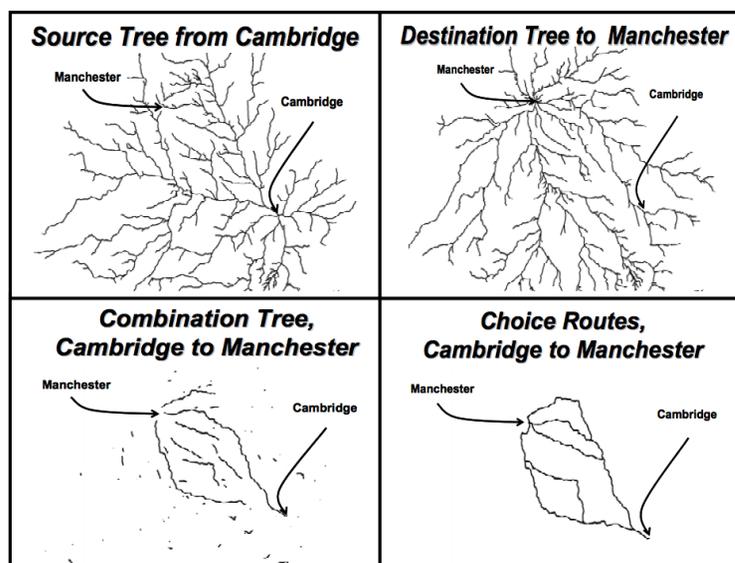


Abbildung 3.5: Choice-Routing zur Alternativroutenberechnung [Jones u. Brown, 2009]

Anschließend werden die beiden Bäume kombiniert und diejenigen Teile ermittelt, welche in beiden Suchbäumen enthalten sind. Hierdurch werden unabhängige Kantenzüge, die sogenannten Plateaus, bestimmt. Diese Plateaus werden nun nach der Summe ihrer Kantengewichte sortiert. Das größte Plateau bildet dabei die Route vom Start zum Ziel, da dieser Weg vollständig in beiden Suchbäumen enthalten ist. Die folgenden Plateaus beschreiben alternative Pfade, welche sehr nah an der besten Lösung sind, da sie in beiden Suchbäumen als Teil der Lösung identifiziert wurden. Durch die Verbindung des Startpunktes der Route mit dem Startpunkt eines Plateaus und des Zielpunktes des Plateaus mit dem Zielpunkt der Route kann eine neue Route ermittelt werden. Hierzu ist keine weitere Berechnung notwendig, da diese Pfade bereits in den beiden Suchbäumen enthalten sind. Auf diese Weise können mit relativ geringem Rechenaufwand sehr viele Alternativrouten bestimmt werden. Wie Abbildung 3.5 veranschaulicht können mit diesem Verfahren auch großräumige Alternativrouten ermittelt werden.

3.2 Verkehrstechnische Grundlagen

Im Folgenden werden einige Grundbegriffe der Verkehrstechnik erläutert, welche im Verlauf der Arbeit aufgegriffen werden.

3.2.1 Verkehrsfluss

Unter Verkehr wird im Allgemeinen die Bewegung, also die Ortsveränderung von Personen und Gütern verstanden. Die Bewegung und gegenseitige Interaktion der verschiedenen Verkehrsteilnehmer wird als Verkehrsfluss definiert [FGSV Arbeitskreis Fundamentaldiagramm, Kühne, et al., 2004]. Zur Untersuchung des Verkehrsflusses stehen unterschiedliche Methoden zur Verfügung. Bei makroskopischen Betrachtungen werden Verhalten und Eigenschaften von Verkehrsteilnehmern über eine gewisse Strecke und Zeit aggregiert. Dem gegenüber stehen mikroskopische Untersuchungen, bei denen das Verhalten jedes einzelnen Verkehrsteilnehmers unter Berücksichtigung von Infrastruktureinflüssen betrachtet wird. Mikroskopische Analysen werden in Kapitel 6 detaillierter betrachtet. Die drei wichtigsten Verkehrskenngrößen für makroskopische Berechnungen sind nach Friedrich [2006]:

- q – die Verkehrsstärke (Fahrzeuge je Zeit)
- v – die Geschwindigkeit (Strecke pro Zeit)
- k – die Verkehrsdichte (Fahrzeuge je Strecke)

Diese Verkehrskenngrößen stehen in folgendem Verhältnis:

$$q = v \cdot k$$

Für die Verkehrsdichte existiert ein maximaler Wert k_{max} , welcher die größte Dichte von Verkehrsteilnehmern je Straßenabschnitt definiert. Greenshields [1935] entwickelte mit Hilfe von Regressionsrechnungen einen parabolischen Zusammenhang zwischen Verkehrsdichte und aktueller Verkehrsstärke, die sogenannte Zustandsgleichung:

$$q = v_f \cdot k - v_f \cdot \frac{k^2}{k_{max}} \quad (3.3)$$

mit:

- v_f : freie Geschwindigkeit
- k : Verkehrsdichte
- k_{max} : Kapazität
- Q : Verkehrsstärke

Auf Basis dieses Zusammenhangs wurde das Fundamentaldiagramm des Verkehrsflusses generiert (vgl. Abbildung 3.6).

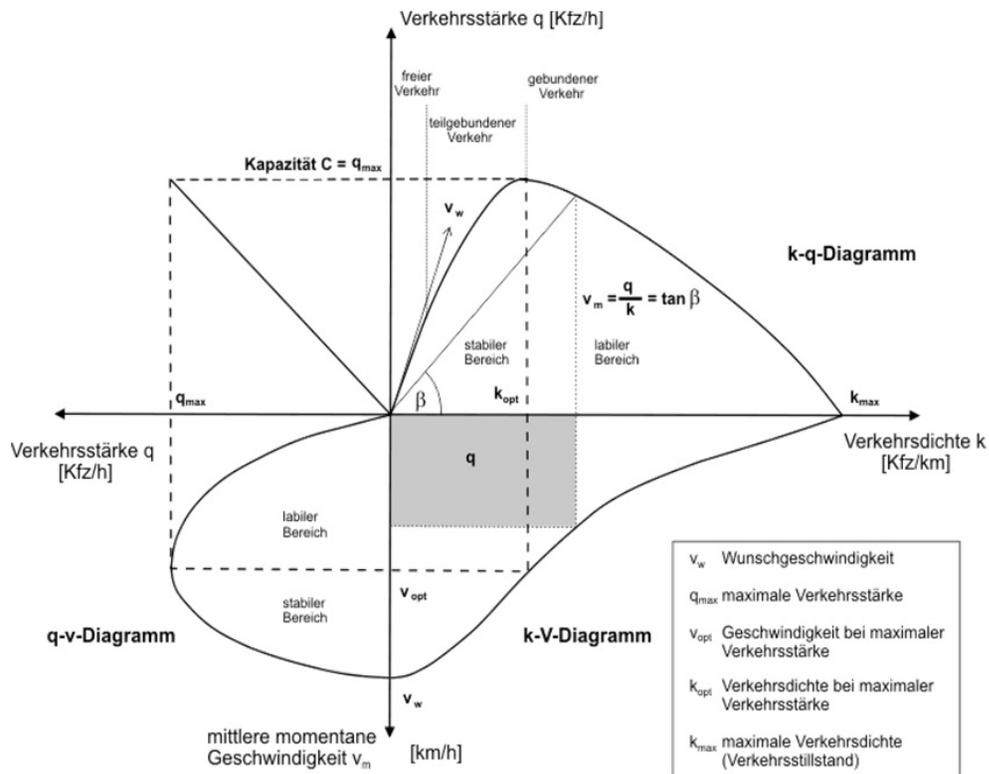


Abbildung 3.6: Fundamentaldiagramm des Verkehrsflusses [Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), 2010]

Für die weiteren Betrachtungen sind mehrere Eigenschaften, welche durch das Fundamentaldiagramm beschrieben werden, von besonderem Interesse:

- Der vierte Quadrant zeigt den Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Verkehrsdichte. Hohe Geschwindigkeiten sind nur bei geringer Verkehrsdichte möglich. Je stärker die Dichte zunimmt, umso geringer werden die mittleren Geschwindigkeiten.
- Der erste Quadrant beschreibt das Verhältnis zwischen Verkehrsdichte und Verkehrsstärke. Die Verkehrsstärke – also die Fahrzeuge, die pro Stunde den Streckenabschnitt passieren – steigt zunächst mit steigender Verkehrsdichte bis zu einem Maximum q_{max} . Steigt die Verkehrsdichte weiter, fällt die Verkehrsstärke monoton ab. Es existiert also ein Wert k_{opt} , bei dem die maximal mögliche Verkehrsstärke abgewickelt werden kann. Diese maximale Verkehrsstärke entspricht der sogenannten Kapazität einer Straße.
- Der dritte Quadrant beschreibt den Zusammenhang zwischen Verkehrsstärke und mittlerer Geschwindigkeit. Wird die Kapazität in diesen Quadranten

übertragen, so wird deutlich, dass eine optimale Geschwindigkeit v_{opt} existiert, welche zur Abwicklung der optimalen Verkehrsstärke nötig ist.

Zu beachten ist, dass das Fundamentaldiagramm für den Verkehrsfluss auf Autobahnen entwickelt wurde und sich daher nicht beliebig auf urbanen Verkehr übertragen lässt.

Das Fundamentaldiagramm stellt die Reisezeit in Verhältnis zur Verkehrsdichte. Eine häufig verwendete Funktion zur Bestimmung der Fahrzeit auf einer Kante ist die BPR-Funktion des U.S. Bureau of Public Roads:

$$t_a(q_a) = t_0 \cdot \left(1 + \alpha \cdot \left(\frac{q_a}{C_a}\right)^\beta\right) \quad (3.4)$$

mit:

- t_a : Fahrzeit auf der Kante a
- t_0 : Fahrzeit im unbelasteten Netz
- q_a : Verkehrsstärke auf der Kante a
- c_a : theoretische Kapazität der Kante a
- α, β : Modellparameter

Die Fahrzeit im unbelasteten Netz lässt sich durch Messungen zur wenig belasteten Zeiten ermitteln. Die Verkehrsstärke kann durch Messungen (bspw. Detektoren) ermittelt werden und die Kapazität kann über den Straßenquerschnitt bestimmt werden.

3.2.2 Verkehrsqualität

Die Zusammenhänge zwischen mittlerer Geschwindigkeiten, Verkehrsstärke und Verkehrsdichte zeigen, dass es unterschiedliche Verkehrszustände gibt, bei denen unterschiedliche Geschwindigkeiten erreichbar sind und verschiedene Mengen an Verkehr abgewickelt werden können. Zur Einteilung dieser Zustände existieren verschiedene Definitionen von Verkehrsqualitätsstufen. Das Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) [[Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen \(FGSV\), 2010](#)] und das Amerikanische Äquivalent, das Highway Capacity Manual [[Transportation Research Board of the National Academies of Science, USA, 2000](#)], nehmen eine Einteilung in sechs verschiedene sogenannte Level of Service A-F vor. Abbildung 3.7 zeigt die Einteilung der Stufen anhand des dritten Quadranten des Fundamentaldiagramms.

Die Qualitätsstufen A-E beschreiben dabei verschiedene Zustände im stabilen Bereich. Die Stufen steigen mit dem Auslastungsgrad an. Der Auslastungsgrad

berechnet sich dabei aus dem Quotienten der Verkehrsstärke und der Kapazität. Der Level of Service F beschreibt den instabilen Bereich, in welchem die Kapazität der Straße überstiegen wird. Die mittlere Geschwindigkeit fällt in diesem Bereich wieder ab und es entsteht Stau. Eine andere weit verbreitete Einteilung (nach [Kerner \[2009\]](#)) unterscheidet drei verschiedene Verkehrsphasen: freien Verkehr, synchronisierten Verkehr und (bewegende, breite) Staus. Diese sind wie folgt kategorisiert:

- Der „freie Verkehr“ zeichnet sich durch frei fahrende, also vom übrigen Verkehr ungestörte Fahrzeuge aus. Bei mehrstreifigen Strecken werden die Überhohlfahrtstreifen hauptsächlich für Überholvorgänge genutzt und weisen daher eine deutlich höhere durchschnittliche Geschwindigkeit und deutlich geringere Verkehrsstärke auf, als die rechten Fahrstreifen.
- Den Zustand „synchronisierter Verkehr“ charakterisieren nahezu gleiche Geschwindigkeiten und Verkehrsstärken auf allen Richtungsfahrtstreifen. Die Fahrzeuge gleichen die Geschwindigkeit aneinander an und erreichen vielfach nicht die Wunschgeschwindigkeit. Die durchschnittliche Geschwindigkeit liegt auf Autobahnen in einem Bereich von 60 bis 90 km/h. Vereinzelt treten kurzzeitige Geschwindigkeitseinbrüche auf.
- Breite, sich bewegende Staus (engl. wide moving jams) verfügen über eine geringe, aber fluktuierende Geschwindigkeit. Charakteristisch ist die Staufront, ab welcher ein schneller Übergang in den synchronisierten oder freien Verkehr stattfindet. Diese Staufront bewegt sich stromaufwärts mit einer Geschwindigkeit von etwa 15 km/h.

3.2.3 Mikroskopische Verkehrsbetrachtung

Die vorangegangenen Betrachtungen der makroskopischen Verkehrskenngrößen beruhen stets auf Untersuchungen auf Autobahnen oder anderen Strecken mit ausschließlich planfreien Knotenpunkten. Daher lassen sich diese Modelle auch nicht ohne Weiteres auf andere Gebiete, wie zum Beispiel innerstädtischen Verkehr, übertragen. Es existieren einige Ansätze, wie beispielsweise das Two-Fluid Modell [[Priogine u. Herman, 1971](#)], allerdings werden auch hierbei netzspezifische Komponenten ermittelt. Das Problem bei der Betrachtung von innerstädtischen Routen besteht in genau dieser Abhängigkeit an das spezifische Netz. Die Kapazität einer Route ist im innerstädtischen Bereich nicht konstant, da sich die Gegebenheiten der Strecke ändern:

- Strecken verfügen über Abschnitte mit unterschiedlichen Anzahlen an Fahrstreifen.

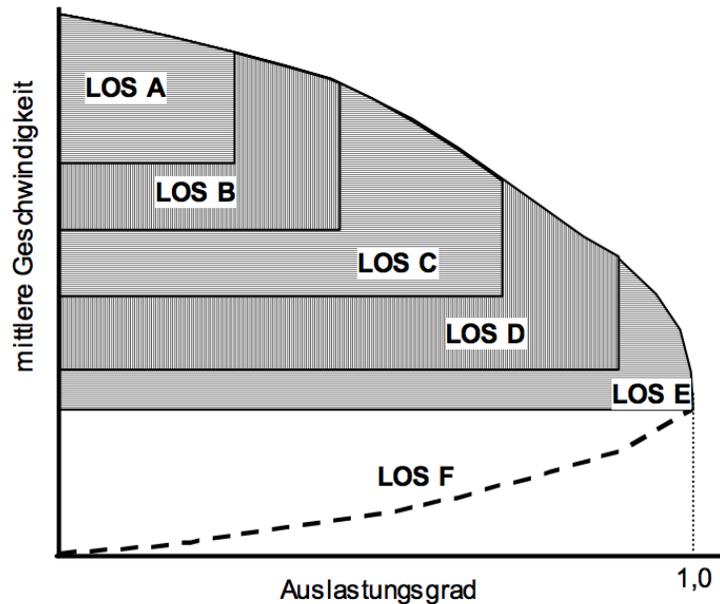


Abbildung 3.7: Einteilung nach Level of Service [Transportation Research Board of the National Academies of Science, USA, 2000]

- Die Fahrstreifen weisen unterschiedliche Querschnitte und damit unterschiedliche Kapazitäten auf.
- Knotenpunkte (zum Beispiel mit LSA) limitieren die Kapazität einer Strecke.
- Die Kapazitäten von Knotenpunkten werden beeinflusst, beispielsweise durch verschiedene Programme einer LSA oder durchquerende Ströme.

Zusätzlich zu diesen Veränderungen der Kapazität sorgen Zu- und Abflüsse von Verkehrsströmen an Knotenpunkten für unterschiedliche Verkehrsstärken entlang einer Strecke. Weiterhin ist eine Unabhängigkeit von Strecken untereinander nicht gegeben, da sich beispielsweise Kapazitätsüberlastungen einer Strecke auf eine andere Strecke übertragen können. Diese Umstände protegieren den Einsatz von mikroskopischen Modellen zur Analyse des innerstädtischen Verkehrs. Unter mikroskopischen Modellen wird die Betrachtung von Einzelfahrzeugen im Netz verstanden. Häufig werden zur Analyse eines Netzes Verkehrssimulationen an Netzmodellen durchgeführt. Diese Methodik wird in Kapitel 7.1 näher beschrieben. Eine Möglichkeit zur Betrachtung eines realen Straßennetzes bietet die Bewertung von Floating Car Data (FCD). Dabei handelt es sich um kontinuierlich erfasste Positionsdaten von Fahrzeugen.

Abbildung 3.8 zeigt verschiedene FCD-Traces in einem Zeit-Weg-Diagramm. Aus dieser Abbildung können unterschiedliche Kennwerte für Strecken ermittelt werden. Abbildung 3.8 zeigt beispielsweise mehrere Wide-Moving-Jams, für die die

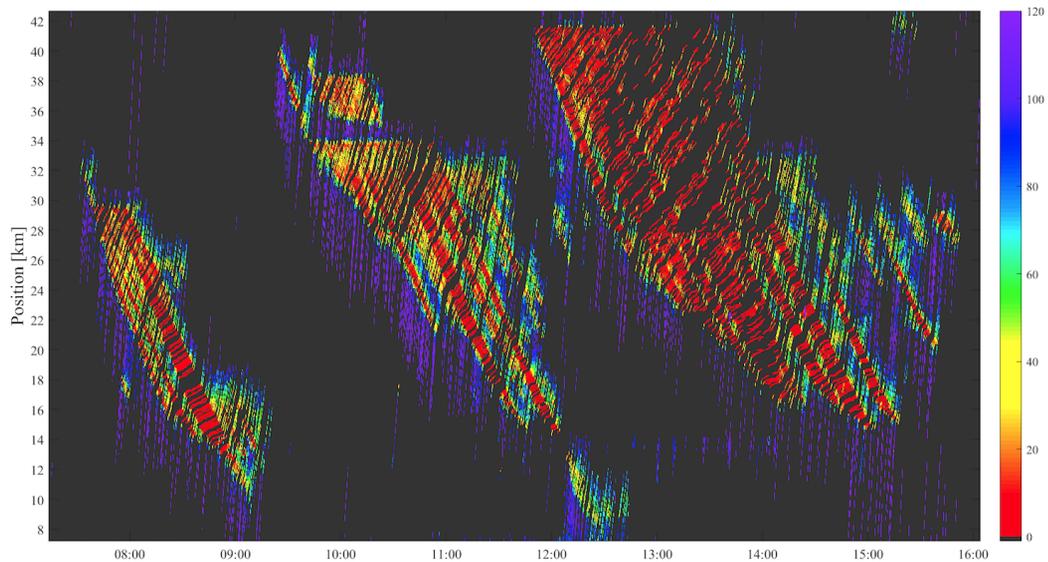


Abbildung 3.8: Floating Car Daten im Zeit-Weg-Diagramm

Ausbreitungsgeschwindigkeiten bestimmt werden können. Werden neben Geschwindigkeiten auch Verkehrsstärken, beispielsweise über Detektoren erfasst, so können Aussagen zu den Zusammenhängen zwischen Verkehrsstärke und Geschwindigkeit – ähnlich wie im Fundamentaldiagramm – für eine Strecke bestimmt werden.

3.2.4 Entscheidungsmodelle

Jeder Verkehrsteilnehmer trifft die Wahl einer Route selbst. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass jeder Verkehrsteilnehmer die für sich optimale Entscheidung trifft und die Route mit dem für ihn größten Nutzen wählt. Verkehrsteilnehmer können Alternativen jedoch subjektiv falsch bewerten [Hilliges, 1995], zum Beispiel, weil nicht die korrekten Informationen zur Einschätzung der Situation vorliegen. Zur Beschreibung dieser Auswahl können Entscheidungsmodelle herangezogen werden. Bei dem C-Logit-Modell handelt es sich um ein Modell, welches speziell für die Entscheidung zur Routenwahl entwickelt worden ist und in gängigen Verkehrssimulationen verwendet wird. Die Auswahlwahrscheinlichkeit wird durch Betrachtung von Alternativrouten l berechnet. Bestimmend für das C-Logit-Verfahren ist die Berücksichtigung eines „commonality factor“, für welchen unterschiedliche Modelle vorliegen [Cascetta et al., 1996]. Das C-Logit Modell beschreibt die Auswahlwahrscheinlichkeit P_k für eine Route $k \in K_i$ durch

Gleichung 3.5

$$P_k = \frac{e^{\theta(V_k - CF_k)}}{\sum_{l \in K_i} e^{\theta(V_l - CF_l)}} \quad (3.5)$$

mit:

 θ : Skalierungsfaktor zur Steuerung des Einflusses von Veränderungen, $\theta > 0$ CF : commonality factor l : Alternativroute V : systematischer Nutzen

3.2.5 Verkehrsumlegungsmodelle

Aus den zuvor ausgeführten Erläuterungen wurde deutlich, dass Straßen über unterschiedliche Kapazitäten verfügen. Wird diese Kapazität an einer Stelle des Verkehrsnetzes überschritten, so führt dies zu Verkehrsstörungen in Form von Staus. Um diesen Zustand zu vermeiden, muss der Verkehr über ein Netz so verteilt werden, dass keine Kapazitätsüberschreitungen stattfinden. Zur Lösung dieser Fragestellung wurden bereits früh unterschiedlichste Verfahren entwickelt. John Glen Wardrop stellte 1952 die Behauptung auf, dass sich die Verkehrsteilnehmer auf einer Relation so lange neue Routen suchen, bis sie die für sich zeitlich optimierte Route innerhalb des Systems finden [Wardrop, 1952]. Dieses Theorem wurde später als Wardropsches Prinzip bekannt. Es besagt, dass die Nutzer eines Systems durch Sammlung von Erfahrung automatisch einen Gleichgewichtszustand bilden. Dabei wird jedem Nutzer unterstellt, jederzeit eine vollständige und aktuelle Verkehrsinformationslage zu besitzen. Aus diesen stark idealisierten Annahmen wurden unterschiedliche deterministische Verfahren zur Verkehrsumlegung entwickelt [Rohde, 2006]. Bekannte und einfache Verkehrsumlegungsmodelle stellen die Alles-oder-nichts-Umlegung oder das Sukzessiv-Verfahren dar. Diese beruhen jeweils auf einer iterativen Aufteilung des Verkehrs, wobei das Sukzessiv-Verfahren im Gegensatz zur Alles-oder-nichts Umlegung Reisezeiteinflüsse durch die Verkehrsstärke berücksichtigt. Die Verfahren sind sehr einfach, da die Verkehrsstärken nur einmalig aufgebaut werden. Dies garantiert nicht, dass eine Konvergenz zu einem Gleichgewichtszustand erreicht wird. Unter Anwendung von nichtlinearen Gleichungssystemen wurde von Frank u. Wolfe [1956] das Verfahren der konvexen Kombination entwickelt. Eine Anwendung dessen durch Beckmann et al. [1956] führt zu einem Verfahren, bei welchem ein Gleichgewichtszustand nach folgender Zielfunktion gebildet wird:

$$\min z(q) = \sum_{a=1}^{n_a} \int_0^{q_a} t_a(\omega) d\omega \quad (3.6)$$

- z : Zielfunktion des Nutzeroptimums
- q : Vektor der Verkehrsstärken auf allen Kanten des Netzes
- q_a : Verkehrsstärke auf der Kante a
- t_a : Fahrtzeit auf der Kante a
- ω : Verkehrsstärke im jeweiligen Iterationsschritt

Die Verkehrsstärke verteilt sich auf mehrere Fahrstreifen und wird entsprechend als Summe der Verkehrsstärken über alle Fahrstreifen gebildet. Zur Lösung dieses Gleichungssystems bietet sich ein Verfahren zur eindimensionalen Minimierung, beispielsweise die Bolzano-Methode an [Sheffi, 1985]. Für weitere Details zur Lösung der Umlegungsproblematik sei an dieser Stelle auf die Ausführungen von Rohde [2006] verwiesen. Diese Formel verdeutlicht, dass dieses Verfahren davon ausgeht, sowohl die Verkehrsstärke q_a , als auch die aktuelle Fahrtzeit t_a für jede Kante zu jedem Iterationsschritt zu kennen. Die Fahrtzeit kann mit Hilfe der Verkehrsstärke abgeschätzt werden, sofern die Kapazität einer Straße bekannt ist. Die Lösung einer solchen Optimierungsaufgabe ist daher nur mit hohem Detailwissen über das zu optimierende Verkehrsnetz, sowie dessen Verkehrsbelastung möglich. Gelingt eine solche Verkehrssumlegung, ist es ggf. möglich, Stausituationen im Netz zu vermeiden, falls die Verkehrsmenge aufgenommen werden kann. Genau dieses Ziel verfolgen Verkehrsmanagementmaßnahmen. Dabei handelt es sich um Routenempfehlungen, welche aus zentraler Stelle von Verkehrsbetreibern durch Verkehrssumlegungsmodelle berechnet wurden. Städte und Verkehrsbetreiber verfügen über Detailwissen zu den jeweiligen Straßennetzen, um Verkehrssumlegungsmodelle rechnen zu können. Dieses lokale Wissen in Navigationsgeräte zu übertragen, kann nicht ohne Weiteres gelingen oder erfordert einen hohen Aufwand durch sehr viele lokale Messungen. Hieraus lässt sich der naheliegende Schritt ableiten, die von Verkehrsbetreibern entwickelten Verkehrsmanagementmaßnahmen in die Navigation zu übertragen.

3.2.6 Systemoptimum versus Nutzergleichgewicht

Verkehrssumlegungen streben einen Gleichgewichtszustand im Verkehrsnetz an. Grundsätzlich kann zwischen zwei verschiedenen Verkehrszuständen unterschieden werden: dem Nutzergleichgewicht und dem Systemoptimum.

- Ein Nutzergleichgewicht liegt vor, wenn kein Verkehrsteilnehmer seine Reisezeit durch die Nutzung einer Alternativroute verkürzen könnte. Es wählt jeder Verkehrsteilnehmer stets die Route mit der für ihn jeweils möglichen, kürzesten Reisezeit.

- Im Gegensatz zum Nutzergleichgewicht strebt ein Systemoptimum nicht die Minimierung der Reisezeit des einzelnen Verkehrsteilnehmers an, sondern zielt auf die Minimierung der Gesamtreisekosten im Netz – also die Summe der Reisezeiten aller Verkehrsteilnehmer.

Das Nutzergleichgewicht beschreibt das Verhalten eines einzelnen Verkehrsteilnehmers, welcher sich - beispielsweise über ein Navigationsgerät - die schnellste Route zu seinem Ziel berechnen lässt. Dabei wird ausschließlich eine Optimierung über die aktuellen Reisezeiten durchgeführt. Verkehrsmanagementzentralen versuchen durch die Entwicklung von Strategien ein Systemoptimum herbeizuführen, indem Einfluss auf die individuelle Routenwahl der Verkehrsteilnehmer genommen wird. Dies kann beispielsweise durch Mautgebühren erfolgen oder, wie in dieser Arbeit beschrieben, über die Empfehlung von strategischen Alternativrouten. Bei der Betrachtung von Verkehrsstrategien ergibt sich schnell ein Paradoxon [Braess, 1969]. Werden kurz vor der Ausbildung eines Staus einige Fahrzeuge über eine Alternativroute umgeleitet, profitieren diese Fahrzeuge möglicherweise von einer geringeren Fahrzeit, verglichen mit der Fahrt durch den Stau. Durch die Umleitung des Verkehrs entsteht dieser Stau jedoch nicht, so dass die nicht umgeleiteten Fahrzeuge die kürzeste und schnellste Route nutzen konnten. Letztendlich haben durch die Umfahrung alle Fahrzeuge von einer schnelleren Reisezeit profitiert. Die Fahrzeuge, welche bereit waren, die Umfahrung zu nehmen, jedoch weniger als alle übrigen. Die Befolgung von strategischen Alternativrouten wird jedoch nur erfolgen, wenn kein zu großer Nachteil für den individuellen Fahrer entsteht. Eine realistische Umsetzung von Verkehrsstrategien kann daher nur einen Kompromiss aus Systemoptimum und Nutzergleichgewicht anstreben.

4 Konzipierung der Methodik

4.1 Voruntersuchungen

In Zusammenarbeit mit der Firma und der Zentralstelle Verkehrsmanagement der (ABDS) wurde im September 2010 ein Erkundungsprojekt *Allacher Tunnel* durchgeführt, um die Herausforderungen bei der Umsetzung eines strategischen Routings zu evaluieren. Dabei standen zwei elementare Bestandteile im Fokus:

- Die Evaluierung bisheriger Verkehrsinformationssysteme.
- Der Aufbau eines einfachen End-to-End Strategischen Routingservices, welcher alle Schritte von der Erstellung und Kommunikation der Route, bis zur Anzeige im Fahrzeug ermöglicht.

Dieser Routingsservice verfolgte zu keinem Zeitpunkt den Anspruch weiterentwickelt werden zu können, sondern sollte auf einfachstem Wege eine vollständige Kette abbilden. Durch den Aufbau eines sehr einfachen Demonstrators ist es möglich, die generellen Problemstellungen, welche bei dem Bau eines ausgereiften Systems bevorstehen, abzuschätzen. Als Szenario für dieses Erkundungsprojekt wurde die in dem Evaluierungszeitraum anstehende Sperrung des Allacher Tunnels gewählt. Der Allacher Tunnel ist Bestandteil des Münchner Autobahnringes, weshalb diesem Streckenabschnitt eine hohe verkehrliche Bedeutung zukommt. Auf Grund von Sanierungsarbeiten wurde die Nordröhre des Tunnels im Zeitraum vom 06.08.2010 bis 13.09.2010 jeweils nachts zwischen 22:00 Uhr und 05:00 Uhr gesperrt. Da die Stadt München eine hohe Belastung des Stadtgebietes vermeiden wollte, wurde eine Umfahrroute über die B471 geplant. Diese wurde jeweils vor Ort durch statische Beschilderung und auch über die Website www.bayerninfo.de [[Verkehrsinformationsagentur Bayern GmbH, 2010](#)] kommuniziert [[Lerner u. Kellermann, 2010](#)].

4.2 Evaluierung bisheriger Verkehrsinformationssysteme

Die Evaluierung aktueller Verkehrsinformationssysteme wurde von der Firma [Pöyry Deutschland GmbH \[2015\]](#) durchgeführt. Untersucht wurden dabei vier Navigationssysteme und sieben Internetseiten. Handelsübliche Navigationssysteme von folgenden Herstellern wurden dabei verwendet:

- Garmin (mit TMC Pro)
- Daimler
- BMW
- TomTom (mit HD-Traffic)

Zusätzlich wurden folgende Internetseiten herangezogen:

- Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e. V. [2010]
- Here Global B.V. [2010]
- Bayerischer Rundfunk [2010]
- ANTENNE BAYERN GmbH & Co. KG [2010]
- INDEX Information Services GmbH [2010]
- Verkehrsinformationsagentur Bayern GmbH [2010]

Routing verschiedener Navigationssysteme bei Tunnelsperrung

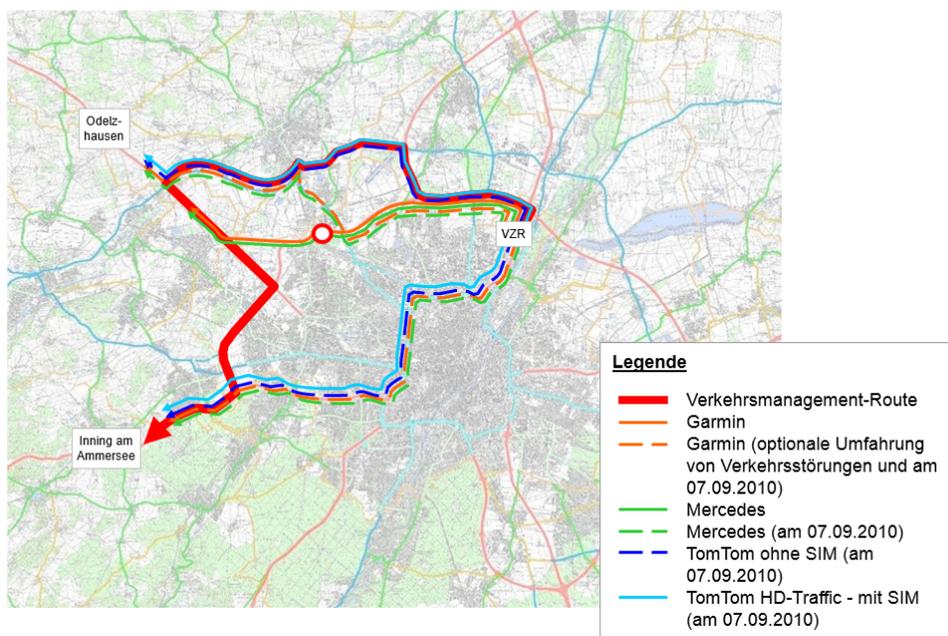


Abbildung 4.1: Visualisierung der unterschiedlichen Ergebnisse der Routenanfragen [Lerner u. Kellermann, 2010]

Alle getesteten Navigationssysteme hatten die Meldung über die Sperrung des Tunnels korrekt im System. Bei den Internetseiten konnten die Informationen über die Sperrung auf allen Systemen, mit Ausnahme von ADAC und Map24, entnommen werden. Auf Basis der Navigationssysteme und der Internetseiten, welche einen Routingdienst zur Verfügung stellten, wurde eine Routenberechnung durchgeführt, die bei normalen Verkehrsbedingungen durch den Allacher Tunnel geführt hätte. Als Start wurde von der ABDS im Münchner Norden zum Ziel Ammersee geroutet (vgl. Abbildung 4.1). Obwohl alle Systeme die Meldung erfasst hatten, führte keines über die Ausweichroute, die von der Stadt vorgegeben und ausgeschildert war. Stattdessen leiteten alle Systeme die Route über den Mittleren Ring durch München. Dieses Verhalten war explizit unerwünscht.

Die Alternativroute wurde in dem Freitext der TMC-Meldung mitgeschickt. Dass trotzdem keines der Systeme die Route berücksichtigt hat, liegt daran, dass heutige Navigationsgeräte keine automatisierte Auswertung des Freitext durchführen. Dieses Ergebnis illustriert den Handlungsbedarf auf diesem Gebiet. Die Alternativroute musste vor Ort beschildert werden und führte letztendlich zu einem Informationskonflikt zwischen Beschilderung und Navigationssystem. Die von der ABDS aufwendig geplante Alternativroute wurde von den meisten Autofahrern nicht verfolgt.

4.3 Ein erster Strategischer Routing-Service

Der zweite und entscheidende Teil der Untersuchung stellt die Entwicklung eines ersten vollumfänglichen Dienstes dar, welcher in der Lage ist eine öffentliche Routenempfehlung zu berücksichtigen und ins Navigationssystem einzubinden. Hierzu mussten unterschiedliche Schritte durchgeführt werden.

- Digitalisierung der Route
- Kommunikation der Sperrungszeiten
- Entwicklung eines Routers, welcher die Umleitung berücksichtigt
- Kommunikation der neuen Route ans Fahrzeug
- Integration der Route ins Navigationssystem

Der Demonstrator wurde auf Basis eines Offboard-Routing-Systems aufgebaut. Dies bedeutet, dass die Route nicht direkt im Fahrzeug berechnet wurde, sondern auf einem Server, welcher das Fahrzeug anschließend mit der Route versorgt. Dies simplifiziert die Gesamtsituation erheblich, da im Fahrzeug selbst keine Veränderungen vorgenommen werden mussten. Die oben genannten Schritte wurden wie folgt durchgeführt.

Digitalisierung der Route: Der Verlauf der Route muss in digitaler Form an den Routingserver übermittelt werden. Da es sich in diesem Fall nur um eine einzige, statische Route handelt, wurde diese im Server auf Basis von Kartenlinks manuell vorversorgt. Dieses Verfahren eignet sich nicht für dynamische oder standardisierte Schnittstellen, ist aber für einen einzelnen Test ausreichend.

Kommunikation der Sperrungszeiten: Die Sperrung erfolgte nicht zu festen Uhrzeiten. Die o. g. Uhrzeiten dienten nur zur Orientierung, allerdings konnten durch Differenzen im Betriebsablauf Abweichungen entstehen. Diese wurden live aus der Verkehrszentrale überwacht. Um diese Veränderungen in Echtzeit auch im Routingdienst berücksichtigen zu können, musste ein Kommunikationskanal zur Verkehrszentrale geschaffen werden. Dieser wurde mit Hilfe eines Smart-Phones geschaffen. Durch Bedienung einer Internetseite konnte aus der Verkehrsleit-zentrale ein Signal versendet werden, sobald die Sperrung initialisiert oder wieder aufgehoben wurde (vgl. Abb 4.2).

Entwicklung eines Strategischen Routers: Die Entwicklung eines Routers zur Berücksichtigung von Umleitungsempfehlungen kann beliebig komplex werden. Für diesen ersten Entwurf wurde ein einfacher Dienst entwickelt, welcher bei Durchfahung der Sperrung die entsprechende Route durch die Umfahungsrouten substituiert. Bei einer späteren Entwicklung müssen weitere Randbedingungen eingehalten werden, da diese einfache Betrachtung nur für eine Start-Ziel-Beziehung funktioniert.



Abbildung 4.2: Internetseite zur Kommunikation der Sperrzeiten

Kommunikation der neuen Route ans Fahrzeug: Die Kommunikation der Route ans Fahrzeug wurde über Mobilfunk realisiert. Das Fahrzeug stellt auf Anfrage des Nutzers eine Routenanfrage an den Server. Die Kommunikation erfolgt über http ohne Berücksichtigung von standardisierten Protokollen.

Integration der Route ins Navigationssystem: Zur Integration des Demonstrators ins Fahrzeug, wurde eine Internetseite erstellt, welche die notwendigen Informationen im Fahrzeug darstellt. Die letztendliche Integration erfolgte über eine im Fahrzeug vorhandene Routenimport-Schnittstelle (BMW-Routes). Diese dient eigentlich zur Integration eigener, statischer Routen, welche vorab im Internet geplant werden können. Im Rahmen dieses Demonstrators wurde an die Schnittstelle die statische Route angeschlossen.

Am 07.09.2010 wurde der Demonstrator im Zeitraum von 21:00 Uhr bis 23:00 Uhr getestet. Somit war es möglich, das Verhalten sowohl mit, als auch ohne Sperrung des Tunnels zu beobachten.

Abb. 4.3 zeigt das Verhalten während der Sperrung um kurz nach 22:00 Uhr. Die Route wird über die Umfahrungsempfehlung geführt.



Abbildung 4.3: Ergebnis der Routenanfrage mit dem Demonstrator

4.4 Entwicklung von notwendigen Handlungsfeldern

Dieses Erkundungsprojekt lieferte sehr wertvolle Informationen über die für eine Entwicklung einer prototypischen Umsetzung notwendigen Handlungsfelder. Auch wenn die einzelnen Herausforderungen jeweils auf sehr rudimentäre und einfache Art gelöst worden sind, so konnten die wichtigsten Handlungsfelder in anschließenden Diskussionen mit dem Infrastrukturbetreibern identifiziert und herausgearbeitet werden. Diese sind:

- Nutzerwunsch
- Strategien
- Routingserver
- Routingalgorithmus
- Digitalisierung der Strategien
- Georeferenzierung
- Testfelder
- Auswirkungen

Im Folgenden werden die Felder kurz erläutert.

Nutzerwunsch: Die Umleitung um die Sperrung des Tunnels Allach (vgl. Abbildung 4.1) liefert ein sehr deutliches Beispiel dafür, dass Nutzerwunsch und Interessen des Verkehrsbetreibers nicht zwangsläufig in Einklang stehen. Die festgelegte Umfahrroute wurde von verschiedenen Projektteilnehmern als sehr umwegig kritisiert und von einigen abgelehnt. Dies wirft zwangsläufig die Frage auf, inwieweit Empfehlungen von Verkehrsbetreibern ungeprüft übernommen werden können, ohne die Auswirkungen auf einen individuellen Fahrer zu verifizieren. Es soll durch die Anwendung eines strategischen Routings nicht zwangsläufig ein vollständiges Systemoptimum erreicht werden, sondern auch die Auswirkungen auf einzelne Fahrer untersucht werden. Als erstes Handlungsfeld wird daher die Evaluierung des Nutzerwunsches festgelegt. Im Rahmen dieser Arbeit wird folglich ein Evaluierungskonzept erstellt, um herauszufinden, wie groß die Bereitschaft eines Individuums ist, Umwege in Kauf zu nehmen, um das Gesamtsystem zu stabilisieren.

Strategien: Schon beim ersten Kontakt mit der [Autobahndirektion Südbayern \[2015\]](#) wurde deutlich, dass bisher kein gemeinsames Verständnis über Strategien existiert. Es ist bisher weder definiert, was eine Strategie beinhaltet, noch wie eine solche Strategie abgebildet werden kann. Daher ist Bestandteil des zweiten Handlungsfeldes, zunächst eine Recherche über existierende Strategiedefinitionen durchzuführen. Anschließend müssen diese auf Adaption oder Wiederverwendbarkeit überprüft werden.

Algorithmus: Eine bedeutende Fragestellung behandelt die Integration der Strategien in die Routenberechnung. Es ist zu evaluieren, wie bestehende Routingalgorithmen angepasst werden können, um effizient Strategien bei der Routensuche zu berücksichtigen. Anschließend wird diese Anpassung durchgeführt und bewertet.

Routingserver: Der Routingserver bildet die technische Kernkomponente des Gesamtaufbaus. Es wird ermöglicht, Routen zu berechnen, welche den strategischen Empfehlungen der Städte genügen und diese im Fahrzeug anzuzeigen. Es wird eine mögliche Architektur und ein erster Prototyp entwickelt.

Digitalisierung der Strategien: Es wird ein Konzept erstellt, wie die zuvor entwickelten Strategien digital abgebildet werden können und es werden beispielhafte Strategien erzeugt.

Georeferenzierung: Oftmals verfügen Datengeber und Datennehmer über unterschiedliches Kartenmaterial. Daher wird eine Herausforderung in der kartenunabhängigen Kommunikation der strategischen Routen gesehen. Bestehende Verfahren werden auf Tauglichkeit für dieses Problem untersucht, bewertet und ggf. angepasst.

Testfelder: Die entwickelte prototypische Umsetzung wird an unterschiedlichen Testfeldern evaluiert.

Auswirkungen: Der Einsatz eines strategischen Routings hat unter Umständen nicht nur Einfluss auf das Verhalten eines Einzelfahrzeugs, sondern verfolgt das Ziel, das gesamte Verkehrssystem zu beeinflussen und zu verbessern. Diese Entwicklung lässt sich nicht durch den Einsatz einzelner Prototypen beobachten. Daher wird eine Verkehrsflusssimulation durchgeführt, um das Verhalten bei einer hohen Ausstattungsrate zu beobachten.

In Kapitel 5 werden die erste sechs Handlungsfelder detailliert untersucht, Kapitel 6 beschreibt die Anwendung und Evaluierung des entwickelten Prototyps, Kapitel 7 schildert die Durchführung der Verkehrsflusssimulation.

5 Entwicklung des Strategischen Routings

5.1 Definition von Strategie

In den vorangegangenen Kapiteln wurde stets von dem Ziel gesprochen, Strategien in die Navigation zu integrieren. Deshalb wird an dieser Stelle zunächst eine Definition für den Begriff Strategie gegeben.

Definition 1: Strategie

Unter Strategien wird im Rahmen dieser Arbeit jegliche Art von erweiterten Verkehrsinformationen und Routenwahlempfehlungen verstanden, welche das Ziel eines optimierten Verkehrsflusses verfolgen. Diese werden von zentraler Stelle (z. B. Infrastrukturbetreibern) ausgegeben, um eine Beeinflussung des Routenwahlverhaltens von Verkehrsteilnehmern zu bewirken.

Kernziel einer Strategie ist somit nicht die Optimierung der Route für einen einzelnen Fahrer, sondern das Streben nach einem Systemoptimum. Diese strategischen Informationen sollen zukünftig aus unterschiedlichsten Quellen, zum Beispiel direkt von städtischen Verwaltungseinrichtungen aus einer Verkehrsleitzentrale oder von Veranstaltern von großen öffentlichen Veranstaltungen stammen. Heutige Verkehrsmeldungen sind zumeist Negativmeldungen über Verkehrsstörungen oder Gefahren. Diese Meldungen sollen zwar im Routing weiterhin berücksichtigt werden, sind allerdings nicht als Strategien bzw. erweiterte Verkehrsinformationen anzusehen. Beispiele hierfür sind:

- Verkehrsflussstörungen (zum Beispiel Stau, stockender Verkehr oder Kapazitätserschöpfung),
- Unfälle,
- Sperrungen (auch abschnittsweise Sperrungen) und
- Baustellen.

Auch wenn diese Daten nicht als Strategien angesehen werden, ist deren verbesserte Integration in die Navigation wichtig. Die Abdeckung solcher Meldungen ist vor allem im innerstädtischen Bereich bisweilen unbefriedigend. Der Hauptgrund hierfür ist naheliegend: Viele dieser Daten betreffen Straßen, welche nicht vom TMC-Netz abgedeckt werden. Somit ist eine Referenzierung dieser Daten im Navigationssystem nicht möglich. Sogar für kleine innerstädtische Baustellen oder Sperrungen werden häufig örtliche Umleitungen eingerichtet und mit Schildern abgesteckt. Besonders interessant wird es, wenn solche Umfahrungsempfehlungen auf Grund von eingerichteten Maßnahmen erfolgen und kombiniert mit den Störungen kommuniziert werden. Beispiele für eingerichtete Maßnahmen sind:

- Umleitungsempfehlungen,

- Synchronisierte Lichtsignalanlagen (Grüne Wellen),
- Angepasste Schaltprogramme von Lichtsignalanlagen (z. B. Grünzeitverlängerung),
- Fahrstreifenfreigaben,
- Zuflussoptimierung,
- Restkapazitätsangaben oder
- Vorzugsnetze.

Einige dieser Maßnahmen wurden bereits in Kapitel 2.1 genannt. Diese Maßnahmen können entweder als allein stehende Maßnahme erstellt werden oder aber einer der oben genannten Störungen zugeordnet sein, beispielsweise um die durch eine Störung erhöhte Belastung auf einer Ausweichroute bewältigen zu können. Wie die unterschiedlichen Anwendungsbereiche der Strategien zeigen, ist es sinnvoll, unterschiedliche Arten von Strategien zu definieren, um die Einzelfälle bestmöglich abbilden zu können. Um bei einer späteren Umsetzung die Strategien allgemeingültig berücksichtigen zu können, soll keine Unterteilung nach Ursache stattfinden, sondern nur nach Art der Aktivierung der Strategien. Daher werden die Strategien unterteilt in:

- Allgemeingültige Strategien und
- Trigger-Strategien.

Im Folgenden werden die beiden Arten der Strategien näher beschrieben.

5.1.1 Allgemeingültige Strategien

Die oben genannten, erweiterten Verkehrsinformationen, wie Stau oder geschaltete Maßnahmen, haben den Umstand gemein, dass sie für alle Verkehrsteilnehmer gleichermaßen gelten. Unabhängig von der aktuellen Position im Verkehrsnetz oder dem gewünschten Reiseziel treffen globale Ereignisse, wie Fahrstreifenfreigaben, alle Verkehrsteilnehmer. Die Strategien betreffen jeweils einen bestimmten Straßenabschnitt, im Folgenden als Link bezeichnet. Diese einfache Art von Strategie, wird als allgemeingültige Strategie bezeichnet. Ihre wichtigsten Merkmale sind:

- Zeitangabe,
- Georeferenzierung und
- Art der Maßnahme.

Die Art der Maßnahme muss wiederum Informationen zu den Auswirkungen liefern. So ist beispielsweise die Angabe einer erwarteten Geschwindigkeit, bzw. eines Geschwindigkeitsverlaufs, sinnvoll. Bei einigen Maßnahmen, wie beispielsweise einer geänderten Verkehrsführung, ist die Angabe der reinen Maßnahme

ausreichend. Die allgemeingültigen Strategien eignen sich für unterschiedliche Informationen, so können über diesen Mechanismus auch ganze Vorzugnetze kommuniziert werden. Ein Beispiel für ein Vorzugsnetz wird mit den Roten Routen in München in Kapitel 6.3.2 gegeben. Nicht möglich hingegen sind die Angabe von vollständigen Routen, Aktivierungsmechanismen oder die Aufteilung des Verkehrs auf unterschiedliche Routen. Hierzu werden Trigger-Strategien verwendet.

5.1.2 Trigger-Strategie

Eine weitere Art von Strategie stellen Trigger-Strategien dar. Diese Art von Strategie unterscheidet sich grundlegend von den zuvor genannten Strategien, da sie nicht allgemeingültig, sondern je nach Fahrbeziehung eines Fahrzeugs unterschiedliche Maßnahmen berücksichtigt. Ein Beispiel für eine solche Trigger-Strategie stellt eine über Wechselwegweiser oder Schilder angezeigte Fahrempfehlung dar. Diese soll nur bei Verkehrsteilnehmern Gültigkeit haben, welche das Schild passieren und das auf dem Schild angezeigte Reiseziel haben. Diese ortsbezogenen Auslöser (die Strategie wird „ausgelöst“, engl. trigger, sobald ein Fahrzeug diesen Ort passiert) werden als Trigger verstanden. Eine Trigger-Strategie muss mindestens einen Trigger (Start- oder Zieltrigger) besitzen. Die maximale Anzahl ist theoretisch nicht begrenzt. Um unterschiedliche Arten von Start-Ziel-Beziehungen abbilden zu können, werden harte und weiche Trigger unterschieden. Unter harten Triggern werden solche verstanden, die auf jeden Fall vollständig durchfahren werden müssen. Ein Anwendungsbeispiel hierfür sind die genannten Wechselweganzeiger. Die Verwendung von harten Triggern bietet sich an, wenn an bestimmten Orten konkrete Entscheidungen getroffen werden. Großräumige Umfahrungen können durch diese Art von Strategien zu meist nicht abgebildet werden, da (bspw. durch Verkehrsmeldungen im Umfeld) nicht garantiert werden kann, dass der Trigger überhaupt überfahren wird. Für großräumige Umfahrungen wird eine weitere Form von Triggern definiert: die weichen Trigger. Hierunter werden wiederum Trigger verstanden, welche nur erreicht werden müssen (z. B. Zielgebiete). Eine Triggerstrategie muss mindestens über folgende Eigenschaften verfügen:

- Zeitangabe,
- einen oder mehrere Einfahrtrigger oder
- einen oder mehrere Ausfahrtrigger und
- mindestens eine Alternativroute.

Strategien mit harten Triggern wurden auch bereits im Projekt dMotion verwendet (vgl. Abbildung 2.4). Es können auch weitere Informationen, zum Beispiel über

die Art des Fahrzeugs oder des Antriebs, in die Strategie integriert werden. Solche Angaben eignen sich beispielsweise um Elektrofahrzeugen andere Routen zuzuweisen, als Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. Über die Angabe von mehreren Alternativrouten kann der Verkehr auf unterschiedliche Umfahrrouten aufgeteilt werden. Werden den Fahrzeugen individuelle Verkehrsstrategien übermittelt, wird es ermöglicht, den Verkehr bestmöglich über ein Netz zu verteilen.

5.2 Evaluation der Nutzeranforderungen

Kapitel 3.2.6 beschreibt die Unterschiede zwischen einem Nutzergleichgewicht und einem Systemoptimum. Was bei diesen theoretischen Grundlagen nicht außer Acht gelassen werden darf, ist der Fakt, dass auch ein Systemoptimum nur durch die Nutzer herbeigeführt werden kann. Letztendlich ist die Entscheidung des Fahrers ausschlaggebend für die gewählte Route. Um ein Systemoptimum zu erreichen, darf die individuelle Route für jeden einzelnen Verkehrsteilnehmer nicht gravierend schlechter sein als seine möglichen Alternativen, sonst würde er diese Route nicht wählen. Dies könnte sogar Auswirkungen auf das dem System entgegengebrachte Vertrauen haben. Mehrfache schlechte Erfahrungen führen zu einer Ablehnung des Systems und zu einer Nichtbefolgung der Empfehlung. Ist dieser Zustand eingetreten, kann das Streben nach einem Systemoptimum nicht mehr verwirklicht werden. Aus diesem Grund ist es wichtig, bei der Entwicklung eines Routingverfahrens stets auch die Anforderungen des Nutzers im Blick zu haben. Um herauszufinden, was diese Anforderungen eines Nutzers sind, gilt es, ein Erhebungsverfahren und eine Auswertemethodik zu entwickeln, welche in der Lage ist, die Anforderungen eines Nutzers an eine Alternativroute zu evaluieren.

Die grundlegende Fragestellung ist die nach der Bewertung einer Route durch den Nutzer. Die verwendeten Verfahren zur Routenberechnung berücksichtigen zur Routensuche nur die Kriterien Reisezeit und Fahrtstrecke. Oftmals sind diese Kriterien aber nicht ausreichend zur Bestimmung der favorisierten Route eines Verkehrsteilnehmers. Vor allem im urbanen Raum existiert oftmals eine Vielzahl an Alternativen, welche sich in Reisezeit und Fahrtstrecke nur marginal voneinander unterscheiden (vgl. Abbildung 5.1).

Es ist anzunehmen, dass ein Verkehrsteilnehmer in einer solchen Situation nicht mehr ausschließlich auf Basis von Reisezeit entscheidet, sondern andere subjektive Entscheidungskriterien oder Erfahrungswerte berücksichtigt. Um auch genau diese subjektive Entscheidungsfindung bei der Wahl einer Alternative abbilden zu können, wurde eine Umfrage erstellt, bei der die Befragten aus mehreren Routen ihre bevorzugte Route bestimmen sollten. Um sicher zu stellen, dass die Teilnehmer diese subjektiven Kriterien mit in die Entscheidung einfließen lassen, wurden die Teilnehmer gebeten, Routen in ihrer Heimatstadt zu bewerten.

5.2.1 Entwicklung einer Evaluierungsmethodik

Ziel der Befragung ist es nicht bloß, gute Alternativrouten zu erhalten, sondern vielmehr die Merkmale einer guten Route herauszufinden. Um dies zu errei-

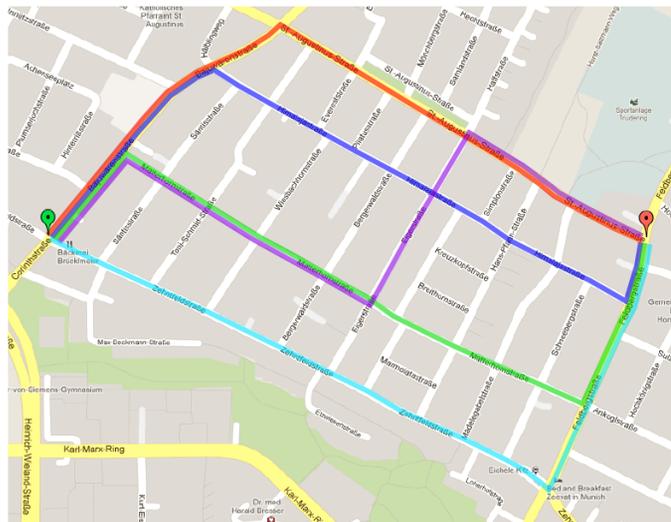


Abbildung 5.1: Alternativrouten im urbanen Bereich [Google LLC, 2015]

chen, werden die Routen im Nachgang zu der Umfrage auf ihre Eigenschaften untersucht. Folgendes Vorgehen wird hierzu durchgeführt

1. Durchführung der Umfrage
2. Datenbereinigung
3. Merkmalextraktion
4. Analyse
5. Bewertung

5.2.2 Durchführung der Umfrage

Die Umfrage wurde von August 2012 bis Oktober 2012 durchgeführt. In diesem Zeitraum nahmen rund 200 Teilnehmer an der Umfrage vollständig oder teilweise teil. Jeder Teilnehmer wurde gebeten, 15 Routenszenarien zu bewerten. Auf diese Weise wurden insgesamt 2.070 Datensätze erzeugt. Zu Beginn der Umfrage wurden den Probanden statistische Fragen zu deren Person und Fahrverhalten gestellt, um bei der Auswertung sicherzustellen, dass nur Ergebnisse von Teilnehmern in das Ergebnis einfließen, welche über Fahrerfahrung innerhalb des untersuchten Gebiets verfügen.

Im zweiten Teil der Umfrage wurde den Probanden eine interaktive Karte mit jeweils drei Alternativrouten gezeigt. Ergänzend wurde eine Verkehrslage mit „wenig“ oder „viel“ Verkehr angegeben. Diese drei Alternativrouten mussten nun von gut nach schlecht sortiert werden. Abbildung 5.3 zeigt einen Schritt des Umfragebogens. Die Entscheidung für eine Route während der Umfrage erfolgte

5 Entwicklung des Strategischen Routings

impulsiv, ohne sämtliche Randbedingungen zu kennen und in die Entscheidung einfließen zu lassen. Daher gibt es auch nicht nur eine „perfekte“ Route. Um dieses Verhalten abbilden zu können, wurden die Probanden gebeten die Routen wertend zu ordnen. Somit entsteht eine Abstufung, bei der Vorzüge oder Nachteile von einzelnen Routen bewertet werden, ohne dass eine harte Entscheidung getroffen werden muss.

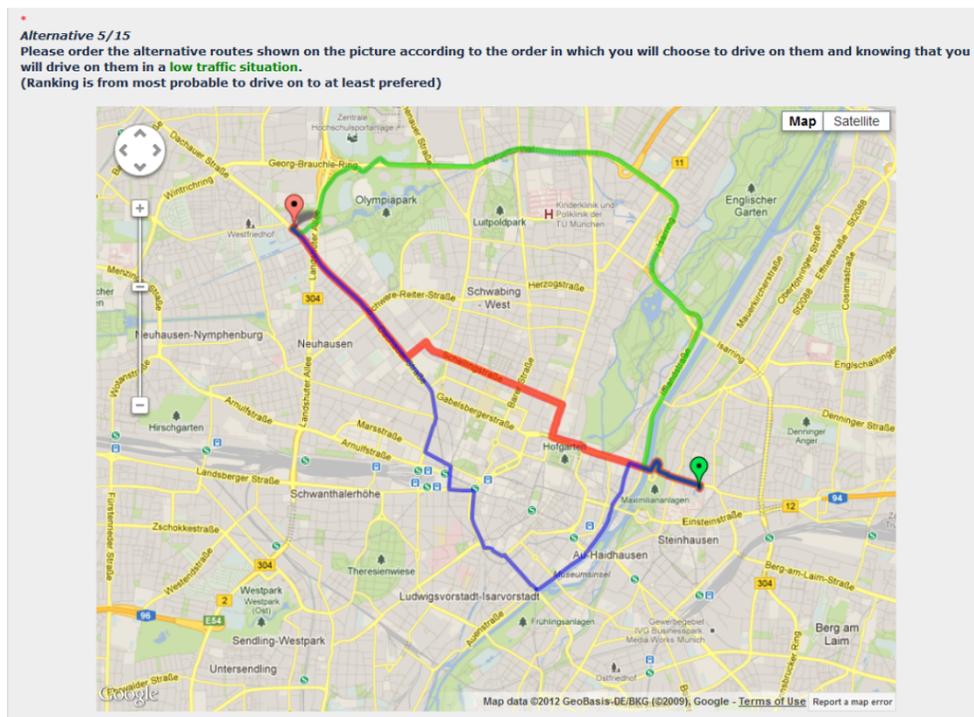


Abbildung 5.2: Darstellung der Routen bei der Nutzerumfrage [Google LLC, 2015]

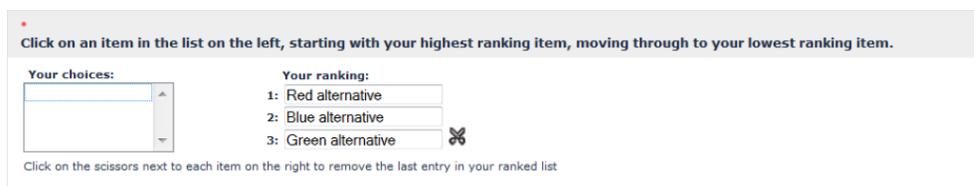


Abbildung 5.3: Ranking der Routen bei der Nutzerumfrage

Die Routenauswahl der Umfrage erstreckte sich über das gesamte Münchner Stadtgebiet. Um möglichst realistische Fahrbeziehungen zu erhalten und der Problematik zu entgehen, durch ein Zufallsprinzip auf unrealistische Start- und Zielpunkte zu treffen, wurde auf reale Start-Zielbeziehungen des Münchner Car-Sharing-Dienstes DriveNow [DriveNow GmbH & Co. KG, 2015] zurückgegriffen. Diese wurden während der Umfrage zufällig und unabhängig vom Probanden

ausgewählt. Die Routenberechnung erfolgte auf Basis des Camvit-Routers (vgl. Kapitel 3.1.4), da dieser in der Lage ist, sehr realistische und trotzdem sehr unterschiedliche Routen zu berechnen. Abb 5.4 zeigt die Abdeckung des Münchner Verkehrsnetzes, welches während der Umfrage erreicht wurde.

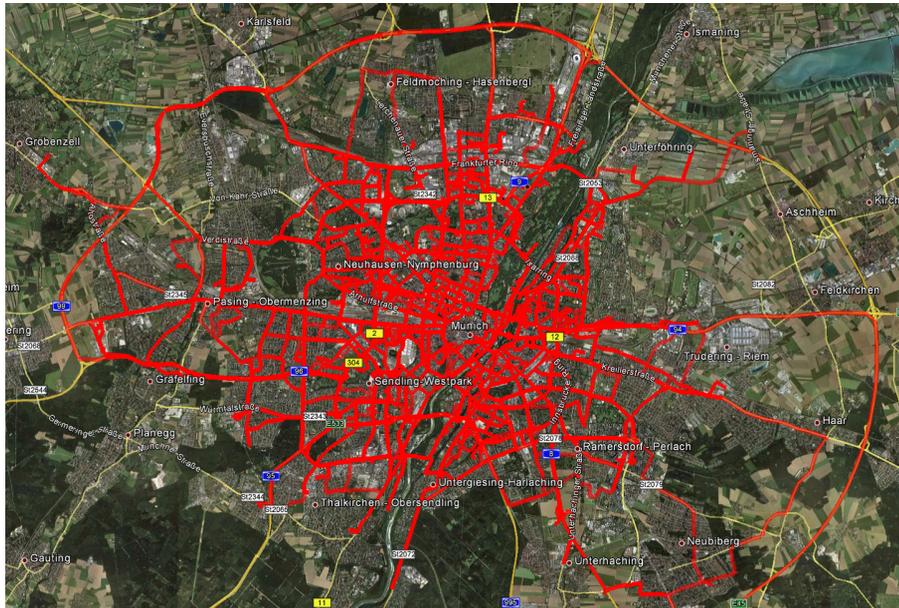


Abbildung 5.4: Erfasste Straßen bei der Nutzerumfrage

5.2.3 Merkmalextraktion

Die Auswertung der unterschiedlichen Merkmale erfolgt auf Basis des Kartenmaterials der Firma [Here Global B.V. \[2010\]](#). Die Auswahl wurde bewusst breit gefasst, um den Einfluss unterschiedlichster Merkmale zu erfassen. Die Routen wurden auf Basis folgender Eigenschaften untersucht:

- Länge
- Reisezeit
- Straßenkategorie
- Einbahnstraßen
- Anzahl der Fahrstreifen
- Baulich getrennte Fahrbahnen
- Geschwindigkeitsklasse
- Tunnel
- Brücken
- Anzahl der Lichtsignalanlagen

- Anzahl der Bahnübergänge
- Anzahl der Kreisverkehre
- Anzahl der Änderungen der Straßenkategorie (jeweils aufgeschlüsselt nach Veränderung)
- Anzahl der Änderungen der Geschwindigkeit (jeweils aufgeschlüsselt nach Veränderung)
- Anzahl der Knotenpunkte mit Verkehrszeichen
 - Halt. Vorfahrt gewähren (Zeichen 206)
 - Vorfahrtsstraße (Zeichen 306)
 - Vorfahrt gewähren (Zeichen 205)
- Anzahl Manöver
 - Linksabbiegen / -einbiegen
 - Rechtsabbiegen / -einbiegen
 - 360 Grad Wendemanöver (U-Turn)

Eine Normalisierung der unterschiedlichen Merkmale einer Route ist notwendig, da die Routen jeweils über eine unterschiedliche Länge verfügen. Dabei wurden nicht nur die Durchschnittswerte gebildet (z. B. bei der Reisezeit), sondern die einzelnen Werte pro Kilometer berechnet. Um die Routen mit demselben Start und Endpunkt (je Frage im Fragebogen) untereinander vergleichbar zu gestalten, wurden die zweite und dritte Route auf die erste Route bezogen. Eine weitere Normalisierung wurde notwendig, da die unterschiedlichen Routenkriterien sehr unterschiedliche Wertebereiche beschreiben können. So können sich beispielsweise auf einer Route 20 Linksabbiegevorgänge und nur zwei Stoppschilder befinden, die Stoppschilder sich aber als deutlich negativer für einen Fahrer auswirken. Um dieses Phänomen zu kompensieren, wurden sämtliche Werte einer Normalisierung unterzogen, welche die einzelnen Werte auf die Summe aller dieser Merkmale in allen berechneten Routen bezieht. So wurden alle Werte in denselben Wertebereich $[0,1]$ transformiert.

5.2.4 Ranking Algorithmen

Mit Hilfe der Umfrage wurden sehr viele Routen bewertet. Jede dieser Routen verfügt wiederum über eine Vielzahl unterschiedlicher Attribute. Um eine so große Menge von Informationen verarbeiten zu können, bietet es sich an, auf Data-Mining-Ansätze zurückzugreifen. Data-Mining-Ansätze wurde entwickelt, um in sehr großen Datenmengen bisher unbekannte Zusammenhänge oder Verknüpfungen zu entdecken [Witten u. Frank, 2005]. In den vergangenen Jahren wurden, vorangetrieben durch das Internet und die sozialen Netzwerke, viele Daten unterschiedlichster Art zugänglich. Dies trieb auch die Verbreitung

und Weiterentwicklung von Data-Mining-Ansätzen rasant voran, so dass inzwischen Algorithmen in beliebiger Komplexität und für unterschiedlichste Anwendungsfälle existieren. Im Speziellen werden in dieser Arbeit unterschiedliche Ranking-Algorithmen auf ihre Anwendbarkeit bei der vorliegenden Fragestellung untersucht. Ranking-Algorithmen sind vor allem durch die Nutzung in Suchmaschinen berühmt geworden. Li [2011] kategorisiert die Ranking-Algorithmen in drei verschiedene Gruppen:

- Pointwise Ranking Approach,
- Pairwise Ranking Approach und
- Listwise Ranking Approach.

Bei dem **Pointwise-Ansatz** wird das Trainingsset in Punktepaare unterteilt. Jeder Punkt beschreibt dabei genau ein Merkmal. Die Pointwise Algorithmen sind besonders schnell, haben allerdings den Nachteil, dass jeweils nur zwei Punkte verglichen werden und die Gesamtstruktur nicht berücksichtigt wird.

Beim **Pairwise Ranking** werden die Strukturen eines Rankings bereits teilweise berücksichtigt, da jeweils zwei Elemente miteinander verglichen werden. Nach der Lernphase können alle Konditionen eines Rankings abgebildet werden, indem die Beziehungen der einzelnen Elemente untereinander berücksichtigt werden.

Der **Listwise Ansatz** hingegen berücksichtigt die vollständige Struktur des durchgeführten Rankings. Im Gegensatz zu den Pointwise Ranking und dem Pairwise Ranking kann der Listwise Ansatz nicht direkt über eine Regression gelöst werden und erfordert die Einführung eines Scores. Da dieser Ansatz allerdings die Abbildung der vollständigen Struktur des Rankings ermöglicht, wird dieser Ansatz gewählt und im Folgenden beschrieben.

Auswertung der Ranking-Algorithmen

Um die Ergebnisse eines Ranking Algorithmus auswerten zu können, muss deren Abweichung zum Wahrheitswert $Y = y_1, y_2, \dots, y_n$ aufgezeigt werden. Nach Järvelin u. Kekäläinen [2000] eignet sich hierzu das Discounted Cumulative Gain (DCG).

$$DCG_p = \sum_{i=1}^p \frac{2^{y_i} - 1}{\log_2(i + 1)} \quad (5.1)$$

wobei i über alle Bewertungen p iteriert und Y die Relevanz bezogen auf den Wahrheitswert darstellt.

Da allerdings unterschiedliche Faktoren, je nach Route, unterschiedlich stark Einfluss auf die Bewertung haben, wurden die Ergebnisse, wie zuvor beschrieben,

normalisiert. Das Normalized Discounted Cumulative Gain (NDCG) wurde daher mit dem perfekten Ranking, dem Ideal Discounted Cumulative Gain (IDCG), normalisiert:

$$NDCG_p = \frac{DCG_p}{IDCG_p} \quad (5.2)$$

5.2.5 Trainingsphase

Die Umfrage lieferte ein umfangreiches Set an Trainingsdaten für den Algorithmus. Zu jeder Route existieren zwei Alternativrouten und das entsprechende Nutzerranking. Zunächst wird der Featurevektor $x_{i,j}$ für jede Route j der Umfrage i erstellt. Weiterhin wird Y_i als Referenzwert für jedes Umfrageergebnis als die tatsächlich vom Nutzer abgegebene Rangordnung gesehen.

ListNET-Methode

Für die Berechnung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen verschiedener Permutationen eignen sich Ansätze basierend auf der ListNET-Methode. Die Permutationen beschreiben dabei das vom Nutzer abgegebene Ranking. Eine Bewertung $A=3$, $B=1$ und $C=2$ wird durch die Permutation (B,C,A) beschrieben. Nach [Plackett \[1975\]](#) lässt sich die Wahrscheinlichkeit einer Permutation berechnen mit:

$$P_s(\pi) = \prod_{j=1}^n \frac{s_{\pi(j)}}{\sum_{k=j}^n s_{\pi(k)}} \quad (5.3)$$

dabei sei $s_{\pi(j)}$ der Score für das Element j bei der Permutation π .

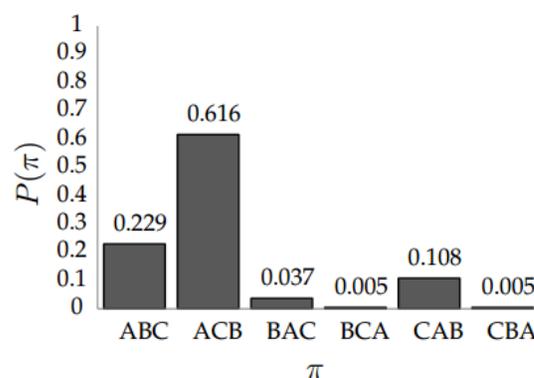


Abbildung 5.5: Beispielhafte Verteilung der Wahrscheinlichkeit eines Rankings

Abb. 5.5 zeigt eine beispielhafte Wahrscheinlichkeitsverteilung. Dabei sind auf der x-Achse die unterschiedlichen Permutationen eines Rankings von drei Alternativrouten A, B und C aufgeführt. Die y-Achse stellt die berechnete Wahrscheinlichkeit jeder Permutation dar. In diesem Beispiel erhält das Ranking mit A als beste, C als mittlere und B als schlechteste Alternative die jeweilige Wahrscheinlichkeit.

Lokale Regression

Die Lokale Regression wird verwendet, um den Score s für jede Alternative zu berechnen. Die ListNET Methode verwendet in der Regel ein Neuronales Netzwerk als Regressionsmodell. An dieser Stelle ist nach Cao u. et al. [2007] folgender vereinfachter Ansatz ausreichend:

$$s_i = \exp f(x_i, w) = \exp w^T x_i \quad (5.4)$$

wobei x den Featurevektor darstellt und w die Parameter der Regression.

Feature-Analyse

Als letzter Schritt soll die eigentliche Feature-Analyse durchgeführt werden. Mit dem beschriebenen Verfahren ist es letztendlich möglich Alternativrouten direkt zu bewerten. Allerdings steht die Analyse der Features im Vordergrund. Diese Untersuchung wurde vor allem durchgeführt, um durch den erhaltenen, durchschnittlichen Feature-Vektor bestimmen zu können, welche subjektiven Kriterien bei der Bewertung einer Route berücksichtigt werden. Um den Feature-Vektor analysieren zu können, muss zunächst eine Verlustfunktion $L(y, z)$ aufgestellt werden, welche den Fehler zwischen den Ergebnissen des Modells z mit den Wahrheitswerten y vergleicht. Eine Verlustfunktion, welche die Ranking-Struktur einbezieht, wurde von Kullback-Leibler definiert [Kullback u. Leibler, 1951]:

$$L(y_i, x_i, w) = - \sum_{g \in G_k} P_{y_i}(g) \log P_{f(x_i, w)}(g) \quad (5.5)$$

wobei G_k alle möglichen Permutationen, P_y die Wahrheitswerte des Rankings, sowie $P_{f(x_i, w)}$ die Ergebnisse des Regressionsmodells darstellen.

Wird die definierte Regression unter Anwendung der ListNET-Methode in die Verlustfunktion eingesetzt, ergibt sich folgende Darstellung:

$$L(y, x, w) = - \sum_{i=1}^n \sum_G \left(\prod_{t=1}^k \frac{\exp(y_{i,t})}{\sum \exp(y_{i,t})} \log \prod_{t=1}^k \frac{\exp(f(x_{i,t}, w))}{\sum \exp(f(x_{i,t}, w))} \right) \quad (5.6)$$

Um die optimalen Parameter zu finden, muss die Verlustfunktion minimiert werden. Die Berechnung mit dem Gradientenverfahren ergibt bei 50 Iterationen und einer Lernrate von $\eta = 0.0001$ die in Abb. 5.7 dargestellte Wichtung der einzelnen Parameter. Eine ausführliche Darstellung dieser Schritte ist Zlatkova [2012] zu entnehmen.

5.2.6 Bewertung

Abbildung 5.7 zeigt deutlich, dass der mit großem Abstand stärkste Einfluss auf die Routenbewertung durch die Länge der Route und die Reisezeit erwirkt wird. Beide fließen negativ in die Bewertung ein, da eine höhere Reisezeit bzw. höhere Routenlänge von den Teilnehmern als schlecht eingestuft wurde. Bei Betrachtung der übrigen - nicht sehr relevanten - Eigenschaften fällt auf, dass die Teilnehmer vor Allem eine störungsfreie Fahrt bevorzugen. So wurden die Straßen der Kategorie 2, also Straßen hoher Kategorie bevorzugt, ebenso wie Vorfahrtsstraßen und Straßen mit wenigen Lichtsignalanlagen. Negativ bewertet wurden vor allem Routen mit vielen Kreuzungen oder niedriger Geschwindigkeitsklasse. Dass die Straßen der Kategorie 1, also Autobahnen, als negativ betrachtet wurden, lässt sich damit erklären, dass die Routen über die Autobahn bei Fahrbeziehungen innerhalb Münchens zumeist sehr umwegig und von hoher Fahrdauer sind.

Zusammenfassend kann also festgestellt werden, dass die Nutzer großen Wert auf eine schnelle und effiziente Route legen. Hiervon kann nur abgewichen werden, wenn die Alternativroute eine stressfreie Fahrt über Straßen hoher Kategorie ohne viele Störungen ermöglicht.

5.2.7 Weitere Verwendungsmöglichkeit

Eine wesentliche Einschränkung, welche bei der vorangegangenen Untersuchung getroffen wurde, ist die Mittelung aller Daten über die Nutzer. So ergibt sich zwar im Durchschnitt ein Ergebnis, welches aussagt, dass vor allem die Reisezeit für einen Fahrer im Vordergrund steht, allerdings werden sehr individuelle Vorlieben eines einzelnen Fahrers durch die Mittelung über alle Fahrer nicht berücksichtigt. Somit wurde zwar bestätigt, dass keines der untersuchten Attribute pauschal bei den folgenden Entwicklungen berücksichtigt werden muss, allerdings könnten einzelne Attribute bei einem individualisierten Routing Einfluss nehmen. So wäre es mit diesem Ansatz auch möglich, ein Routingverfahren zu erstellen, welches die individuellen Vorlieben eines Fahrers in der Routensuche berücksichtigt. Abbildung 5.6 stellt eine mögliche Architektur dar, bei der eine individuelle Routenbewertung durchgeführt wird [Park u. a., 2007].

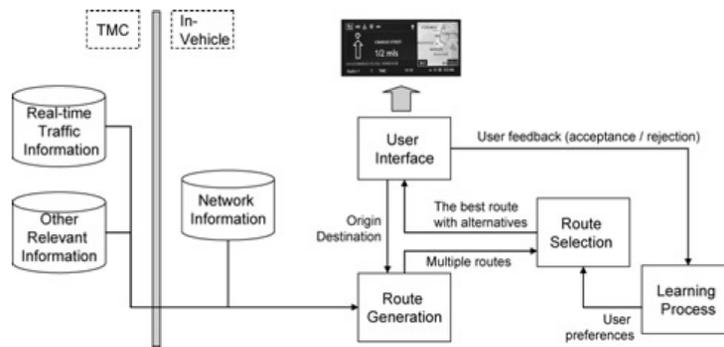


Abbildung 5.6: Systemarchitektur für ein individuelles Routing nach [Park u. a., 2007]

5 Entwicklung des Strategischen Routings

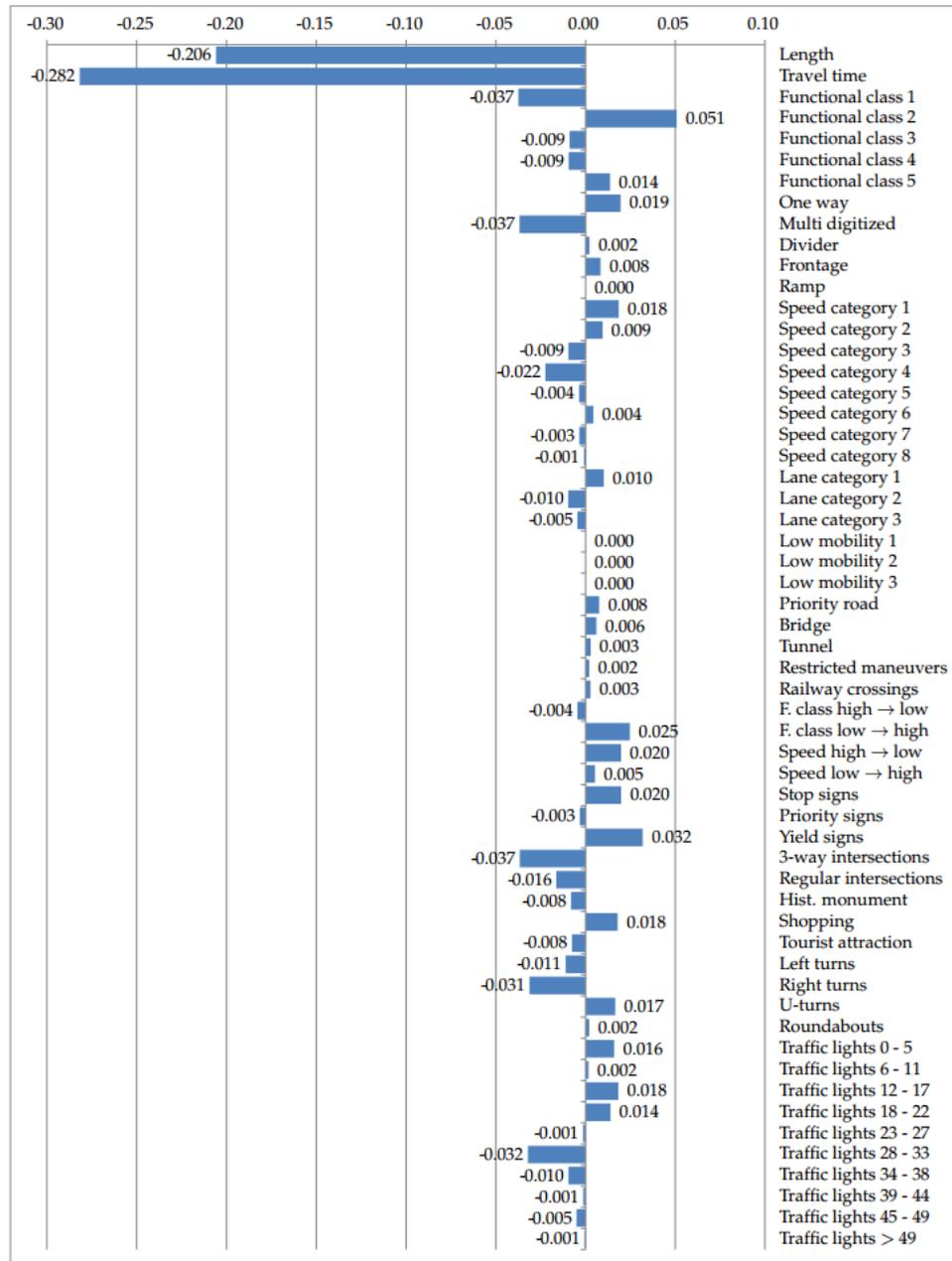


Abbildung 5.7: Wichtung der einzelnen Parameter der Routenbewertung

5.3 Der strategische Routing-Algorithmus

In Kapitel 5.1 wurden unterschiedliche Arten von Strategien entwickelt. Die verschiedenen Varianten müssen auch unterschiedlich im Routing berücksichtigt werden. Dazu kann in folgende drei Gruppierungen eingeteilt werden:

- allgemeingültige Strategien
- fahrtrelationsbezogene Strategien
 - mit harten Triggern
 - mit weichen Triggern

Die unterschiedlichen Weisen der Berücksichtigung dieser Strategien im Routing werden im Folgenden geschildert.

5.3.1 Berücksichtigung allgemeingültiger Strategien

Unter allgemeingültigen Strategien werden die in Kapitel 5.1 als *allgemeingültige Strategien* definierten Strategien verstanden. Diese Strategien gelten für alle Verkehrsteilnehmer gleichermaßen und lassen sich daher durch eine reine Veränderung der Kantengewichte abbilden. Der in Kapitel 3.1.2 geschilderte Dijkstra- bzw. A*-Algorithmus verfügt nicht über eine zeitliche Abhängigkeit und berücksichtigt daher zu jeder Zeit die gleichen Kosten für einen Link. Dies ist für die Berücksichtigung einer Strategie nicht ausreichend, da die Strategien jeweils nur in bestimmten Zeiträumen gültig sind, beispielsweise kann eine Fahrstreifenfreigabe nur für die Spitzenstunde in Kraft gesetzt werden.

Integration zeitabhängiger Kosten

Zur Abbildung von zeitlichen Nebenbedingungen muss der Dijkstra-Algorithmus mit einer zeitlichen Einordnung versehen werden. Derartige Veränderungen des Algorithmus wurden beispielsweise durch [Delling u. Wagner \[2009b\]](#) bereits durchgeführt. Neben dem Start und dem Zielknoten muss eine Startzeit für die Routenanfrage angegeben werden. Dies kann die aktuelle Zeit sein oder auch ein beliebiger anderer Zeitpunkt. Darüber hinaus ist es notwendig, die Kantengewichte anzupassen. Diese wurden bisher durch statische Werte je Kante f_{kn} repräsentiert (vgl. Kapitel 3.1.2). Die Bestimmung der Kantengewichte von Knoten k zu Knoten n wird im Folgenden jeweils komplexer. Daher wird eine Funktion zur Bestimmung der Kantengewichte eingeführt. Diese Funktion beschreibt nun nicht mehr einen konstanten Wert, sondern ist zeitabhängig $f_{kn}(t)$, gibt also die Kosten von Knoten k zu Knoten n zum Zeitpunkt t an. Um die Link-Kosten an

jeder Kante korrekt bestimmen zu können, muss der Dijkstra so verändert werden, dass die Ankunftszeit an jeder Kante berechnet wird. Hierzu wird die in 5.1 geschilderte Erweiterung an dem Algorithmus vorgenommen. Für jeden Knoten wird zusätzlich die Ankunftszeit bestimmt. Diese Ankunftszeit wird aktualisiert, falls sich der Weg zum Knoten ändert. Außerdem wird die Kostenfunktion für das Gewicht einer Kante um die dynamischen Anteile erweitert.

Algorithmus 5.1 Dijkstra mit zeitlichen Nebenbedingungen

Eingabe: Startknoten: k_s , Zielknoten: k_t , **Startzeit:** t_s

```

1:  $v(k) = \text{null } \forall k \in N, d(k) = \infty \forall k \in N,$ 
2:  $d(k_s) = 0, E = \{\}, t(k_s) = 0$ 
3: lege  $k_s$  in  $C$ 
4: while  $C$  nicht leer do
5:   bestimme  $k$  aus  $C$  mit  $\min(d(k)) \forall k \in C$ 
6:   if  $k == k_t$  then
7:     Fertig.
8:   end if
9:   Entferne  $k$  aus  $C$ 
10:  Speichere  $k$  in  $E$ 
11:  for alle Nachfolgeknoten  $n$  von  $k$  do
12:    bestimme  $t(n) = f_{kn}(t) + t(k)$ 
13:    if  $d(k) + f_{kn}(t) < d(n)$  then
14:       $d(n) = d(k) + f_{kn}(t)$ 
15:       $v(n) = k$ 
16:      if  $n \notin E$  then
17:        füge  $n$  in  $C$  ein
18:      end if
19:    end if
20:  end for
21: end while

```

N : Menge aller Kanten im Netz
 C : Kandidatenliste
 E : Liste der bereits untersuchten Knoten
 k : Knoten k
 $d(k)$: Kosten von k zum Startknoten
 $v(k)$: Vorgängerknoten von k
 $n(k)$: Nachfolgerkante von k
 $f_{kn}(t)$: Kosten für die Kanten von Knoten k zu Knoten n zum Zeitpunkt t
 $t(k)$: Ankunftszeit an Kante k

Eine derartige Erweiterung des Algorithmus liefert jederzeit eine kontinuierliche Route, allerdings ist dies nach [Delling u. Wagner \[2009b\]](#) nicht immer die schnellste Route. Durch Umwege oder Warten an einem Knoten, könnte ggf. eine insgesamt kürzere Route entstehen, indem quasi ein „Überholen“ stattfindet. Um dieses Warten abzubilden kann die Kostenfunktion der Kanten überarbeitet werden. Für jeden Nachfolgeknoten wird dabei überprüft, ob die Kosten $d(n)$ durch Warten am Knoten k verkürzt werden können:

$$d(t + w) < d(t) \quad (5.7)$$

$$d(k) + f_{nk}(t + w) + w < d(k) + f_{nk}(t) \quad (5.8)$$

Wenn diese Bedingung zutrifft, kann die Gesamtreisezeit durch ein Warten an Knoten k verkürzt werden. Durch ein Rückrechnen von Knoten k zum Startknoten, kann bestimmt werden, ob auch eine verspätete Abfahrt eine Alternative darstellt oder ob das Warten wirklich vor Knoten k stattfinden muss. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass es sich bei den zeitlichen Angaben in den Strategien meist ohnehin nur um ungefähre Zeitangaben handelt und ein Warten im Sekundenbereich nicht berücksichtigt werden sollte. Eine solche Überprüfung eignet sich daher nur für Ereignisse, welche pünktlich aufgehoben werden. Sollten die Kantengewichtsveränderungen auf Basis von Prognosen beruhen, lohnt sich ein Warten auf der Strecke in der Praxis meist nicht. Aus diesem Grund werden diese theoretischen Änderungen nicht im Algorithmus angewendet.

Integration der Strategien

Durch die geschilderten Erweiterungen ist es möglich zeitabhängige Kosten im Dijkstra-Algorithmus zu verwenden, allerdings werden noch keine Strategien berücksichtigt. Um die allgemeingültigen Strategien bei der Routensuche zu berücksichtigen, ist es notwendig die Strategien vorzuhalten, um sie in die Suche integrieren zu können. Dies geschieht in einer Menge S , welche alle Kanten enthält, für welche strategische Informationen vorliegen. Da die Strategien nur zu bestimmten Zeiträumen gültig sind, ist der Inhalt der Menge zeitabhängig. $S(t)$ sei die Menge aller Kanten, für die zum Zeitpunkt t eine strategische Information vorliegt. Des Weiteren ist es notwendig, die Kosten für jede Kante mit strategischen Informationen zu kennen. Diese werden an der jeweiligen strategischen Kante in S abgespeichert. Auch für diese Kanten wird wieder eine Kostenfunktion definiert, welche die jeweiligen Kosten für die Kante zum Zeitpunkt t definiert. Diese Kostenfunktion wird bezeichnet mit $\tilde{\zeta}_k(t)$ und liefert die strategischen Kosten für die Kante k zum Zeitpunkt t . Zur Laufzeit des Dijkstra-Algorithmus wird nun für jede Kante überprüft, ob eine strategische Information für diese Kante vorliegt. Ist

dies der Fall, werden die Kosten der strategischen Kostenfunktion angewendet, andernfalls die normale Kostenfunktion. Die im Algorithmus implementierte Kostenfunktion ergibt sich somit zu:

$$s_k(t) = \begin{cases} \zeta_k(t) & \forall k \in S(t) \\ f_k(t) & \forall k \notin S(t) \end{cases} \quad (5.9)$$

$s_k(t)$: Reisekosten der Kante k zum Zeitpunkt t

$\zeta_k(t)$: strategische Reisekosten der Kante k zum Zeitpunkt t

$S(t)$: Menge aller Kanten mit Strategie zum Zeitpunkt t

$f_k(t)$: normale Reisekosten der Kante k zum Zeitpunkt t

Berücksichtigung des Level-Switching

Bei Strategien handelt es sich teilweise um kleinräumige Umfahrungen, beispielsweise auf Grund einer Straßensperrung. In diesem Fall ist es wichtig, dass Fahrzeuge eine Umfahrung wählen, welche die notwendigen Kapazitäten aufweisen, um die zusätzliche Verkehrsstärke bewältigen zu können. Dies ist nicht notwendigerweise die nächstkürzere Strecke. Häufig führen diese kleinräumigen Umfahrungen jedoch über Straßen geringerer Straßenklassen und werden daher durch das Level-Switching (vgl. Kapitel 3.1.3) nicht berücksichtigt. Dies kann in Extremfällen zu großen Umleitungen führen. Um einen solchen Umweg zu verhindern und die erstellte Strategie zu verwenden, ist es wichtig, auch Anpassungen am Level-Switching vorzunehmen. Das Level-Switching fügt einen Knoten nur dann in die Kandidatenliste ein, wenn die verbindende Kante eine ausreichend hohe Straßenkategorie ausweist (vgl. Kapitel 3.1.3). Diese Prüfung muss die Strategien miteinschließen. Algorithmus 5.2 zeigt die notwendigen Änderungen am Algorithmus.

Algorithmus 5.2 Dijkstra mit strategischen Informationen**Eingabe:** Startknoten: k_s , Zielknoten: k_t , Startzeit: t_s

```

1:  $v(k) = \text{null } \forall k \in N, d(k) = \infty \forall k \in N$ 
2:  $d(k_s) = 0, t(k_s) = 0, E = \{\}$ 
3: lege  $k_s$  in  $C$ 
4: while  $C$  nicht leer do
5:   bestimme  $k$  aus  $C$  mit  $\min(d(k)) \forall k \in C$ 
6:   if  $k == k_t$  then
7:     Fertig.
8:   end if
9:   Entferne  $k$  aus  $C$ 
10:  Speichere  $k$  in  $E$ 
11:  for alle Nachfolgeknoten  $n$  von  $k$  do
12:    bestimme  $t(n) = s_{kn}(t) + t(k)$ 
13:    if  $d(k) + s_{kn}(t) < d(n)$  then
14:       $d(n) = d(k) + s_{kn}(t)$ 
15:       $v(n) = k$ 
16:      bestimme  $level_n$ 
17:      if  $n \notin E$  AND ( $level_n$  ausreichend OR  $n \in S(t)$ ) then
18:        füge  $n$  in  $C$  ein
19:      end if
20:    end if
21:  end for
22: end while

```

 N : Menge aller Kanten im Netz C : Kandidatenliste E : Liste der bereits untersuchten Knoten k : Knoten k $d(k)$: Distanz von k zum Startknoten $v(k)$: Vorgängerknoten von k $n(k)$: Nachfolgerkante von k $s_{kn}(t)$: Kosten für die Kanten von Knoten k zu Knoten n zum Zeitpunkt t unter Berücksichtigung von Strategien $S(t)$: Menge aller Kanten mit Strategien zum Zeitpunkt t $t(k)$: Ankunftszeit an Kante k $level_n$: Level der Kante k

Überführung auf den A*-Algorithmus

Die durchgeführten Anpassungen am Dijkstra-Algorithmus beziehen sich nur auf das Level-Switching und die Kostenfunktion für die Kosten einer Kante. Auf das algorithmische Vorgehen hatten die Änderungen keine Auswirkung. Daher lassen sich die Änderungen auch direkt auf den A*-Algorithmus übertragen, indem die Heuristik des A*-Algorithmus eingebaut wird. Hierbei wird die Luftlinienheuristik verwendet, welche jeweils die Restdistanz zum Ziel für jede Kante berechnet. Algorithmus 5.3 zeigt den vollständigen A*-Algorithmus zur Berücksichtigung von allgemeingültigen Strategien.

Algorithmus 5.3 A*-Algorithmus mit strategischen Informationen

Eingabe: Startknoten: k_s , Zielknoten: k_t , Startzeit: t_s

```
1:  $v(k) = \text{null } \forall k \in N, d(k) = \infty \forall k \in N,$   
2:  $d(k_s) = 0, t(k_s) = 0$   
3: lege  $k_s$  in C  
4: while C nicht leer do  
5:   bestimme  $k$  aus C mit  $\min(d(k) + h(k)) \forall k \in C$   
6:   if  $k == k_t$  then  
7:     Fertig.  
8:   end if  
9:   Entferne  $k$  aus C  
10:  Speichere  $k$  in E  
11:  for alle Nachfolgeknoten  $n$  von  $k$  do  
12:    bestimme  $t(n) = s_{kn}(t) + t(k)$   
13:    if  $d(k) + s_{kn}(t) < d(n)$  then  
14:       $d(n) = d(k) + s_{kn}(t)$   
15:       $v(n) = k$   
16:      bestimme  $level_n$   
17:      if  $n \notin E$  AND ( $level_n$  ausreichend OR  $n \in S(t)$ ) then  
18:        füge  $n$  in C ein  
19:      end if  
20:    end if  
21:  end for  
22: end while
```

- N : Menge aller Kanten im Netz
 C : Kandidatenliste
 E : Liste der bereits untersuchten Knoten
 k : Knoten k
 $d(k)$: Distanz von k zum Startknoten
 $v(k)$: Vorgängerknoten von k
 $n(k)$: Nachfolgerkante von k
 $h(k)$: Heuristik für Kante k
 $s_{kn}(t)$: Kosten für die Kanten von Knoten k zu Knoten n zum Zeitpunkt t unter Berücksichtigung von Strategien
 $S(t)$: Menge aller Kanten mit Strategien zum Zeitpunkt t
 $t(k)$: Ankunftszeit an Kante k
 $level_n$: Level der Kante k

Zu berücksichtigen ist, dass die gewählte Heuristik Geschwindigkeiten auf den Kanten von bis zu 130 km/h erlaubt. Sollten durch die Strategien Geschwindigkeiten in höheren Bereichen verwendet werden, so ist auch die Heuristik anzupassen. Es wird aber davon ausgegangen, dass die von Strategien übermittelten Geschwindigkeiten in einem realistischen Bereich liegen, weshalb die Heuristik nicht verändert wird.

5.3.2 Berücksichtigung von fahrtrelationsbezogenen Strategien

Unter fahrtrelationsbezogenen Strategien werden die in Kapitel 5.1 definierten Trigger-Strategien verstanden. Diese Art von Strategie ist nicht allgemeingültig für alle Verkehrsteilnehmer, sondern betrifft nur bestimmte Fahrtrelationen. Daher ist es auch nicht möglich, diese Art von Strategien durch eine reine Kantengewichtsveränderung abzubilden, wie es bei den allgemeingültigen Strategien der Fall ist. Zur Integration dieser Strategien sind weitere Nebenbedingungen notwendig.

Strategien mit harten Triggern

Strategien mit harten Triggern sind einfacher zu behandeln, als Strategien mit weichen Triggern. Ihre Einfahr- bzw. Ausfahrtrigger werden jeweils durch konkrete Straßenabschnitte angegeben und somit ist es ohne Weiteres möglich, festzustellen, ob ein Trigger auf einer Route liegt oder nicht. Die einfachste Herangehensweise zur Berücksichtigung von Trigger-Strategien ist mit folgenden Schritten möglich:

1. Berechnung der schnellsten Route von Start zu Ziel
2. Überprüfung, ob die Trigger auf der Route liegen

3. Wenn zutreffend: Austausch des Routensegments zwischen den Triggern durch die den jeweiligen Triggern zugehörige Strategie

Diese Vorgehensweise wurde auch bei den Implementierungen der in Kapitel 2 vorgestellten Projekte gewählt, bietet allerdings einige Nachteile, da beide Trigger direkt auf der Route liegen muss. Dies ist für den Ausfahrtrigger insbesondere nicht der Fall, wenn auf der Route eine Störung vorliegt, auf Grund derer die Strategie aktiviert wurde. Ebenso ist es möglich, dass die Trigger bzw. auch nur einer der Trigger sehr nah an der Route liegen, aber nicht auf der Route. In diesem Fall sollte die Strategie ebenfalls auf Relevanz für die Routenberechnung überprüft werden. Um dies zu realisieren, wird im Folgenden eine neue Herangehensweise entwickelt. Während der Routensuche wird ein Suchbaum aufgebaut, welcher nicht nur die Route selbst, sondern alle für die Routensuche relevanten Kanten enthält. Wird anstelle der Route zur Überprüfung der Trigger der Suchbaum verwendet, so werden alle relevanten Kanten im Umkreis betrachtet.



Abbildung 5.8: Lage der Trigger-Strategien im Suchbaum

Abbildung 5.8 zeigt eine Strategie gemäß des in Kapitel 4.3 dargestellten Szenarios der Sperrung des Allacher Tunnels. Die geschaltete Strategie betrifft alle Fahrzeuge, welche über die A99 aus Richtung Osten kommen, daher wurde der Einfahrtrigger auf die A99 gelegt. Der Ausfahrtrigger liegt auf der A8, um sowohl die weiter stadteinwärts fahrenden Fahrzeuge, als auch die in den Westen fahrenden Fahrzeuge auf der A99 zu berücksichtigen. An diesem Beispiel wird deutlich, dass der Ausfahrtrigger nicht auf der Route selbst liegt. Obwohl eine Anwendung der Strategie gewollt ist, würde dies nach dem einfachen Verfahren nicht erfolgen. Da eine Sperrung des Allacher-Tunnels in diesem Szenario vorliegt, würde eine Umfahrung durch die Münchner Innenstadt erfolgen. In diesem Fall würden

beide Trigger nicht auf der Route liegen und die Strategie würde wiederum nicht greifen.

In Abbildung 5.8 wird weiterhin der Suchbaum einer Routenberechnung von der grünen zur roten Markierung dargestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass der Einfahrtrigger im Suchbaum enthalten ist. Die Routensuche berücksichtigt zwar Teile der Route über die dargestellte Strategie, bricht allerdings die Äste frühzeitig ab, da der Weg über die Strategie zu lang ist. Der Ausfahrtrigger, welcher sich in Fahrtrichtung München befindet, ist allerdings nicht Teil des Suchbaums. In der Umgebung des Ziels werden deutlich weniger Kanten betrachtet, da hier die Kosten zur Kantenerreichung bereits sehr hoch und in der Nähe der Routenkosten liegen. Insbesondere werden die Kanten mit Fahrtrichtung entfernend vom Ziel nicht betrachtet. Dies hat zur Folge, dass ein Trigger, welcher sich auf der Gegenfahrbahn befindet nicht erreicht wird, wie Abbildung 5.8 zeigt.

Wie in Kapitel 3.1.3 geschildert, kann eine Routensuche auch rückwärts durchgeführt werden. In diesem Fall entsteht ebenfalls ein Suchbaum, welcher allerdings nicht deckungsgleich mit dem Suchbaum der Vorwärtssuche ist.



Abbildung 5.9: Lage der Trigger-Strategien im Suchbaum der Rückwärtssuche

Abbildung 5.9 zeigt den Suchbaum der Rückwärtssuche für das zuvor gegebene Beispiel. Deutlich zu erkennen ist, dass der Ausfahr-Trigger nun Teil des Suchbaums ist. Auch der Einfahr-Trigger ist in diesem Beispiel im Suchbaum enthalten, aber es wird deutlich, dass im Bereich des Startknoten weniger Kanten untersucht wurden als im Bereich des Zielknotens. Somit besteht die Möglichkeit, dass der Einfahr-Trigger nicht immer im Suchbaum enthalten ist. Aus diesem Grund

werden zur Auswertung der Trigger sowohl eine Vorwärts-, als auch eine Rückwärtssuche durchgeführt. Da diese beiden Durchläufe unabhängig voneinander sind, können die Berechnungen parallel durchgeführt werden. Im Gegensatz zum bidirektionalen Dijkstra (vgl. Kapitel 3.1.3) wird die Suche nicht abgebrochen, sobald eine Kante von beiden Bäumen betrachtet wurde, sondern es werden die vollständigen Suchbäume berechnet. Nur so kann gewährleistet werden, dass alle für die Strategie relevanten Kanten auch betrachtet werden. Anschließend wird im Vorwärtsbaum nach dem Einfahrtrigger und in dem Rückwärtsbaum nach dem Ausfahrtrigger gesucht. Sind beide Trigger in den jeweiligen Bäumen enthalten, lässt sich die Route einfach, ohne weitere Berechnungen zusammenstellen. Der kürzeste Weg vom Start zum Einfahrtrigger wird im Vorwärtssuchbaum beschrieben und kann durch Rückwärtssuche vom Trigger zum Start gelesen werden. Der Weg zwischen den beiden Triggern wird durch die Strategie beschrieben und der Weg vom Ausfahrtrigger zum Ziel ist wiederum direkt aus dem Rückwärtssuchbaum abzulesen.

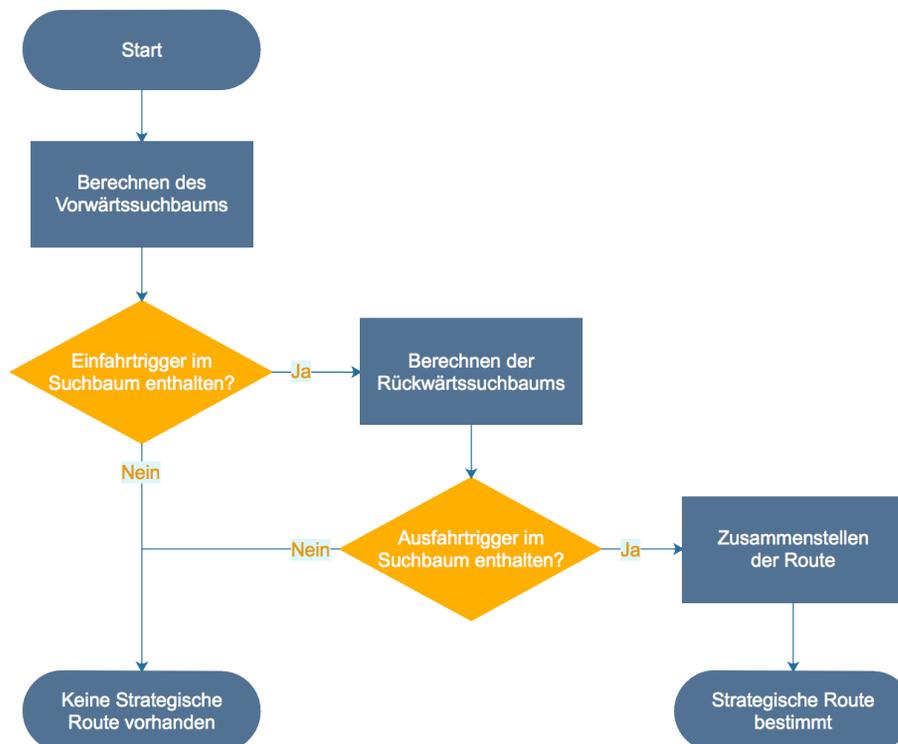


Abbildung 5.10: Ablauf des Strategischen Routings für harte Trigger

Die Berechnung der Strategischen Route wird durch den in Abbildung 5.10 dargestellten Ablauf beschrieben.

Strategien mit weichen Triggern

Der Unterschied zwischen harten und weichen Triggern liegt in der Beschaffenheit der Geometrien des Triggers. Während bei harten Triggern die Referenzierung über einen einzelnen Straßenabschnitt erfolgt, können bei weichen Triggern Bereiche als Trigger angegeben werden. Wehner [2008] untersucht verschiedene Clipping-Algorithmen, um während der Laufzeit eines Routingalgorithmus bestimmen zu können, ob ein Zielgebiet erreicht wurde. Auch wenn bei der Betrachtung von Strategien kein Zwischenziel eingefügt wird, besteht eine ähnliche Herausforderung: Zu bestimmen, ob ein Gebiet bereits erreicht wurde - nämlich die Triggerbereiche. Wehner [2008] stellt dabei zwei verschiedene Clipping-Algorithmen vor. Der Cohen-Sutherland-Algorithmus untersucht auf Basis von Bitoperationen, ob sich eine Kante innerhalb eines Raster-Rechtecks befindet oder nicht. Mit Rechtecken können zwar viele Bereiche beschrieben werden, allerdings soll diese Verallgemeinerung an dieser Stelle nicht getroffen werden. Daher wird der zweite Algorithmus, der Cyrus-Beck Algorithmus zur Berücksichtigung von beliebigen, konvexen Bereichen zur Anwendung gebracht. Kompliziertere Formen müssen zunächst auf n konvexe Formen übertragen werden. Der Cyrus-Beck-Algorithmus stellt jede Kante in der mathematischen Form einer Geraden dar:

$$P(x) = P_1 + x(P_2 - P_1) \quad (5.10)$$

Jede Kante besitzt einen Normalenvektor N_k . Durch das Skalarprodukt kann der Schnittpunkt P_S mit jeder Kante des Polygons berechnet werden:

$$0 = N_k(P(x) - P_S) \quad (5.11)$$

Für $x \in [0, 1]$ liegt der Schnittpunkt auf der entsprechenden Kante des Bereichs. Somit führt die untersuchte Graphenkante in den Bereich hinein oder aus dem Bereich heraus. Auf diese Weise werden alle Kanten des Suchbaums untersucht, um zu bestimmen, ob ein Trigger erreicht wurde.

Im Unterschied zu den Strategien mit weichen Triggern, ist es bei den Strategien mit harten Triggern nicht gewährleistet, dass die Strategische Alternativroute direkt an der gefundenen Trigger-Kante beginnt, da der Trigger durch einen größeren Bereich beschrieben werden kann. Ebenso ist es möglich, dass mehrere Kanten gefunden werden. Es ist daher nicht möglich, die Route einfach aus Teilen der Suchbäume und der Strategie zusammenzustellen. Eine kürzeste Route zwischen einer der entsprechenden Trigger-Kanten und dem Start der Strategie zu berechnen, führt auch nicht immer zur gewünschten Route, da der Trigger-Bereich durch unterschiedliche Kanten erreicht werden kann. Ist die erste Kante der Strategie nicht im Suchbaum enthalten, so muss der Suchbaum fortgeführt werden, bis die Kante gefunden wurde. Bei einer guten Wahl der Strategie sollte

die Strategie in der Nähe der Trigger-Bereiche beginnen, so dass der Suchbaum nur minimal erweitert werden muss. Um den Suchbaum weiterzuführen, muss das Abbruch-Kriterium des Dijkstra-Algorithmus erweitert werden. Hierzu kann das Ziel des Dijkstra-Algorithmus nachträglich auf die neue Kante gesetzt werden und der Algorithmus im bestehenden Zustand wieder gestartet werden. Der neue Ablauf des Algorithmus wird durch Abbildung 5.11 dargestellt. Die Berechnung

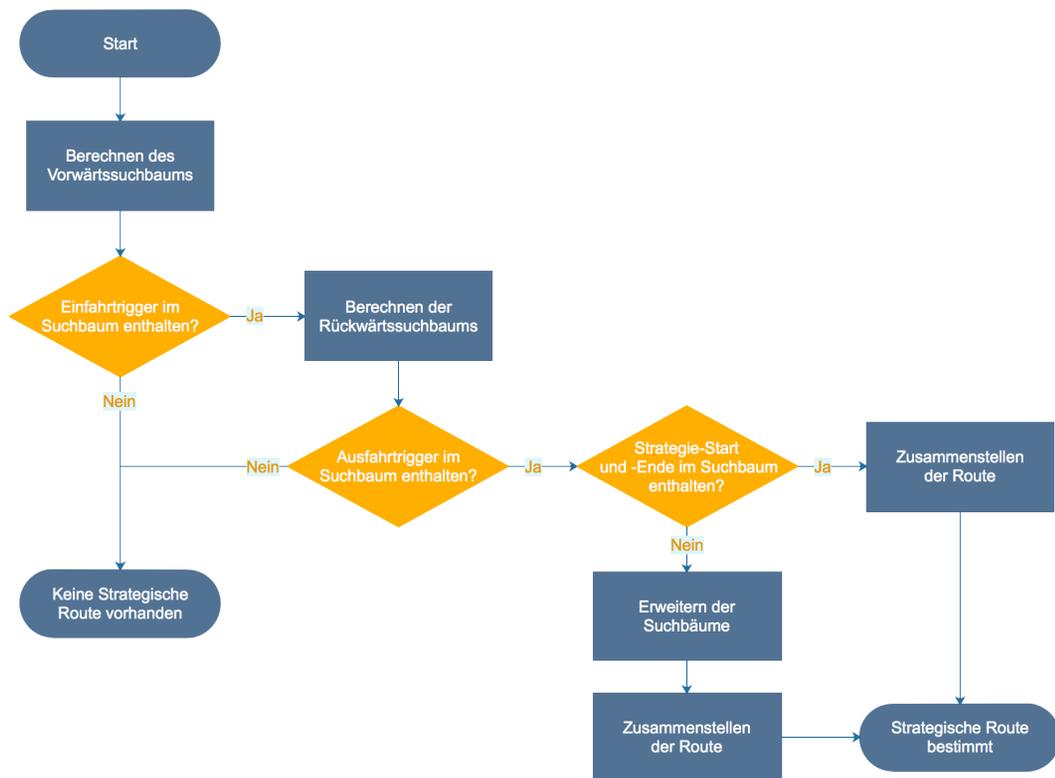


Abbildung 5.11: Ablauf des Strategischen Routings mit Erweiterung der Suchbäume

der Strategischen Route wird durch den in Abbildung 5.11 dargestellten Ablauf beschrieben. Auch Strategien mit harten Triggern können nach diesem Algorithmus verwendet werden, um auf die Anforderung verzichten zu können, dass Strategien an der Trigger-Kante beginnen müssen.

Übertragung auf den A*-Algorithmus

Der in Abbildung 5.11 beschriebene Ablauf lässt sich direkt auf den A*-Algorithmus anwenden. Durch die Verwendung der Heuristik werden die Äste des Suchbaums allerdings teilweise sehr früh abgebrochen, wenn die Suche nicht in Richtung des Ziels verläuft. Dies bedeutet für die Suche nach den Triggern, dass diese

gegebenenfalls nicht gefunden werden. Strategische Routen repräsentieren nicht immer die schnellste Route zwischen Start- und Zielpunkt. Im Gegenteil, bei einer Strategie kann es sich beispielsweise um eine großräumige Umfahrung handeln, welche eine höhere Reisezeit aufweist als die schnellste Route, allerdings das Ziel eines Netzausgleiches verfolgt. Eine solche Route wird nicht immer von dem beschriebenen Algorithmus berücksichtigt, wenn dieser auf den A*-Algorithmus übertragen wird. Trotzdem ist es nicht notwendig, den vollständigen Suchbaum mit dem Dijkstra-Algorithmus aufzubauen. Es sollen nur diejenigen Links betrachtet werden, welche für eine sinnvolle Strategie in Frage kommen. Zur Definition einer sinnvollen Strategie sei an dieser Stelle auf Kapitel 6.2 verwiesen. Eine sinnvolle Strategie sei eine Strategie, welche maximal eine Verzögerung von x Minuten herbeiführt. Für den Algorithmus ist es dabei unerheblich, wie das x ermittelt wird. Es könnte einen festen Maximalwert oder einen relativen Anteil der Gesamtroute oder eine Kombination aus beiden darstellen. Die in Algorithmus 5.4 dargestellte finale Weiterentwicklung des A*-Algorithmus modifiziert das Abbruchkriterium. Nach dem ersten Durchlauf des Algorithmus wird dieser fortgeführt, bis alle Kandidaten den neu definierten Schwellwert $t_{sw} = t_{route} + x$ erreicht haben. Die Äste des Suchbaums werden also bis zum Erreichen dieses Schwellwerts fortgeführt.

Algorithmus 5.4 A*-Algorithmus mit erweiterten Suchbäumen

Eingabe: Startknoten: k_s , Zielknoten: k_t , Startzeit: t_s , **Schwellwert:** x

```
1:  $v(k) = \text{null } \forall k \in N, d(k) = \infty \forall k \in N$ 
2:  $d(k_s) = 0, t(k_s) = 0, E = \{\}$ 
3:  $t_{route} = \infty$ 
4: lege  $k_s$  in  $C$ 
5: while  $C$  nicht leer do
6:   bestimme  $k$  aus  $C$  mit  $\min(d(k) + h(k)) \forall k \in C$ 
7:   if  $k == k_t$  then
8:     ermittle  $t_{route}$ 
9:   end if
10:  Entferne  $k$  aus  $C$ 
11:  Speichere  $k$  in  $E$ 
12:  for alle Nachfolgeknoten  $n$  von  $k$  do
13:    bestimme  $t(n) = s_{kn}(t) + t(k)$ 
14:    if  $d(k) + s_{kn}(t) < d(n)$  then
15:       $d(n) = d(k) + s_{kn}(t)$ 
16:       $v(n) = k$ 
17:      bestimme  $level_n$ 
18:      if  $n \notin E$  AND ( $level_n$  ausreichend OR  $n \in S(t)$ ) then
19:        if  $d(n) + h(n) < t_{route} + x$  then
20:          füge  $n$  in  $C$  ein
21:        end if
22:      end if
23:    end if
24:  end for
25: end while
```

- N : Menge aller Kanten im Netz
- C : Kandidatenliste
- E : Liste der bereits untersuchten Knoten
- k : Knoten k
- $d(k)$: Distanz von k zum Startknoten
- $v(k)$: Vorgängerknoten von k
- $n(k)$: Nachfolgerkante von k
- $h(k)$: Heuristik für Kante k
- $s_{kn}(t)$: Kosten für die Kanten von Knoten k zu Knoten n zum Zeitpunkt t unter Berücksichtigung von Strategien
- $S(t)$: Menge aller Kanten mit Strategien zum Zeitpunkt t
- $t(k)$: Ankunftszeit an Kante k
- t_{route} : Reisezeit auf der kürzesten Route
- $level_n$: Level der Kante k

Auf diese Weise wird sichergestellt, dass alle Strategien, welche einen maximalen Umweg von x Minuten aufweisen bei der Suche berücksichtigt werden.

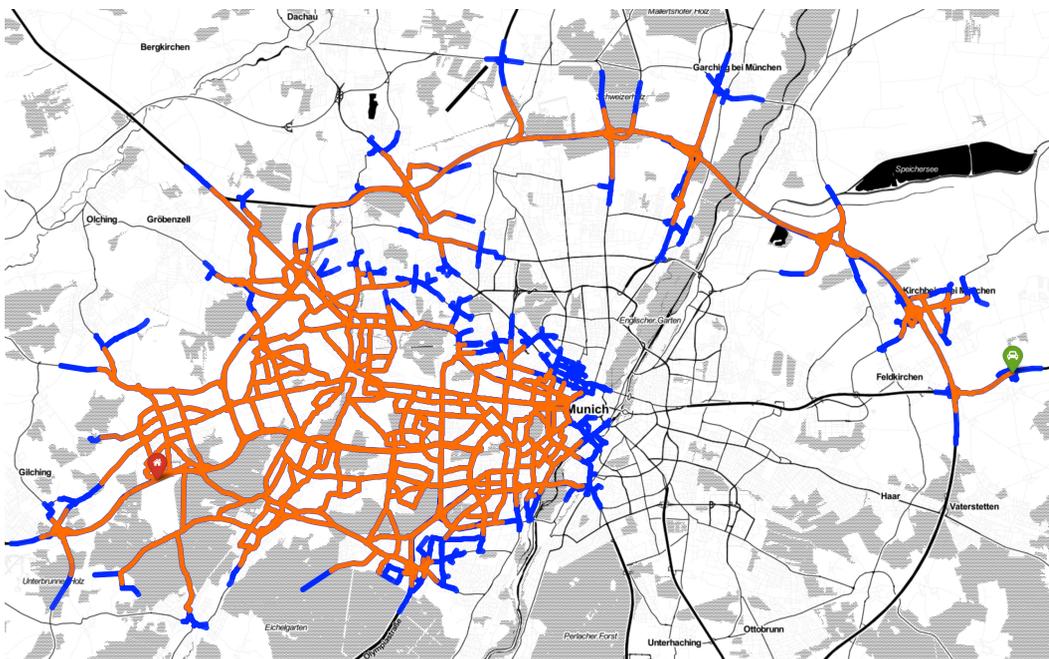


Abbildung 5.12: A*-Algorithmus mit erweiterten Suchbäumen

In Abbildung 5.12 ist der erweiterte Suchbaum in blau im Vergleich zum normalen Suchbaum des A*-Algorithmus in oranger Farbe dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass signifikant mehr Kanten betrachtet werden, allerdings brechen die Äste immer noch früher ab, als beim Dijkstra-Algorithmus, insbesondere bei Ausbreitung in die dem Ziel abgewandten Himmelsrichtungen.

5.4 Aufbau eines Prototypen für hybrides Routing

Unter einem hybriden (griech.: gekreuzt, gemischt) Routing wird die „gemischte“ Berechnung einer Route verstanden. Das Routing kann sowohl auf dem eigentlichen Navigationssystem, welches weiterhin im Fahrzeug bestehen bleibt, als auch auf einem Server erfolgen. Nach einer erfolgten Zieleingabe durch den Nutzer berechnet zunächst das interne Navigationssystem die Route. Somit ist sichergestellt, dass der Nutzer auch in Funklöchern oder bei Nicht-Verfügbarkeit des Servers auf jeden Fall eine Route erhält. Die Route wird anschließend an einen Server kommuniziert und dort überprüft. Sollte der Server aufgrund einer besseren Datenlage, eine bessere Route berechnen können, so wird diese zurück an das Fahrzeug kommuniziert und dort in das Navigationssystem übernommen. Dieses Kapitel beschreibt den Design- und Entwicklungsprozess des Routingservers.

5.4.1 Anforderungen

Kernziel ist es, einen Routingserver aufzubauen, welcher in der Lage, ist Routenanfragen eines Fahrzeuges entgegen zu nehmen, zu verarbeiten und anschließend die Route dem Fahrzeug zur Verfügung zu stellen. Hierzu werden unterschiedliche Komponenten benötigt. Im folgenden Kapitel werden zunächst einige Technologien und Konzepte erläutert, welche beim Design und der Entwicklung des Routingservers zum Einsatz gekommen sind. Anschließend werden die einzelnen Komponenten und deren Zusammenspiel detailliert dargestellt.

Tanenbaum u. van Steen [2008] nennen folgende Kerneigenschaften als besonders bedeutend bei der Entwicklung einer Architektur eines Dienstes:

- modular,
- robust,
- evolutionär und
- interoperabel

Werden diese Eigenschaften auf Entwicklungsprinzipien zurückgeführt, so bietet sich die Konzeption eines verteilten Systems unter Berücksichtigung einer Dienste-orientierten Architektur an. Dessen Prinzipien werden im Folgenden näher erläutert.

5.4.2 Verteilte Systeme

Ein verteiltes System wird von [Tanenbaum u. van Steen \[2008\]](#) definiert als eine „Ansammlung unabhängiger Computer, die den Benutzern wie ein einzelnes kohärentes System erscheinen“. Diese Systeme verfügen dabei nicht zwangsläufig über einen gemeinsamen Speicherbereich und müssen daher über Nachrichten kommunizieren. Die Verwendung eines verteilten Systems bietet diverse Vorteile, welche bei der Entwicklung eines Routingsystems unabdingbar sind [[Chantelau u. Brothuhn, 2010](#)]:

- **Ausfallsicherheit:** Die unterschiedlichen Systeme können redundant zueinander aufgebaut werden. Somit kann bei Ausfall eines einzelnen Systems auf ein anderes zurückgegriffen werden.
- **Ressourcenverteilung:** Ressourcen, welche nur begrenzt oder an bestimmten Orten verfügbar sind, können entsprechend von Einzelkomponenten genutzt werden.
- **Lastverteilung:** Die Rechenlast kann auf unterschiedliche Rechner aufgeteilt werden. Auch in diesem Fall kann durch Aufsetzen redundanter Komponenten eine Skalierbarkeit gewährleistet werden. Von Vorteil ist in diesem Fall, dass nicht das Gesamtsystem redundant erstellt werden muss, sondern nur kritische Komponenten.
- **Gleichzeitigkeit:** Das Berechnen verteilter Aufgaben erfolgt gleichzeitig und spart weitere Rechenzeit ein.
- **Verteiltes Rechnen:** Auch einzelne Rechenschritte können auf verschiedene Systeme verteilt werden.

5.4.3 Dienste-orientierte Architektur

Unter einer Dienste-orientierten Architektur (engl. service oriented architecture (SOA)) wird eine Systemarchitektur verstanden, welche „vielfältige, verschiedene und eventuell inkompatible Methoden oder Applikationen als wiederverwendbare und offen zugreifbare Dienste repräsentiert und dadurch eine plattform- und sprachenunabhängige Nutzung und Wiederverwendung ermöglicht“ [[Melzer et al., 2005](#)]. Konkret bedeutet dies, dass unterschiedliche Komponenten erstellt werden, welche jeweils einen bestimmten Dienst erbringen. Jede Komponente besitzt eine Schnittstelle, über welche der Dienst angesprochen werden kann. Ein besonderer Vorteil der Unterteilung des Gesamtsystems in eine SOA besteht darin, dass die verschiedenen Dienste von unterschiedlichen Komponenten genutzt werden können. Da bei der hier entwickelten Architektur mehrere Systeme untereinander gekoppelt werden sollen, bietet sich der Aufbau in einer SOA an. Insbesondere für moderne Architekturansätze, welche als Zielsystem eine

Cloud-Umgebung verfolgen, bietet es sich an, diese Dienste möglichst klein, als sogenannte „Micro-Services“ auszubilden. Durch die Unterteilung in möglichst kleine Dienste wird eine optimale Skalierbarkeit des Gesamtsystems erreicht. Da es sich bei dem hier entwickelten System nur um einen Prototyp handelt, werden bei einigen Schritten Vereinfachungen getroffen. Bei einem späteren Aufbau eines solchen Systems sollte beachtet werden, dass die Services möglichst zustandslos, also ohne eigenen Zustand sind. Zustände, wie beispielsweise die aktuellen Strategien, sollten in zentrale (Cloud-) Speicher ausgelagert werden. Im Prototyp werden einige Zustände im Speicher gehalten.

5.4.4 Gesamtarchitektur des Serveraufbaus

Kernkomponente des Routingsservers stellt eine Routingengine dar, welche in der Lage sein muss, Routen unter Verwendung modifizierter Routingalgorithmen zu berechnen. Hierzu ist es notwendig, Zugriff sowohl auf einen Kartenlayer, als auch auf die Datenbasis der zusätzlichen Verkehrsinformationen zu haben. Diese zusätzlichen Informationen müssen wiederum von einem Service entgegengenommen und abgespeichert werden. Eine weitere Komponente stellt eine Schnittstelle dar, über welches ein Fahrzeug in der Lage ist, Informationen anzufragen. Ein grobes Schema, auf dessen Basis die einzelnen Komponenten und deren Interaktion untereinander entwickelt werden, sieht wie in Abbildung 5.13 dargestellt aus. Im Folgenden werden die unterschiedlichen Komponenten detailliert beschrieben.

5.4.5 Routingengine

Die Routingengine stellt eine zentrale Komponente der Architektur dar. Da die Gesamtarchitektur nach dem SOA Prinzip gestaltet wurde, besteht an die Routingengine technologisch nur die Anforderung, dass sich Schnittstellen entwickeln lassen, welche die Anbindung als Service ermöglichen. Die BMW Group arbeitet im europäischen Raum auf Basis von HERE-Kartendaten [[Here Global B.V., 2015](#)]. Da der zu entwickelnde Systemaufbau Anwendung im Rahmen von Kooperationsprojekten mit unterschiedlichen Partnern finden soll und diese Kartenbasis im Rahmen dieser Arbeit kostenlos zu Verfügung gestellt wurde, werden diese Daten, welche über eine hohe Detaillierung und Güte verfügen, verwendet. Die Daten können über eine bereitgestellte Schnittstelle in unterschiedliche Datenbanken importiert werden. Der in Kapitel 5.3 geschilderte A*-Algorithmus wurde in Java implementiert und über REST-Schnittstellen angebunden. Zusätzlich wurde ein kleines Web-Interface mit leaflet [[leaflet, 2017](#)] gebaut, über welches Routen per

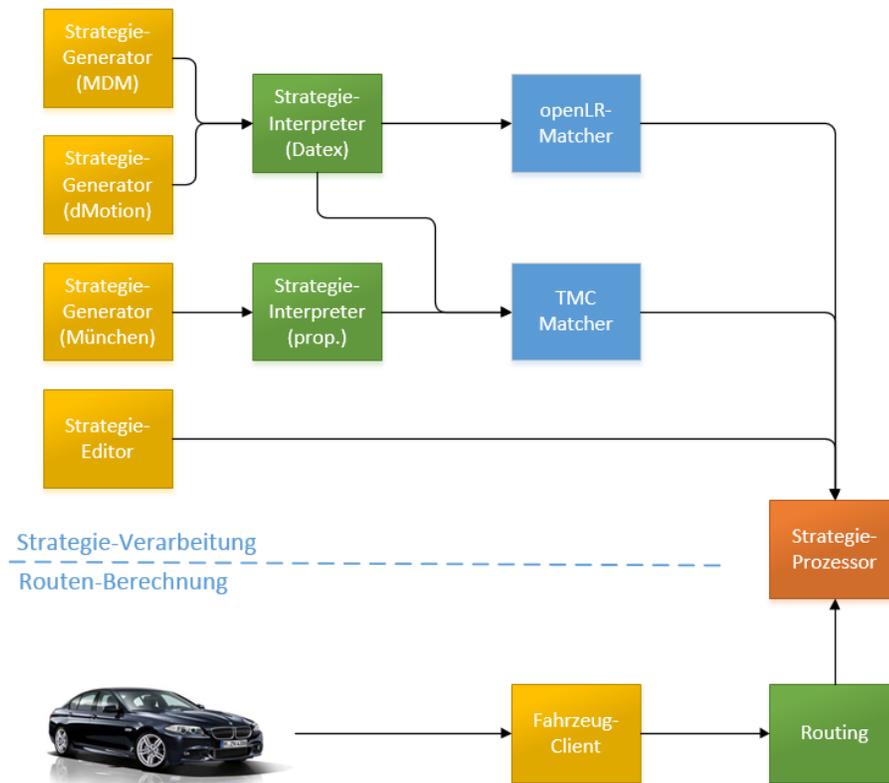


Abbildung 5.13: Architektur des Routingservers

Klick auf eine Karte berechnet und visualisiert werden können. Die Abbildungen unter anderem in Kapitel 5.3 zeigen diese Oberfläche.

5.4.6 Fahrzeugintegration

Eine weitere zentrale Komponente stellt das Fahrzeug dar. Auch aus dessen Anbindung entstehen Anforderungen, welche berücksichtigt werden müssen. Da es nicht möglich und im Aufwand nicht gerechtfertigt ist, eine eigenständige Navigationsplattform für die Darstellung, die Routenführung und die Kommunikation zu erstellen, wird auf ein serienmäßig vorhandenes Navigationsgerät aufgesetzt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden ausschließlich Fahrzeuge der Marke BMW betrachtet, da diese während der Bearbeitung der Arbeit durch die BMW AG zur Verfügung gestellt wurden. Die Fahrzeuge verfügten zu Beginn dieser Arbeit (bis Mitte 2014) nicht über eine hybride Routing Technologie. Allerdings verfügen alle verwendeten Fahrzeuge über eine Mobilfunkverbindung. Des Weiteren existieren zwei Technologien, welche eine prototypische Integration

eines hybriden Routing-Ansatzes ins Fahrzeug ermöglichen: „BMW-Online“ und „gespeicherte Reisen“. Zunächst wurde auf dieser Technologie aufgesetzt. Hierzu wurden in C# Komponenten entwickelt, welche die Route in ein vom Fahrzeug benötigten XML Format verpackt und über einen Webservice zur Verfügung stellt. Über die normale Navigation des Fahrzeugs kann zunächst eine normale Routenberechnung durchgeführt werden. Durch den Aufruf einer Internetseite im fahrzeuginternen Browser kann überprüft werden, ob eine Strategische Route zur Verfügung steht. Durch den Aufruf der Webseite wird die Routing-Engine angestoßen und berechnet, wenn möglich eine Strategische Route. Die Route wird dem Fahrzeug anschließend über die „gespeicherten Reisen“ zum Download zur Verfügung gestellt. Hier kann die Route zunächst betrachtet werden und in die Navigation übernommen werden (vgl. Abbildung 5.14).



Abbildung 5.14: Fahrzeugdarstellung des hybriden Routings

Anschließend kann die Zielführung über die fahrzeugseitige Navigation durchgeführt werden. Diese Technologie wurde in den Projekten eingesetzt, welche vor der Einführung des hybriden Routings durchgeführt wurden (vgl. Kapitel 6.2 und Kapitel 6.3). Seit 2014 steht in BMW-Fahrzeugen die Funktion „online Alternativen“ zur Verfügung. Dessen Funktionsweise wurde bereits in Kapitel 2.8 geschildert. Nach der Berechnung einer Route im Fahrzeug wird diese automatisch an ein Backend-System geschickt und dort evaluiert. Existiert eine bessere Route, so wird diese ans Fahrzeug übermittelt und dort übernommen. Abbildung 5.16 zeigt einen Ablauf der Kommunikation. Nach der Einführung dieses Dienstes wurde auch für diese Funktion ein Fahrzeugdemonstrator entwickelt. Auf Basis dieser Implementierung wurde das Projekt, welches in Kapitel 6.1 geschildert wird, durchgeführt.

5.4.7 Einbindung der Strategien

Die Strategien durchlaufen drei verschiedene Komponenten, bis zur Anwendung im Routing: Strategie-Generator, Strategie-Interpreter und Strategie-Prozessor. Diese Dienste wurden bewusst in drei Komponenten ausgelagert, um einen möglichst hohen Synergie-Effekt bei der Entwicklung des Codes zu erreichen, gleichzeitig aber in der Lage zu sein, Strategien aus unterschiedlichen Quellen und in unterschiedlichen Formaten mit dem gleichen Router zu verarbeiten. Im Folgenden werden die Komponenten näher beschrieben.

Strategie-Generator

Der Strategie-Generator erzeugt oder importiert Strategien aus einer bestimmten Quelle. Die Art des Strategie-Generators ist abhängig von der Art der Bereitstellung der Strategien. Die Strategien könnten beispielsweise über eine Internetseite oder das File Transfer Protocol (FTP) bereitgestellt werden. In diesem Fall würde der Strategie-Generator Daten vom FTP-Server laden oder einen http-Request gegen die Webseite ausführen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde unter anderem ein Strategie-Generator implementiert, der die Strategien, welche über den MDM (vgl. Kapitel 2.6) geliefert werden, entgegennimmt. Der MDM stellt die Verkehrsinformationen wahlweise über PUSH oder PULL via Webservice zur Verfügung. Um möglichst aktuelle Informationen zu erhalten, wurde ein PUSH-Dienst erstellt. Hierzu wurde ein Webservice aufgebaut, der die Daten des MDM entgegen nimmt. Der Strategie-Editor (vgl. Kapitel 5.5.2) ist eine spezielle Form eines Strategie-Generators. Auch der Strategie-Editor erzeugt Strategien, bringt diese allerdings gleich in die zur Verarbeitung genutzte Form, so dass ein Strategie-Interpreter nicht notwendig ist.

Strategie-Interpreter

Die Aufgabe eines Strategie-Interpreters ist es, die Strategie-Informationen, welche von einem Strategiegenerator erzeugt wurden, für den Strategie-Prozessor aufzubereiten und somit in ein einheitliches Strategie-Format zu überführen. Dies geschieht nicht im Strategie-Generator, da dieser teilweise auf Seiten eines Verkehrsbetreibers installiert ist. Für die Strategien, welche über den MDM (vgl. Kapitel 2.6) geliefert werden, wurde ein Datex-II-Interpreter geschrieben. Für die Verarbeitung der Strategien innerhalb des Gesamtsystems wurden eigene Schnittstellenobjekte definiert. Der Datex-II Interpreter parst die notwendigen Informationen aus dem Datex-II Schema und befüllt das selbst definierte Schnittstellenobjekt. Der Datex-II-Interpreter kann für alle Strategie-Quellen verwendet

werden, welche die Strategien im Datex-II-Format liefern, nicht notwendigerweise beschränkt auf Strategien, welche über den MDM zur Verfügung gestellt werden. Proprietäre Datenquellen benötigen jeweils einen eigenen Strategie-Interpreter, da der Interpreter spezielles Wissen über das Format der Bereitstellung benötigt. Für die Strategien, die über den eigens entwickelten Strategie-Editor geliefert werden, wird kein eigener Interpreter benötigt, da die Strategien im Generator bereits auf das definierte Format gebracht werden.

5.4.8 TMC-HERE-Matcher

Die Strategien, die über den MDM geliefert werden, verfügen über eine TMC-Georeferenzierung (vgl. Kapitel 5.6). Der TMC-Here-Matcher wandelt die TMC Referenzierungen in HERE-Kartenlinks um. Hierzu wird ein einfaches Look-Up durchgeführt, welches durch die HERE-Karte bereitgestellt wird. Je TMC-Link und Richtung ist eine Menge von geordneten HERE-Links mit Richtungen in der Karte angegeben. Die Offsets werden durch die Länge der einzelnen Kanten mit einberechnet. Die HERE-Kartenlinks einer zuvor festgelegten Kartenversion werden im Gesamtsystem als einheitliche Georeferenzierungsgrundlage verwendet. Alle Quellen werden auf dieser Kartenbasis abgebildet, sodass ein direkter Vergleich der Daten ermöglicht wird.

5.4.9 openLR-Decoder

Neben den TMC-Informationen existieren auch Strategien, die im openLR-Format codiert sind (vgl. Kapitel 5.6.3). Es wurde eine Komponente entwickelt, die den von TomTom bereit gestellten openLR-Converter modifiziert und als Dienst bereitstellt. Die in Kapitel 5.6.5 geschilderten Modifizierungen wurden eingearbeitet. Als Kartenbasis wurde in dem Converter wiederum die festgelegte HERE-Kartenbasis eingebunden. Somit konvertiert dieses Modul die openLR-Strings zu HERE-Kartenlinks mit Offset.

5.4.10 Strategie-Prozessor

Die Aufgabe eines Strategie-Prozessors ist die Aufbereitung der Strategien für das Routing. Da bei dem strategischen Routingsystem Strategien aus unterschiedlichsten Quellen zusammenlaufen, bedarf es einer Validierung der Strategien, bevor diese für das Routing freigegeben werden. Hierzu wird zunächst überprüft, ob die Strategie einen Mehrwert generiert. Dieses Verfahren wird in 6.2 geschildert.

Weiterhin ist eine Überlagerung von zwei Strategien nicht ausgeschlossen. In diesem Fall muss eine Priorisierung der zu überlagernden Strategien stattfinden. Diese wird über eine zuvor definierte Reihenfolge zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Quellen durchgeführt. Der Strategie-Prozessor kommuniziert anschließend alle gültigen Strategien an den Router.

5.4.11 Ablauf der Routenberechnung und Strategie-Verwaltung

Das Routing-Gesamtsystem kann in zwei wesentliche Grundabläufe unterteilt werden. Zum einen den Import der Strategien, welcher im Sequenzdiagramm 5.15 dargestellt ist und die Routenanfrage, deren Ablauf Abbildung 5.16 illustriert. Beim Import durchlaufen die Strategien die geschilderten Komponenten und werden letztendlich vom Strategie-Prozessor gespeichert. Dies ist die einzige Komponente, die auch bei der Routenanfrage involviert ist. Die Unterteilung des Gesamtsystems in diese beiden unabhängigen Abläufe bietet bei der Skalierung des Systems einen entscheidenden Vorteil. Es gibt zwei unterschiedliche Gründe, die zu der Notwendigkeit der Skalierung des Systems führen. Zum einen könnte die Menge der zur Verfügung gestellten Verkehrsinformationen stark ansteigen. In diesem Fall müssten alle Komponenten „vor“ dem Strategie-Prozessor skaliert werden, ohne dabei die Komponenten zur Routenberechnung modifizieren zu müssen. Selbiges gilt für den Fall, dass eine Skalierung durch einen großen Anstieg der Fahrzeuge, die Routenanfragen stellen, bedingt wird. In diesem Fall können die Komponenten zur Routenberechnung unabhängig von der Strategie-Prozessierung skaliert werden.

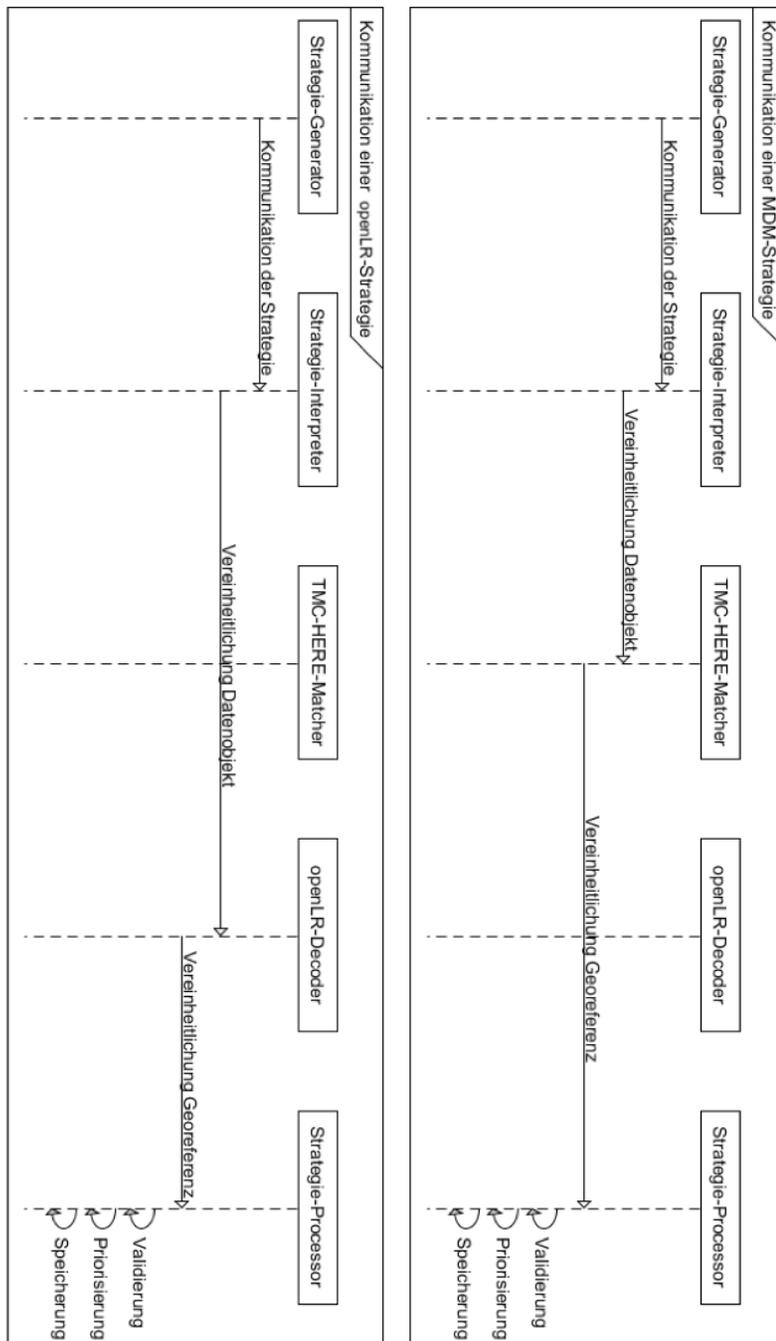


Abbildung 5.15: Ablaufdiagramm des Strategie-Imports

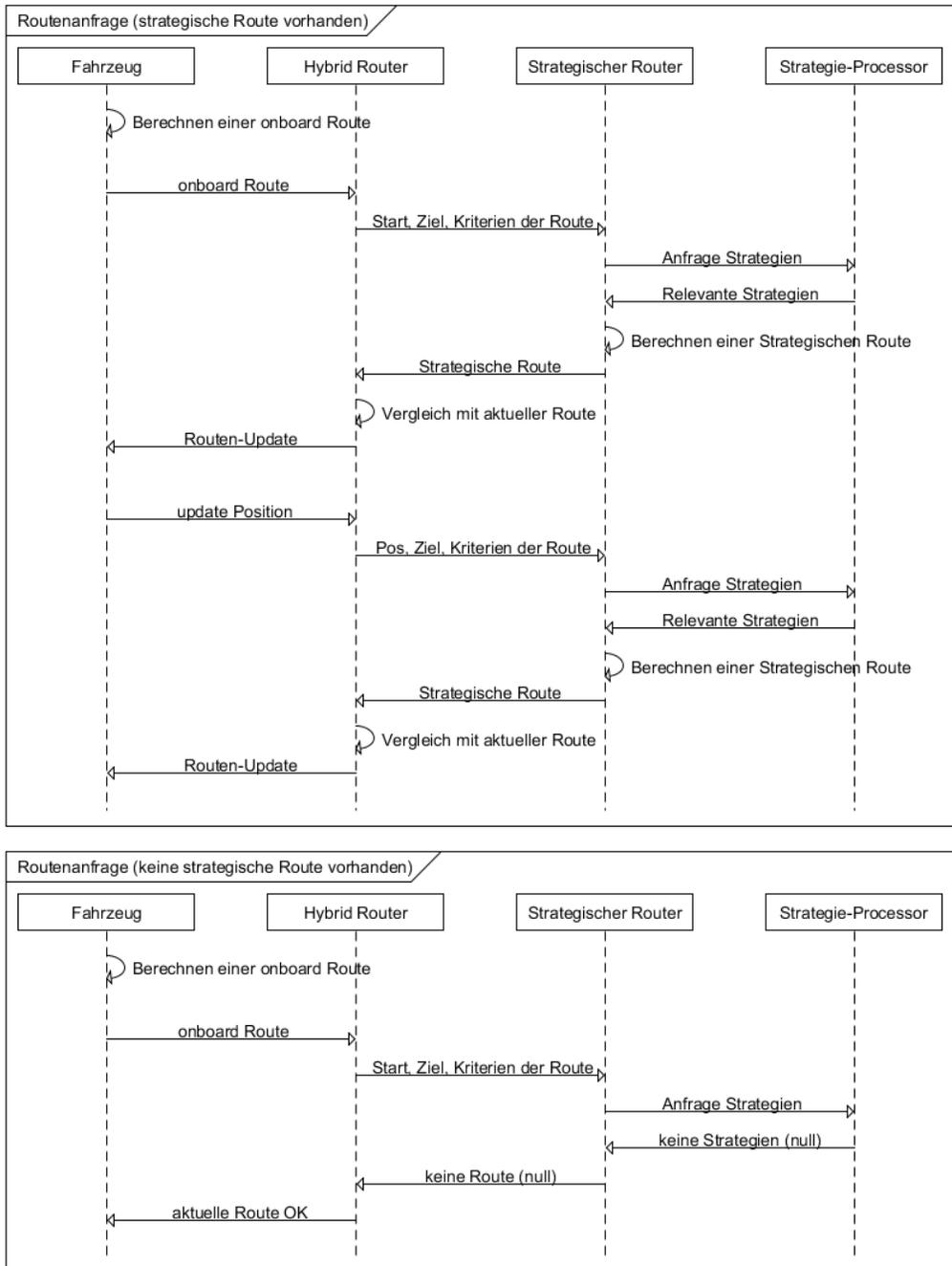


Abbildung 5.16: Ablaufdiagramm von Routenanfragen

5.5 Digitalisierung von Strategien

Wie bereits im Kapitel 5.1 beschrieben, existieren unterschiedliche Arten von Strategien. Um diese Informationen zwischen verschiedenen Systemen austauschen zu können, ist es notwendig, ein einheitliches Austauschformat zu definieren, welches idealerweise standardisiert wird, um einen möglichst großen Nutzerkreis in einheitlicher Weise erreichen zu können.

5.5.1 Standardisiertes Austauschformat für Strategien

Wie bereits die Voranalyse von Bestandssystemen ergeben hat, existieren in vielen Verkehrsmanagementzentralen bereits Möglichkeiten der digitalen Abbildung von Strategien (vgl. Kapitel 2.6). Darüber hinaus wurde mit Datex-II bereits ein gängiges Austauschformat für Verkehrsinformationen vorgestellt (vgl. Kapitel 2.7), welches von durch die Verwendung im MDM und weiteren Portalen als europäischer Standard angenommen wurde. Sollen sich Verkehrsstrategien etablieren können, muss auch für diese ein Standard geschaffen werden, der diese geeignet darstellen kann. Da Datex-II über eine Erweiterungsmöglichkeit für neuartige Verkehrsinformationen verfügt, bietet es sich an, dieses Format auch für den Austausch von Strategien zu verwenden. Im Projekt dMotion wurden bereits Austauschformate für Strategien definiert (vgl. Kapitel 2.3), welche allerdings noch im proprietären OCIT-C Format festgelegt wurden. Eine standardisierte Darstellung in einem öffentlichen Standard ist dringend notwendig, um übergreifend über verschiedene Strategie-Anbieter und -Abnehmer hinweg Daten austauschen zu können. Um auf die im Projekt dMotion erreichten Erfahrungen hinsichtlich des Austauschformates aufbauen zu können, wurde mit der Stadt Düsseldorf und der Fa. Alberecht Consult eine Erweiterung für das Datex-II Schema für Strategien entwickelt. Die Entwicklungen basierten dabei vor allem auf dem in dMotion erstellten Strategieformat.

Abbildung 5.17 zeigt die Erweiterung des Datex-II Schema um das „Strategic Route Management“. Zur Abbildung von Routenempfehlungen wurde eine „Route“ definiert, ohne dabei das Georeferenzierungsformat vorzugeben. Des Weiteren wurden die Trigger definiert, um eine Aktivierungsbedingung für die Strategien festlegen zu können. Auf eine weitere Darstellung des entwickelten Schemas wird an dieser Stelle verzichtet. Die genaue Definition kann dem letztendlichen Schema StrategicRouting.xsd entnommen werden, welches auf den Seiten des MDM bereitgestellt und erläutert wird [[Mobilitätsdatenmarktplatz der Bundesanstalt für Straßenwesen, 2012](#)]. Inzwischen existieren diverse Erweiterungen des Schemas. Das ergänzend eingeführte „Strategic Route Management“ dient zur

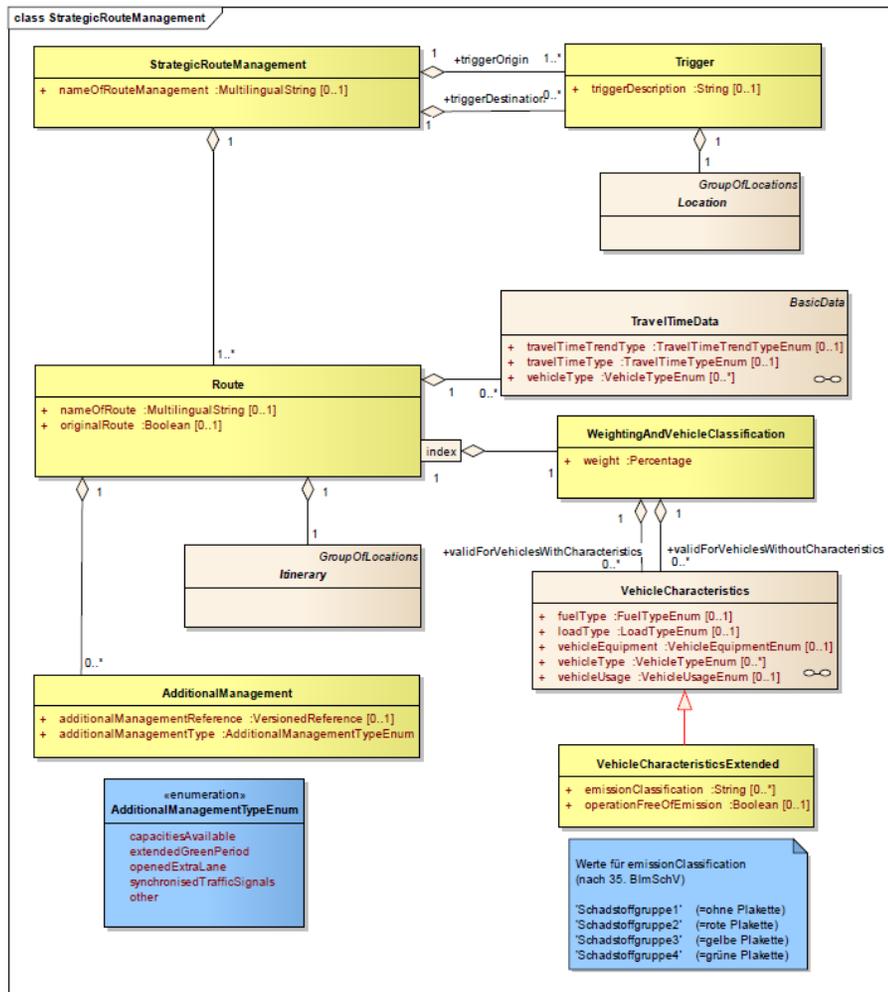


Abbildung 5.17: Erweiterung des Datex-II Schemas um Strategien

Beschreibung der festgelegten „Trigger Strategien“. Die Abbildung von globalen Verkehrsinformationen, also den allgemeingültigen Strategien, ist ohnehin mit Hilfe des bestehenden Datex-Schemas über „Situation Records“ möglich. Jedem Situation Record kann ein *Cause Type* (also die Ursache für eine Situation, zum Beispiel Stau, Unfall, usw.) zugeordnet werden. Diese Cause Types beschränken sich im aktuellen Schema jedoch auf Negativ-Fälle. Für Strategien sollen explizit Positiv-Fälle angegeben werden können. Im Projekt LENA4ITS wurde für das Datex-Schema zusätzlich ein „AdditionalManagementTypeEnum“ eingeführt, welches die Operator Actions (also die Handlungen einer VMZ) um positive Eingriffe ergänzt. Durch die beiden durchgeführten Veränderungen am Datex-Schema ist es nun möglich, die zuvor definierten Strategien auf standardisierte Art und Weise zu beschreiben.

5.5.2 Entwicklung eines Strategie-Editors zur Erstellung von Strategien

Städtische Verwaltungsorganisationen haben über die Zeit unterschiedliche IT-Systeme für ihre Verkehrsmanagementzentralen aufgebaut. Da bereits ein einheitlicher Standard für die Kommunikation von Strategien geschaffen wurde und die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) mit dem MDM eine zentrale Austauschplattform anbietet, obliegt es nun den Betreibern der jeweiligen VMZ eine geeignete Kommunikation der Daten zu schaffen. Um nicht nur auf Strategien von externen Quelle angewiesen zu sein, wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit [Kiermaier, 2012] ein sogenannter „Strategie-Editor“ entwickelt, mit dessen Hilfe Strategien über eine Web-Oberfläche erzeugt werden können. Dieser Editor soll vor allem für Demonstrationszwecke eingesetzt werden.

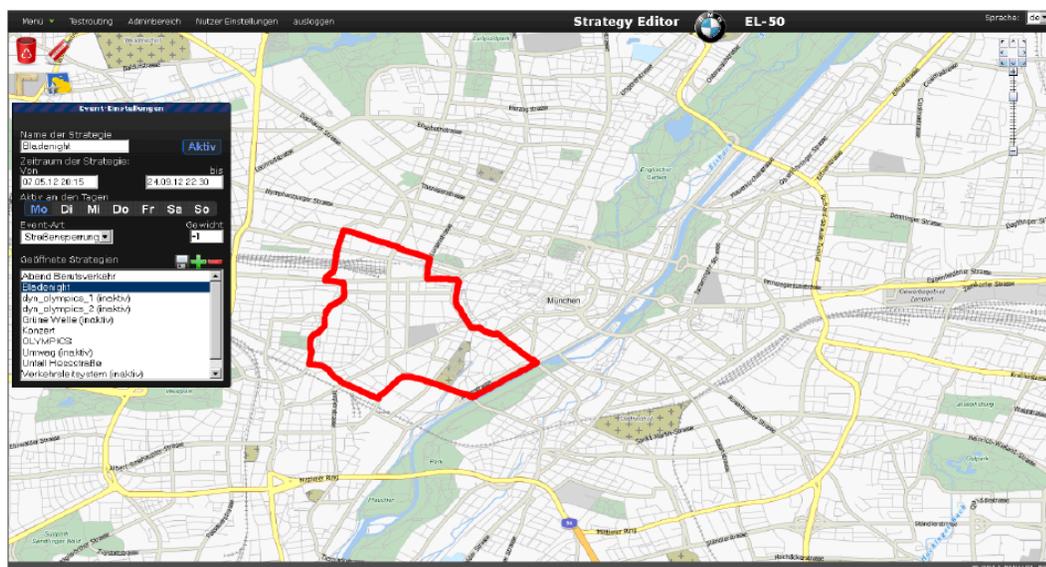


Abbildung 5.18: Benutzeroberfläche des Strategieeditors

Abbildung 5.18 zeigt die Benutzeroberfläche des Editors. Im Wesentlichen besteht der Editor aus einer interaktiven Kartendarstellung, auf der die üblichen Karteninteraktionen ausgeführt werden können. Georeferenzen, bestehend aus Straßenabschnitten, können definiert und über eine Konfigurationsbox (in Abbildung 5.18 links) attribuiert werden. Der Editor ermöglicht es, beide definierte Strategieobjekte – die allgemeingültigen Strategien und die Triggerstrategien – zu erstellen. Nach Auswahl der jeweiligen Strategie erscheint eine Konfigurationsbox, die entweder die Eingabe der Trigger und Ausweichrouten der Triggerstrategien oder die Attribute der allgemeingültigen Strategien ermöglicht. Der Editor

konvertiert die Strategie in das festgelegte Datex-II Format, um die Strategien anschließend so behandeln zu können, als kämen sie von beliebiger Quelle. Über eine Senden-Funktion können die Strategien an das Routing-System kommuniziert werden.

5.6 Georeferenzierung

Die Übermittlung der Strategischen Informationen im Datex-II Format regelt zwar die Form, in welcher Art die Daten übertragen werden, jedoch können inhaltlich noch unterschiedliche Daten kommuniziert werden. Besonders eklatant sind die Unterschiede bei der Georeferenzierung. Unter Georeferenzierung wird in diesem Fall der Bezug zwischen den inhaltlichen Informationen und einer räumlichen Referenzierung, also der Bezug auf eine digitale Karte verstanden. Zumeist arbeiten die IT-Systeme mit ihrer eigenen digitalen Karte und nutzen intern den Bezug auf proprietäre Identifier (z. B. IDs von Straßenlinks). Dies vereinfacht den internen Umgang mit den Daten enorm. Schwierig wird es, wenn unterschiedliche Systeme miteinander kommunizieren sollen. Die Problematik der Georeferenzierung von Daten ist nicht neu, daher wurden in der Vergangenheit bereits unterschiedliche Verfahren entwickelt. Das wohl bekannteste und etablierte Verfahren ist die Referenzierung via TMC Location Codes. Daher wird dieses Verfahren im Folgenden kurz erläutert.

5.6.1 Traffic Message Channel (TMC)

Für die Kommunikation von Verkehrsmeldung wurde bereits in den 1990er Jahren der sogenannte Traffic Message Channel entwickelt (vgl. [Deutsches Institut für Normung e.V. \[2011\]](#)). Der Fokus bei diesem Verfahren lag unter anderem auf der sehr effizienten Speicherung der Informationen, da diese via Radio Data System (RDS) mit einer Bandbreite von nur 60 Bits/s übertragen werden sollten. Bei den TMC Location Codes handelt es sich um vorkodierte Knoten mit jeweils eindeutigen Positionen.

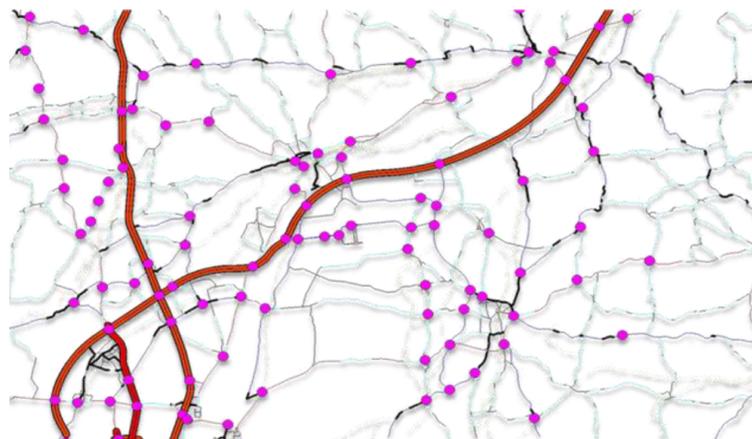


Abbildung 5.19: TMC Location Codes im Münchner Norden [Pollesch, 2011]

Eine endliche Anzahl dieser Knoten wird in der sogenannten TMC Location Code Liste zusammengefasst. Diese Listen werden in regelmäßigen Abständen von offizieller Seite bekannt gegeben, so dass Kartenhersteller diese Knoten in den digitalen Karten abbilden können. Somit wurde eine einheitliche Referenzkarte geschaffen, über welche Abbildungen auf andere Karten ermöglicht werden. Abbildung 5.19 zeigt die im Münchner Norden festgelegten TMC Location Codes. Einen Spezialfall der Georeferenzierung stellt die Lineare Referenzierung, also die Beschreibung von Streckenabschnitten, dar. Dies kann im einfachsten Fall durch die Angabe von zwei Punkten erfolgen, welche indirekt die zwischen den Punkten befindliche Strecke beschreiben. Streckenabschnitte (TMC-Links) lassen sich daher auch durch Beziehungen zwischen den einzelnen TMC Knoten abbilden. Für bisherige Anwendungszwecke hat sich die TMC-Location-Referenzierung als geeignetes Verfahren herausgestellt und auf Grund der sehr einfachen Logik etabliert. Allerdings ergeben sich bei der Verwendung des Verfahrens für Strategische Routen einige Nachteile:

- Durch die endliche Anzahl an zuvor festgelegten TMC-Knoten, deckt das Verfahren nur das Hauptstraßennetz ab. Bei Strategischen Routen sollen häufig Routen abseits des Hauptstraßennetzes genutzt werden, welche mit diesem Verfahren nicht beschrieben werden können.
- Für die Abbildung von detaillierten Verkehrsbeziehungen (z. B. einzelner Fahrbeziehungen innerhalb eines Knotenpunktes) eignet sich die Referenzierung nicht, da durch die ausschließlich grobe Beschreibung der Knoten und dessen Beziehungen untereinander keine Detailinformationen festgelegt werden können.
- Für die Abbildung von Routen, also komplexen Fahrbeziehungen, eignet sich das Format nur bedingt, da die Abbildung von Relationen teilweise nicht möglich oder uneindeutig ist.

Aufgrund dieser Nachteile des Verfahrens ist es für die Verwendung für Strategische Routen nicht ausreichend geeignet.

5.6.2 Dynamische Georeferenzierung

Bei dem TMC-Location-Code-Verfahren handelt es sich um ein vorkodiertes oder statisches Referenzierungsverfahren, da die Abbildung über zuvor festgelegte Fixpunkte erfolgt. Im Gegensatz zu diesem Ansatz stehen die dynamischen Georeferenzierungen, welche nicht auf Basis von Fixpunkten funktionieren, sondern sich auf Attribute der digitalen Karte stützen. Für die Encodierung von geographischen Informationen, wird dabei eine entsprechende „Sprache“ entwickelt, die

in Form eines Algorithmus relevante Informationen aus der digitalen Karte extrahiert und diese an den Empfänger übermittelt. Dem Decoder ist das Verfahren zur Encodierung bekannt und dieser ist daher in der Lage, die Informationen reversiv auf eine andere Karte mit ähnlichem Datenformat abzubilden. Die beiden bekanntesten Verfahren zur dynamischen Georeferenzierung stellen OpenLR und Agora-C dar. Beiden Verfahren liegt ein ähnliches Vorgehen zugrunde. Da Agora-C im Gegensatz zu OpenLR lizenzkostenpflichtig ist, wird im Rahmen dieser Arbeit nur das Verfahren OpenLR weiter betrachtet.

5.6.3 OpenLR

OpenLR verfolgt das Ziel, eine Georeferenz auf differenten digitalen Karten abbilden zu können, ohne dabei über eine gemeinsame Referenz zu verfügen. Im Folgenden wird nur das Verfahren zur Beschreibung einer Line Location, also einer Route, geschildert, auch wenn OpenLR ebenso geeignet ist, Area- oder Point-Locations zu referenzieren.

OpenLR basiert auf der En- bzw. Dekodierung von sogenannten Location Reference Points (LRP). Ein solcher LRP besitzt neben einer WGS'84-Koordinate zur Beschreibung der Lage, noch weitere Attribute. Eine Strecke wird über eine geordnete Menge von LRPs beschrieben. Der Algorithmus zur Encodierung beginnt mit zwei Knoten, dem festgelegten Start- und Zielpunkt der zu encodierenden Route. Diese Punkte werden durch Offsets auf Kanten zwischen zwei LRPs definiert. Anschließend wird durch eine Kürzeste-Wege-Bestimmung der ideale Weg zwischen den beiden Punkten berechnet. Weicht dieser von der zu beschreibenden Strecke ab, werden solange LRPs eingefügt, bis die Strecke eindeutig beschrieben ist. Abbildung 5.20 veranschaulicht die Funktion.

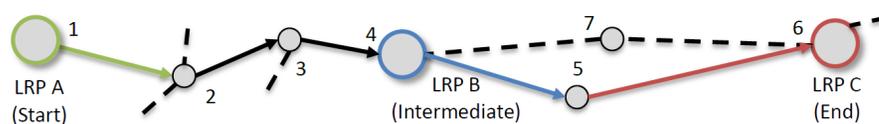


Abbildung 5.20: Location Reference Points von OpenLR

Die Datensätze der drei Referenzknoten 1, 4 und 6 sowie ihre zugehörigen ausgehenden Kanten werden durch die LRP A, B und C in die Encodierung einbezogen. Eine Ausnahme bildet LRP C ohne Nachfolger, der mit der eingehenden Kante gekoppelt ist (rot dargestellt). An den Knoten 2 und 3 in der Abbildung wird angenommen, dass keine Abweichung von dem zu referenzierenden Weg stattfindet und somit keine Richtungsvorgabe benötigt wird. Wegen der kürzeren Verbindung zwischen Knoten 4 und 6 über Knoten 7 ist die Festlegung des LRP B

nötig, da der Weg über Knoten 5 gewählt werden soll. Es entsteht ein sogenannter Location Reference Path von LRP A zu LRP C. Die Attribute des LRPs beschreiben genauer die Lage des Punktes, sowie die daran angeschlossene Strecke. Hierfür werden folgende Attribute verwendet:

- FRC (Functional Road Class): die Straßenkategorie der angeschlossenen Straßenkante
- FOW (Form of Way): die Art der angeschlossenen Straße, z. B. Autobahn, Straße mit mehreren oder nur einem Fahrstreifen, Kreuzung, Kreisverkehr, Auffahrt / Abfahrt zu Autobahnen, usw.
- Length: der Abstand zum nächsten LRP
- Bearing: der Winkel in welchem der LRP verlassen wird
- Name: Straßename der angeschlossenen Straßenkante

Diese Informationen werden an den Decoder übermittelt, welcher zunächst aus den Daten Kandidatenmengen für geeignete LRPs bestimmt. Auf Basis der zusätzlich gegebenen Attribute werden die wahrscheinlichsten Kandidaten bestimmt. Durch erneute Anwendung des Routing-Algorithmus werden schließlich die Strecken ermittelt. Eine detaillierte Darstellung des Algorithmus und dessen Funktionsweise ist nachzulesen unter [TomTom International B.V., 2012].

5.6.4 Tauglichkeit von OpenLR für Strategisches Routing

Um die Tauglichkeit von OpenLR zur Referenzierung von (strategischen) Routen zu beurteilen, soll eine Qualitätsmessung durchgeführt werden. Hierfür wurden zwei unterschiedliche Karten an den von TomTom bereitgestellten OpenLR Konverter angeschlossen: eine Karte von HERE und das vom Austrian Institut of Technology (AIT) zur Verfügung gestellte Netz der Graphen Integrations Plattform (GIP) (vgl. <http://www.git.at/>). Somit werden zwei professionelle Karten verwendet, welche unabhängig voneinander erstellt und gepflegt wurden. Als Referenz-Routen wurden von BMW 100 real gefahrene Routen zur Verfügung gestellt, welche auf der HERE-Karte encodiert und anschließend auf der GIP-Karte wieder decodiert wurden.

Zur automatischen Kontrolle der Ergebnisse wurden zwei Metriken aufgestellt: Die Dekodierungsmetrik gibt an, ob eine Route überhaupt dekodiert werden konnte. Wirft der Konverter einen Fehler aus, gilt die Route als nicht dekodiert $\delta_d(r_i) = 0$. Liefert der Dekoder einen Wert zurück gilt die Route als dekodiert $\delta_d(r_i) = 1$. Diese Metrik liefert keine Aussage zu der Qualität der dekodierten Route. Bei der Koordinatenmetrik wird ebenfalls zunächst die Route dekodiert. Für diese Route werden dann anhand des Straßenverlaufs alle 20 m Koordinaten errechnet. Im Anschluss daran wird geprüft, ob es für jeden gegebenen Punkt der

Originalroute einen Punkt gibt, der weniger als 20 m entfernt ist. Das bedeutet, dass um jeden Punkt ein Quadrat mit einer Seitenlänge von 20 m gelegt wird. Sind alle Originalpunkte in diesem Schlauch um die dekodierte Route enthalten, so wird die Route als korrekt gewertet. Ist dies für mindestens einen Punkt nicht der Fall oder konnte die Route nicht dekodiert werden, so gilt $\delta_k(r_i) = 0$, andernfalls $\delta_k(r_i) = 1$.

Auf Basis dieser Metriken wurden zunächst alle Routen ermittelt, welche nicht korrekt wiedergeben werden konnten. Insgesamt konnten 77% der Routen dekodiert werden, 64% wurden im Sinne der Koordinaten-Metrik korrekt dekodiert. Bei der Untersuchung der Routen wurde festgestellt, dass vor allem fünf Fehler wiederholt auftreten:

1. Der Routenverlauf wurde aufgrund von unterschiedlichen Distanzangaben bei sehr ähnlichen Situationen von dem kürzeste-Wege-Algorithmus falsch interpretiert. Abbildung 5.21 veranschaulicht, dass auf Grund der teilweise geringen Anzahl an LRP in ungünstigen Situationen Fehlinterpretationen auftreten.



Abbildung 5.21: OpenLR Fehler durch unterschiedliche Distanzangaben

2. Feine topologische Unterschiede in der Darstellung der Karte führen zu Fehlinterpretationen. Abbildung 5.22 zeigt, dass an diesen Stellen vor allem Richtungswerte außerhalb des Zielintervalls liefert.

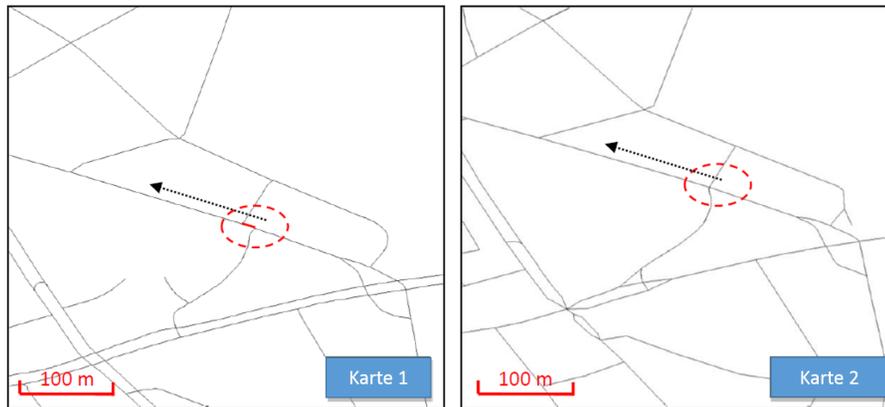


Abbildung 5.22: Feine topologische Unterschiede

- Die ungünstige Lage von LRP's führt zu einem fehlerhaften Matching des Punktes. Abbildung 5.23 zeigt einen Punkt der irrtümlich einem falschen Link zugeordnet wurde. Hierdurch konnte die Route überhaupt nicht dekodiert werden.

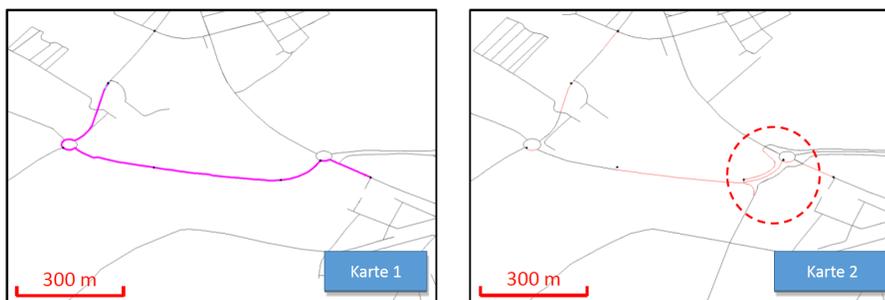


Abbildung 5.23: Missmatch eines OpenLR Points

- Durch eine unterschiedliche Attributierung der Kartenlinks werden nicht korrekte Kandidaten verworfen. Abbildung 5.24 zeigt, dass die Attribute von unterschiedlichen Kartenherstellern jeweils unterschiedliche interpretiert werden.
- Bei echten Kartenunterschieden (z. B. anders attributierten Einbahnstraßen oder nicht vorhandenen Straßen) schlägt der Algorithmus fehl.

5.6.5 Optimierung der OpenLR-Encodierung

Die mit Hilfe des OpenLR-Konverters erzielte Dekodierungsrate entspricht nicht einer ausreichenden Qualität, um in einen Realbetrieb überführt werden zu können. Die durch grundsätzlich unterschiedliche Karten (Fehler 5) entstandenen

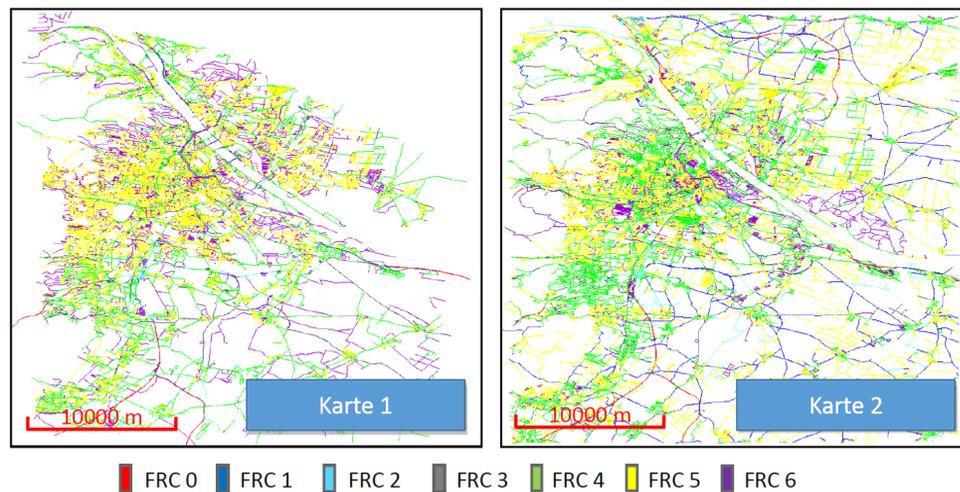


Abbildung 5.24: Unterschiedliche Attributierung der betrachteten Karten am Beispiel FRC

Abweichungen werden in dieser Untersuchung nicht weiter betrachtet. Wird von unterschiedlichen Ausgangssituationen ausgegangen, so ist es nicht möglich, Referenzierungen zwischen zwei Karten fehlerfrei durchzuführen. Ist in einer Karte eine Straße beispielsweise als Einbahnstraße notiert und in der anderen Karte nicht, so lässt sich die Route nicht auf die zweite Karte anwenden.

Der Konverter von OpenLR verfügt über mehrere Konfigurationsparameter, die unter anderem die Fehlertoleranz beim Dekodieren angeben. Die vergleichsweise hohe Abbruchquote (23%) des Konverters ist dadurch zu begründen, dass innerhalb des konfigurierten Toleranzbereiches kein passender Kandidat für einen Knoten oder Link gefunden werden konnte. Insbesondere das teilweise sehr unterschiedliche Bearing (Fehler 2) und die unterschiedliche Attributierung der Kartenlinks (Fehler 4) führen häufig zum Abbruch des Dekodiervorgangs.

Ein weiterer Parameter beschreibt den Abstand der LRPs zueinander. Fehler 1 entsteht vorwiegend durch einen zu großen Abstand der LRPs zueinander. Um einen geeigneten Parametersatz zu finden, wurde eine Parameterstudie durchgeführt. Hierzu wurden die 100 Routen jeweils mit unterschiedlichen Parametersätzen encodiert und dekodiert. Die festgelegten Metriken berechneten jeweils die Güte des entsprechenden Parametersatzes. Bei der Untersuchung der unterschiedlichen Parametersätze bildeten sich zwei Parameter-Cluster: Ein Cluster, das vorwiegend Fehler im innerstädtischen Bereich bewirkte und ein Cluster, das vorwiegend Fehler auf Autobahnen bzw. Landstraßen hervorrief. Aus diesem Grund wurde der OpenLR-Konverter dahingehend erweitert, dass er, je nach Lage der Geopositionen, unterschiedliche Parametersätze für den urbanen und nicht-urbanen Bereich verwenden kann, sofern dieses Attribut zur Verfügung gestellt wird. Für

die beiden Bereiche ergeben sich die in folgender Tabelle dargestellten Konfigurationen.

Parameter	Autobahn	Stadt
Maximum Bearing Difference	15 deg	45 deg
Maximum Node Distance	400 m	150 m
FRC Variance	2	4
DNP Variance	2000 m	500 m

Auch mit den optimierten Parametern treten noch diverse Fehlmatches (Fehler 3) auf. Bei genauerer Betrachtung der entstandenen Fehler, wurde beobachtet, dass durch geschickte Wahl der LRPs in vielen Fällen ein Mismatch vermieden werden kann. Beispielsweise werden Knotenpunkte in Karten unterschiedlich komplex dargestellt. Um zu vermeiden, dass in sehr komplexen Knotenpunkten viele LRPs gesetzt werden, die dann auf der weniger komplexen Karte verteilt werden, wurde bei der Wahl der LRPs eine weitere Bedingung eingeführt: Ein LRP darf nicht in der Nähe eines anderen LRP liegen. Hierfür wurde der OpenLR-Konverter so angepasst, dass bei der Wahl des LRP darauf geachtet wird, dass ein LRP nicht im Umkreis von 50 m zu einem anderen LRP liegt. Durch die Optimierung der Parameter und die Verbesserung der LRP-Auswahl konnten von den ausgewählten Routen 97% korrekt dekodiert werden (Fehler durch unterschiedliche Karten wurden nicht berücksichtigt). Diese Erfolgsrate wird als ausreichend genau betrachtet, um die optimierte OpenLR-Dekodierung in einem Realbetrieb einsetzen zu können.

6 Anwendung und Evaluation der Ergebnisse

In den vorherigen Kapiteln wurden die zur Entwicklung eines Routingservers fürs Strategische Routing getätigten Schritte detailliert erläutert. Nun wird die Funktionalität des Gesamtsystems an unterschiedlichen, realen Testszenarien erkundet. Die Tests wurden auf unterschiedliche Versuchsfelder aufgeteilt, um den Fokus jeweils auf einzelne Probleme lenken zu können. Außerdem gab es zum Zeitpunkt der Durchführungen kein Gebiet, in dem sich alle zuvor geschilderten Untersuchungen testen ließen. Es wurden folgende Testfelder ausgewählt:

- Allianz Arena München, zum Test von Strategien mit Fahrzeugintegration
- die dMotion Düsseldorf Strategien, zur Bewertung von Strategien
- die Stadt München und das Rote Routen Netz München, zum Test von allgemeingültigen Strategien

6.1 Anwendung des Routing-Systems im Testfeld Allianz Arena

Die Allianz Arena in München bietet ein ideales Testfeld, um das neue Routing-System auf Vollständigkeit und Funktionalität zu überprüfen. Als Heimatstadion des FC Bayern München verfügt die Allianz Arena über ein Parkhaus mit mehr als 11.000 Stellplätzen und steht daher regelmäßig einer großen verkehrstechnischen Herausforderung gegenüber. Die Besucher der Arena kommen und verlassen das Parkhaus mehr oder weniger zeitgleich, so dass die umliegende Verkehrsinfrastruktur deutlich beeinflusst wird.

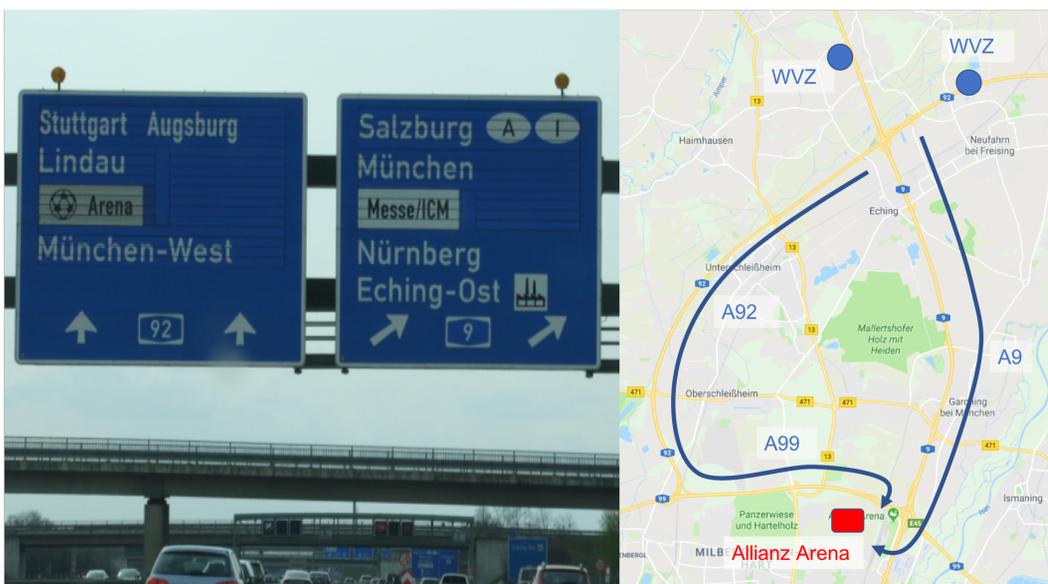


Abbildung 6.1: links: Wechselverkehrszeichen zur Allianz Arena, rechts: Lage der Allianz Arena im Münchner Norden

Die Allianz Arena ist direkt am Autobahnkreuz München-Nord gelegen und verfügt über zwei Autobahnabfahrten: Eine Abfahrt von der in Nord-Süd-Richtung verlaufenden A9, sowie eine Abfahrt von der in Ost-West-Richtung verlaufenden A99 (vgl. Abbildung 6.1). Die Abfahrt der A99 wird von Besuchern verwendet, welche aus westlicher Richtung anreisen, während die Abfahrt auf der A9 von nahezu allen anderen Anreisenden verwendet wird. Hieraus resultiert neben einer sehr hohen Belastung der Autobahnausfahrt auch eine sehr ungleiche Befüllung des Parkhauses. Um den Verkehr in Richtung der Allianz Arena steuern zu können, wurden auf den betreffenden Autobahnen A9, sowie A92 Wechselverkehrszeichen (WVZ) eingerichtet. Diese zeigen an Spieltagen den idealen Weg zur Allianz Arena und können dynamisch aus einer eigenen Verkehrsleitzentrale der

Allianz Arena gesteuert werden. Somit kann eine optimale Zuflusssteuerung des Parkhauses bewirkt werden.

6.1.1 Versuchsdurchführung

Am 22.09.2015 wurden während eines Fußballspiels gemeinsam mit der Zentralstelle Verkehrsmanagement der Stadt München (ZVM) und der Autobahndirektion Südbayern Testfahrten in einem Versuchsträger durchgeführt. Folgender Versuchsaufbau wurde dabei getestet:

- Das Navigationssystem des Versuchsträgers wurde an das in Kapitel 5.4 geschilderte Routingsystem angeschlossen.
- Die Verkehrsmanagementanlage der Autobahndirektion Südbayern kommunizierte die Schildstellungen der Wechselverkehrszeichen live an das Routingsystem.
- Die ZVM war in der Lage die Beschilderung remote zwischen den Anfahrstrategien via A9 und A92 umzustellen.

Der Ausgangspunkt der Testfahrten lag in Neufahrn bei Freising, sodass das serienmäßige Navigationssystem des Testfahrzeuges zunächst die Anfahrt zur Allianz Arena über die A9 vorgeschlagen sollte. Anschließend wurde die Strategie zur Anfahrt über die A92 aktiviert. Erwartet wurde, dass dies zu einer Änderung der Route über die A92 führt, sodass das Parkhaus über den nördlichen Anschluss der Arena an der A99 angefahren wird. Eine anschließende Aktivierung der Strategie zur Anfahrt über die A9 sollte wiederum für die gewünschte Anfahrt sorgen.

6.1.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse wurden zunächst visuell mit dem erwarteten Ergebnis abgeglichen. Im Nachgang zu den Testfahrten, wurde über Log-Files das korrekte Verhalten des Systems bestätigt. Nach der Aktivierung der Routenführung wurde erwartungsgemäß zunächst die Route über die A9 vorgeschlagen. Das Navigationssystem schickte diese Route anschließend zur Überprüfung an das Routingsystem. Dieses erkannte die Wirksamkeit der zuvor übermittelten Strategie und schickte daraufhin einen Alternativ-Routenvorschlag an den Versuchsträger (vgl. Abbildung 6.2).

Der Routenvorschlag konnte im Fahrzeug übernommen werden und die Zielführung wählte den Weg über die A92 (vgl. Abbildung 6.3).

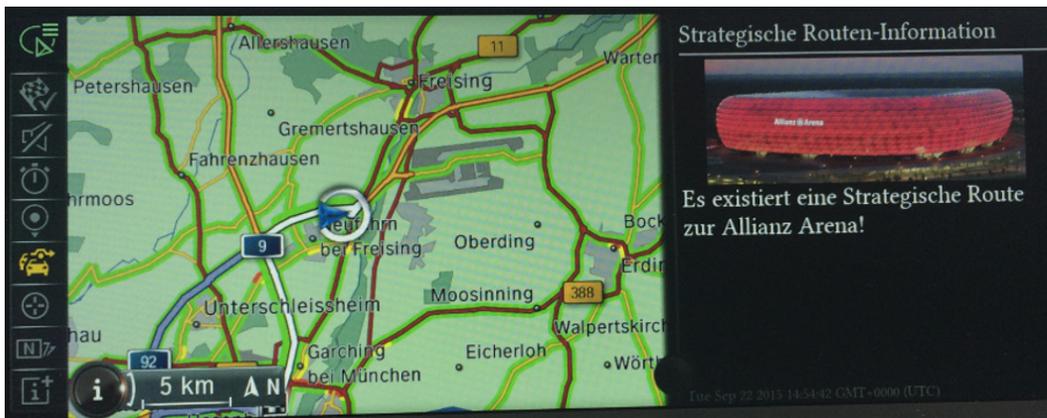


Abbildung 6.2: Vorschlag der Strategischen Route im Navigationssystem des Versuchsträgers

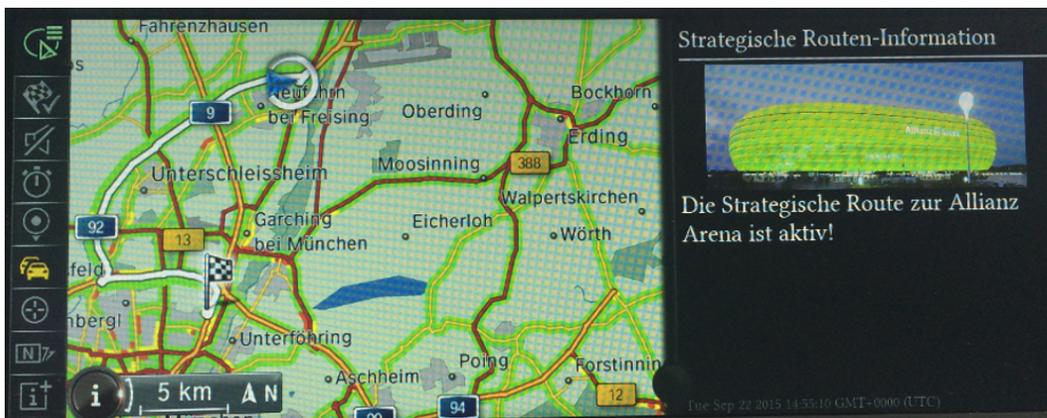


Abbildung 6.3: Die übernommene Strategische Route

Anschließend wurde die strategische Empfehlung verändert auf die Anreise über die A9. Die Meldung der Autobahndirektion wurde von dem Server korrekt verarbeitet. Bei der erneuten automatischen Anfrage des Fahrzeuges wurde die aktuelle Route des Fahrzeuges auf die Wirksamkeit einer Strategie überprüft. Aufgrund der nun veränderten Empfehlung wurde dem Fahrzeug wiederum die Anfahrt über die A9 empfohlen. Auch dieses Mal konnte die Route fehlerfrei ins Navigationssystem übernommen werden. Der Versuch hat gezeigt, dass die Kommunikation des entwickelten Routing-Servers, sowohl mit einem Strategie-Provider, als auch mit dem Fahrzeug funktioniert. Die Verarbeitung der Anfragen war fehlerfrei und der Algorithmus zur Berechnung der strategischen Route lieferte das gewünschte Ergebnis.

6.2 Strategievalidierung im Testfeld Düsseldorf

Bei der Verwendung von Strategischen Routen stellt sich – ebenso wie bei allen anderen Verkehrsinformationen – die Frage zur Qualität dieser Informationen. Zur Qualitätssicherung von Verkehrsinformationen werden unter anderem FCD verwendet (vgl. Kapitel 2.8). Moderne Autos senden zyklisch Informationen über ihre aktuelle Position und Geschwindigkeit an einen Server. Anhand dieser Informationen können Verkehrsinformationen, wie beispielsweise Staus, validiert werden. Hat sich die durchschnittliche Geschwindigkeit in einem Stau verändert, so kann die erwartete Stauzeit angepasst werden oder die Staumeldung vollständig aufgelöst werden. Die Qualitätssicherung bei Strategien ist nicht trivial. Strategien sollen die Möglichkeit der proaktiven Verkehrssteuerung bieten. Dazu ist es notwendig, Verkehrsteilnehmer frühzeitig auf Umfahrrouten zu schicken, das heißt ein Verkehrsteilnehmer muss – auch unter Berücksichtigung von aktuellen FCD – auf eine vermeintlich längere Route gesendet werden. Nur so ist es möglich, Staus proaktiv zu vermeiden. Eine Plausibilisierung einer Route nur auf Basis von FCD-Daten ist also nicht möglich.

Nach Kapitel 5.2 legen Verkehrsteilnehmer einen sehr hohen Wert auf eine möglichst schnelle Zielerreichung. Daher wird zur Qualitätssicherung ein Schwellwert festgelegt, um welchen die Differenz der Reisezeit zwischen Strategischer Route und schnellster Route maximal abweichen darf. Dieser Schwellwert soll aber nicht durch einen absoluten Wert begrenzt werden, da somit eine sinnvolle Anwendung von Strategien stark begrenzt würde. Die Strategien werden bewusst durch Verkehrsbetreiber erstellt, um von deren lokalem Wissen zu profitieren. Da dieses lokale Wissen auf der Seite des Navigationsdienstleisters nicht zur Verfügung steht, muss ein gewisses Vertrauensverhältnis erreicht werden. Der Navigationsdienstleister muss davon ausgehen können, dass die Strategien sinnvoll erstellt worden sind. Der Verkehrsbetreiber muss darauf vertrauen können, dass die Strategien in die Navigation einfließen. Ein Vertrauensverhältnis wird durch vergangene Erfahrungen – je nach Erlebnis - gestärkt oder geschwächt. Um die Größe „Vertrauen“ auch bei der Strategiebewertung einfließen zu lassen, sind Strategien retropektiv zu bewerten. Strategien, welche einen positiven Einfluss auf den jeweiligen Verkehrsteilnehmer hatten, stärken das Vertrauen, negative Einflüsse schwächen das Vertrauen. Im Folgenden werden die aufgestellten Metriken zur Qualitätssicherung beschrieben.

6.2.1 Bewertung der Strategie mit XFCD-Informationen

Die im Projekt dMotion (vgl. Kapitel 2.3) erstellten Strategien wurden zur Einbindung in den in dieser Arbeit entwickelten Prototypen als live-Feed zur Verfügung gestellt. Die Stadt Düsseldorf verwendet zur Validierung der Strategien Detektoren und Videokameras. Auf Basis der gemessenen Werte wird entschieden, welche Strategien aktiviert werden. Abbildung 6.4 zeigt die Verteilung der Detektoren und Kameras über das Innenstadtgebiet der Stadt Düsseldorf.



Abbildung 6.4: Verteilung von Detektoren im Stadtgebiet Düsseldorf

Zusätzlich wurden von BMW XFCD-Daten für Düsseldorf zur Verfügung gestellt. Die XFCD-Daten von BMW fließen nicht in die Strategie-Entscheidung der Stadt Düsseldorf ein. Daher eignen sich diese Daten zur Bewertung der Qualität der geschalteten Strategien. Exemplarisch wird an dieser Stelle die Bewertung der Strategie 271378101377 für die abendliche Spitzenstunde des 10.09.2013 dargestellt.

Abbildung 6.5 zeigt die untersuchte Strategie. Die normale Route führt auf direktem Wege durch Niederkassel über den Rhein (vgl. rote Route). Bei Überlastung dieser Route (insbesondere der Rheinbrücke), wird die Strategie aktiviert und leitet die Verkehrsteilnehmer südlich über die Rheinkniebrücke und dann entlang des Rheinuferes nach Norden (vgl. grüne Route). Die normale Route hat im freien Fluss eine Reisezeit von etwa 6 Minuten bei einer Strecke von 5,7 km. Die Umfahrroute hingegen weist bei freiem Fluss mit ca. 12 Minuten die doppelte Reisezeit und eine Länge von 8,9 km auf. Ohne Betrachtung eines akzeptablen Schwellwertes muss aufgrund des Längenunterschieds die Geschwindigkeit auf der Umfahrroute gut 1,5-mal schneller sein, als auf der Hauptroute.

Abbildung 6.6 veranschaulicht die korrespondierenden Detektorwerte, welche zur Aktivierung und Deaktivierung der Strategie geführt haben. Detektoren auf der Umfahrroute sind in lila- und rosafarbenen Töne dargestellt, die Messungen auf der Hauptroute in gelb, grün und blau. Wie deutlich zu erkennen

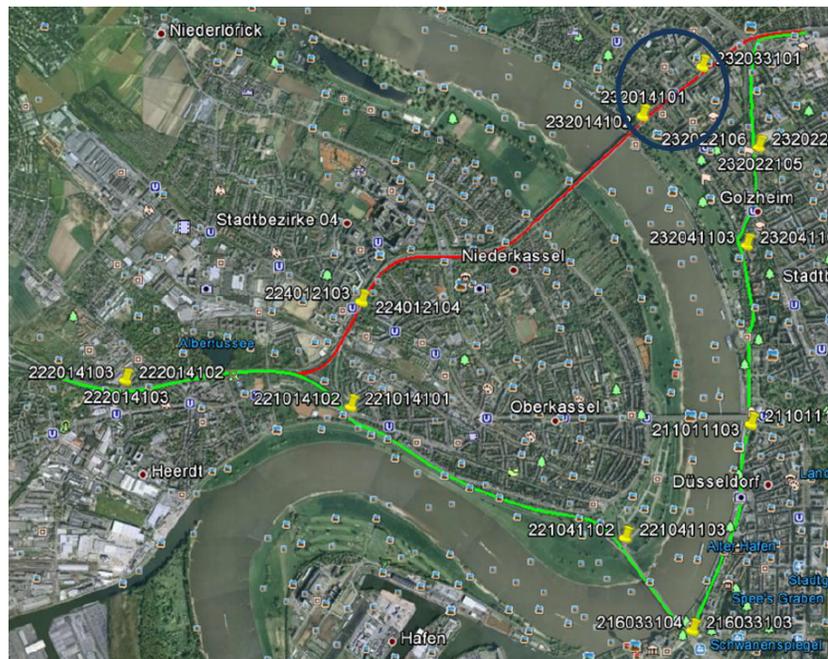


Abbildung 6.5: dMotion Strategie 271378101377

ist, bleiben die Geschwindigkeitswerte auf der Alternativroute zu jeder Zeit auf einem ähnlichen Niveau, je nach Position des Detektors zwischen 70 km/h und 90 km/h. Auf der Hauptroute hingegen kann ab ca. 17:50 Uhr ein signifikanter Abfall der Geschwindigkeit auf einen Bereich von 20-30 km/h verzeichnet werden. Dieser führt dazu, dass die Stadt Düsseldorf um ca. 18:20 Uhr die Strategie über die Alternativroute aktiviert. Ab ca. 21:00 Uhr normalisiert sich die Geschwindigkeit auf der Hauptroute wieder. Die Deaktivierung der Strategie geschieht ca. gegen 20:40 Uhr.

Zur Qualitätsanalyse werden die Messungen und Aktivierungszeitpunkte der Stadt Düsseldorf mit den FCD-Daten von BMW verglichen. Abbildung 6.7 zeigt die auf den FCD basierenden Geschwindigkeiten auf der Hauptroute (rot) und auf der Alternativroute (grün). Die vertikalen Linien symbolisieren wiederum den Aktivierungs- bzw. Deaktivierungszeitpunkt der Strategie. Auch diese Geschwindigkeitswerte weisen einen deutlichen Abfall der Geschwindigkeit auf. Dieser wird durch die FCD-Daten allerdings erst später, ab ca. 18:40 Uhr ersichtlich, also kurz nach Aktivierungszeitpunkt der Strategie. Dies ist auf zwei Phänomene zurückzuführen: Zum einen unterliegen die FCD-Meldungen einer gewissen Meldungsverzögerung, da die Daten erst kommuniziert werden, wenn eine ungewöhnliche Veränderung der Geschwindigkeit festgestellt wird. Des Weiteren wurden in dieser Darstellung die Geschwindigkeiten über die gesamte Reisezeit der jeweiligen Route gemittelt. Die Detektorenwerte beziehen sich

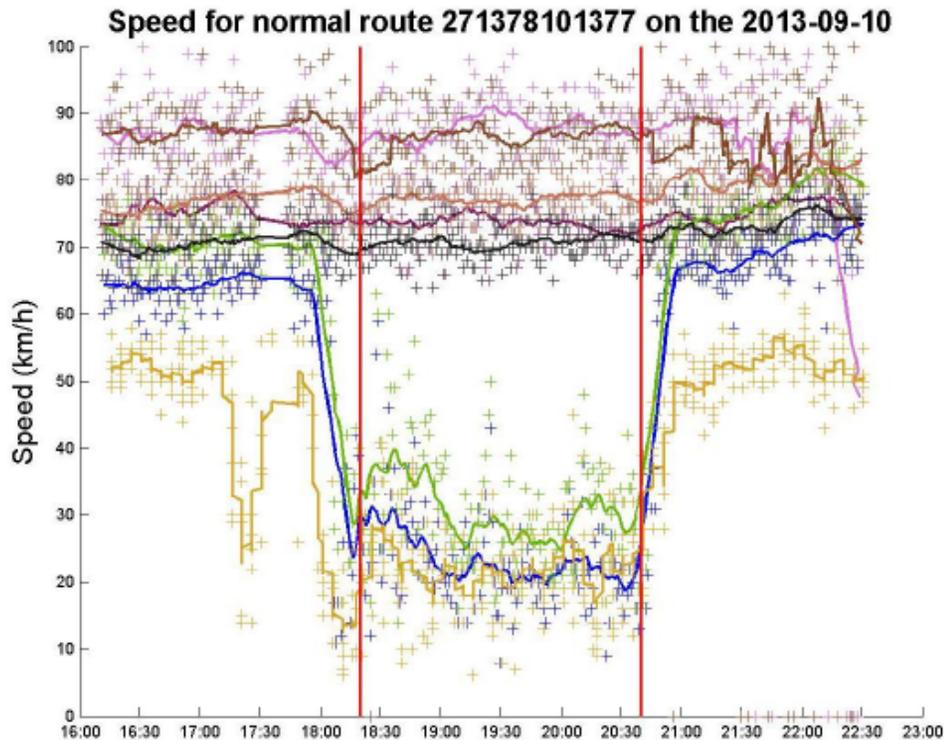


Abbildung 6.6: Geschwindigkeitsmessungen der betroffenen Detektoren

hingegen auf den exakten Registrierungszeitpunkt. Ebenfalls ist bei Vergleich der beiden Darstellungen ersichtlich, dass die Geschwindigkeitswerte vor allem auf der Hauptroute bei den Werten der Detektoren deutlich über den Werten der FCD-Daten liegen. Auch dies lässt sich über die Momentaufnahmen der Detektoren begründen. Diese weisen – je nach Lage – deutlich höhere Werte auf, als die Durchschnittsgeschwindigkeit auf der Route. Zur Validierung bietet die Durchschnittsgeschwindigkeit aussagekräftigere Werte.

Bei der Betrachtung der FCD-Geschwindigkeiten wird deutlich, dass die Geschwindigkeiten auf der Hauptroute während des Aktivierungszeitraumes der Strategie in der Tat meist deutlich unter den Geschwindigkeiten auf der Alternativroute liegen. Mit Ausnahme eines kurzen Zeitraums gegen 19:30 Uhr, größtenteils sogar im Bereich der geforderten 1,5-fachen Geschwindigkeit. Die Deaktivierung der Strategie hätte etwas früher erfolgen können, da die Geschwindigkeiten bereits ab ca. 20:30 Uhr auf ein ähnliches Niveau auf beiden Routen zurück gefallen ist. Insgesamt ist die Schaltung der Strategie aber positiv zu bewerten, vor allem vor dem Hintergrund, dass sie eine weitere Verschlechterung auf der Hauptroute verhindert hat. Das lokale Wissen der städtischen Verwaltung wird insbesondere durch die Wahl der Alternativroute widerspiegelt. Die Alternativroute

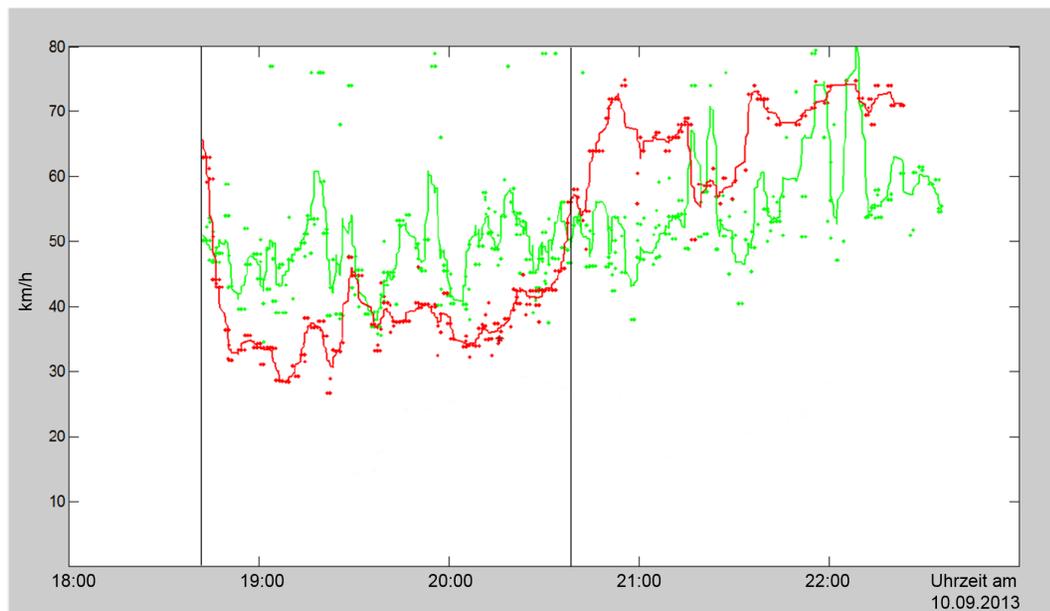


Abbildung 6.7: Durch FCD ermittelte Geschwindigkeiten

verfügt über ausreichend Restkapazitäten, sodass trotz der Mehrbelastung die Geschwindigkeiten auf dieser Route stets stabil blieben.

Um diese Beobachtungen zu quantifizieren, wurden im Minutenraster Reisezeiten auf der Hauptroute und der Nebenroute berechnet. Unter Berücksichtigung eines zunächst festen relativen Schwellwertes von 10% der Reisezeit auf der Hauptroute, ergibt sich ein Erfolgsfaktor von 0,55. Damit war bei 55% der Messungen die durchschnittliche Reisezeit auf der strategischen Alternativroute maximal 10% langsamer, als die Reisezeit auf der Hauptroute.

6.2.2 Bildung einer Vertrauensbewertung

Die Abbildung von Vertrauen in einem Algorithmus wurde bereits für unterschiedliche Anwendungsfälle durchgeführt. Der Eigentrust-Algorithmus wurde ursprünglich konzipiert, um das Vertrauen in einen Netzwerkknoten auf Basis von erfolgreichen und nicht erfolgreichen Verbindungsversuchen zu bewerten [Kamvar u. a., 2003]. Hierzu werden die Bewertungen der Strategie i je Messung m in erfolgreiche Bewertungen $sat(i, m)$ und nicht erfolgreiche Bewertungen $unsat(i, m)$ aufgeteilt. $s_{im} = sat(i, m) - unsat(i, m)$ stellt dabei die Differenz zwischen erfolgreichen und nicht erfolgreichen Versuchen dar. Der Vertrauensindex wird definiert

als der über alle Messungen normalisierte Wert:

$$c_i = \frac{\max(s_{i,m}, 0)}{\sum_m 1} \quad (6.1)$$

Auf Basis dieses Vertrauenindex wird ein Schwellwert definiert, welcher aus dem maximalen zusätzlichen Zeitaufwand x_{max} und dem Vertrauensindex c_i berechnet wird. Der Zeitaufwand wird dabei in Relation zur Reisezeit der Hauptroute t_{HR} gesetzt.

$$S = c_i \cdot x_{max} = c_i \cdot x_{rel} \cdot t_{HR} \quad (6.2)$$

Für die Implementierung wurde ein relativer Wert von 10% für den maximalen Zeitaufwand gewählt x_{rel} .

6.2.3 Konsequenzen aus der Strategie-Bewertung

Die Anwendung dieser Metrik zeigt je Strategien sehr unterschiedliche Ergebnisse. Im Testfeld wurden Strategien ermittelt, welche zu keiner Zeit ein besseres Ergebnis lieferten, als die Hauptroute. Hieraus entstand ein Schwellwert von 0, so dass die Strategie zu keiner Zeit akzeptiert wurde. Andere Strategien konnten Schwellwerte über 5 Minuten aufbauen und haben somit erfolgreich aufs Routing Einfluss genommen. Die Bewertung einer Strategie über einen harten Schwellwert bildet einen relativ regressiven Ansatz. Das allgemeine Problem bei der Bewertung von Strategien besteht darin, dass die Situation, die ohne die Schaltung der Strategie eingetreten wäre, nicht berücksichtigt werden kann. Daher müsste ein Strategie-Provider bei diesem Ansatz ein eher defensives Verhalten beim Schalten der Strategie verfolgen, um keine schlechten Bewertungen zu erhalten. Dies widerspricht gewissermaßen dem gewünschten proaktiven Verhalten bei der Schaltung von Strategien. Die Einführung des Vertrauenindex schwächt diese Problematik ab, da bei aufgebautem Vertrauen auch höhere Schwellwerte zugelassen werden können.

6.3 Anwendung allgemeingültiger Strategien

Im Folgenden werden einige Beispiele für allgemeingültige Strategien aufgezeigt.

6.3.1 Zusatzinformationen zu bestehenden Verkehrsinformationen

Die kommunizierbaren Verkehrsinformationen werden im Wesentlichen durch das verwendete Format und die kundenseitige Implementierung beschränkt. Informationen, die nicht in dem gewählten Austauschformat abgebildet werden können, müssen verworfen werden. Informationen, welche vom Kunden - z. B. dem Fahrzeug - nicht ausgewertet werden, erreichen den Fahrer nicht. Der für das Strategische Routing gewählte Aufbau mit einem serverseitigen Router kann bei den Einschränkungen entgegenwirken. Der Kunde erhält in diesem Fall die schon berechnete Route, in der beliebige Informationen bereits berücksichtigt werden können. Auch beim Austauschformat kann flexibler agiert werden, da die Schnittstellen einer Serverapplikation nicht so starr sind, wie die Fahrzeugschnittstelle. Durch die allgemeingültigen Strategien ist es möglich, die in Kapitel 5.1 genannten positiven Maßnahmen zu kommunizieren, um den Verkehr auf Strecken mit ausreichend Restkapazitäten umzuleiten.

Abbildung 6.8 zeigt eine beispielhafte Anwendung einer allgemeingültigen Strategie. Die schnellste Route (blau) führt von der A95 über den mittleren Ring zum Hirschgarten in München. Da der mittlere Ring über keine Restkapazitäten verfügt, wurde eine grüne Welle auf der Fürstenrieder Straße (gelb) geschaltet und als Strategie kommuniziert. Für Fahrbeziehungen, die von dieser Strategie profitieren, wird nun eine Strategische Route verwendet (grün). So ist es möglich, einen Teil des Verkehrs von dem mittleren Ring auf eine Ausweichroute mit genügend Restkapazitäten zu leiten und so proaktiv einen Stau auf dem mittleren Ring zu verhindern. Neben den genannten positiven Maßnahmen existieren auch einige negative, die nicht von üblichen Navigationssystemen ausgewertet werden können. Hierzu zählen vor allem die Modifikation von Abbiegeverboten oder Fahrtrichtungen. Diese Informationen können durch das Strategische Routing berücksichtigt werden.

Durch die in Navigationsgeräten häufig verwendete Georeferenzierung über TMC ist es nicht möglich, Verkehrsinformationen außerhalb dieses Vorrangnetzes zu kommunizieren. Natürlich treten auf dem untergeordneten Netz auch nur selten Verkehrsstörungen auf, allerdings sind beispielsweise Straßensperrungen Informationen, die einen signifikanten Einfluss auf die Routenwahl haben. Durch

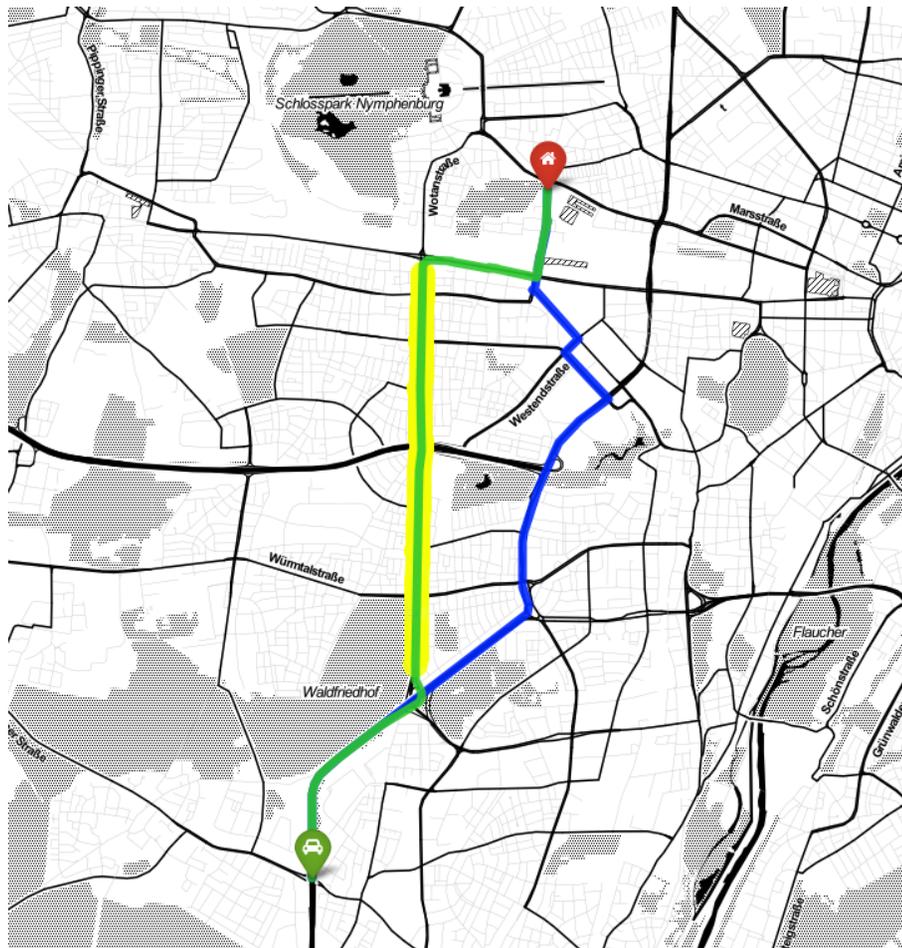


Abbildung 6.8: Anwendungsbeispiel für eine allgemeingültige Strategie

das Strategische Routing und die gewählte Referenzierungsart OpenLR (vgl. Kapitel 5.6.3) ist es möglich, Verkehrsinformationen auf beliebigen Straßen zu berücksichtigen.

6.3.2 Vorzugsnetze

Einige Städte definieren Vorzugsnetze, auf denen der Verkehr vorrangig abgewickelt werden soll. Meist sind dies Straßen mit den höchsten Straßenkategorien und werden daher auch im Navigationssystem priorisiert. Die Stadt München hat in ihrem Verkehrsentwicklungsplan [[Landeshauptstadt München, Referat für Stadtplanung und Bauordnung, 2005](#)] die in Abbildung 6.9 dargestellten "Roten Routen" definiert. Diese Routen sollen genutzt werden, um einen Großteil der

Verkehrsstärke abzuwickeln. Um eine ausreichende Leistungsfähigkeit dieser Strecken zu gewährleisten, wurden gleichzeitig diverse infrastrukturelle Maßnahmen definiert, um die Kapazität der Strecken zu erhöhen.

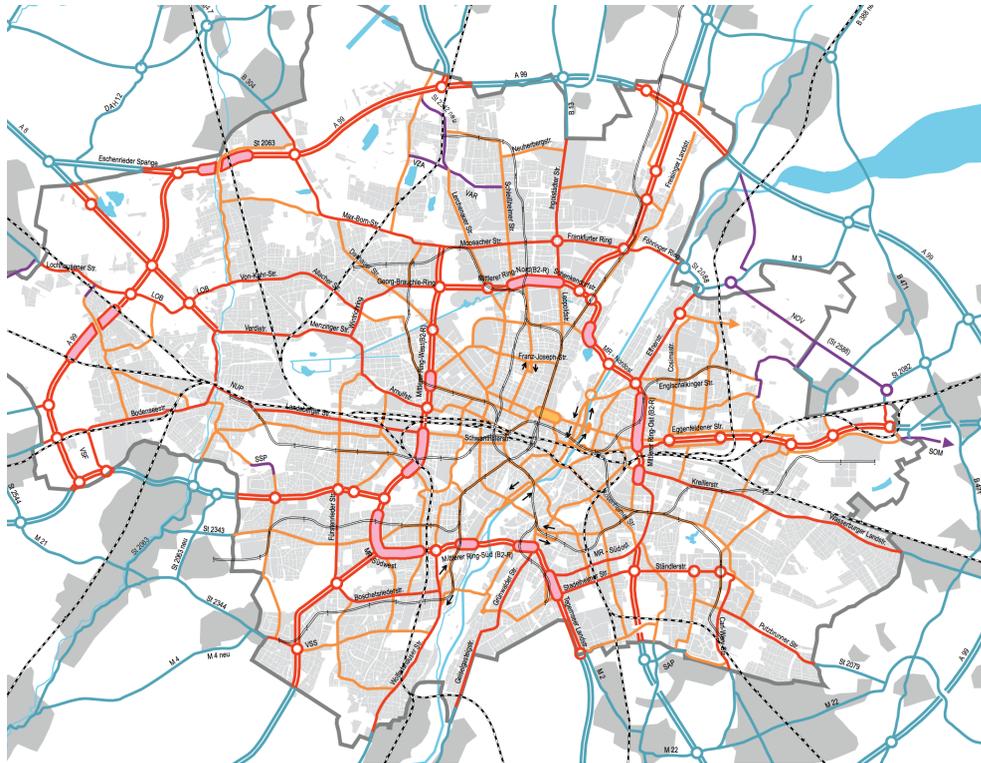


Abbildung 6.9: Rote Routen der Stadt München [Landeshauptstadt München, Referat für Stadtplanung und Bauordnung, 2005]

Da diese Vorzugsnetze bei der Erstellung der digitalen Karte allerdings nicht immer berücksichtigt werden, entstehen kleine Abweichungen zur Definition der Kanten im Navigationssystem. Auch wenn sich die Bedeutung einer Straße verändert, beispielsweise durch einen Rückbau, kann dies im Navigationssystem nicht berücksichtigt werden. Über die Strategischen Routen ist es einem Verkehrsbetreiber möglich, Einfluss auf die Bedeutung der Straßen für die Routenwahl zu nehmen. Strategische Routen werden beim Levelswitching (vgl. Kapitel 3.1.3) immer auf das höchste Level gehoben, also immer als Alternative in Betracht gezogen. Somit ist es möglich, Straßen, die im Navigationssystem mit niedriger Priorität abgebildet wurden, trotzdem bei der Routensuche zu berücksichtigen. Durch Kommunikation einer verringerten Geschwindigkeit ist auch der gegenteilige Fall abbildbar. Hat eine Straße an Priorität verloren, geht dies auch meist mit der Reduktion der erlaubten Geschwindigkeit einher. Wird diese neue Geschwindigkeit als Strategie kommuniziert, wird die Straße bei der Routensuche eher gemieden.

6.3.3 Informationen für besondere Flotten

Ein weiterer Vorteil des Strategischen Routings ist gegeben, da es sich um individuelle und nicht um kollektive Verkehrsinformationen handelt. Dies bedeutet, dass die Verkehrsinformationen nicht für alle Verkehrsteilnehmer identisch kommuniziert werden, sondern abhängig von Fahrzeug oder Fahrtinformationen individuell vergeben werden können.

Ein Beispiel für fahrzeugspezifische Eigenschaften, die bei der Routenwahl ausschlaggebend sind, bildet beispielsweise die Antriebsart. In vielen deutschen Städten existieren Umweltzonen, die nicht von älteren Fahrzeugen befahren werden dürfen. Sollte das Ziel außerhalb dieser Umweltzone liegen, ist eine umfahrende Routenplanung notwendig. Die Stadt London hat ein Fahrverbot (gegen Gebühr auflösbar) für alle Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor erlassen [Transport for London, 2017]. Elektrofahrzeuge dürfen hingegen weiterhin ins Stadtgebiet, so dass sich auch für London spezielle Routen für diese Art von Fahrzeugen ergeben.

Teilweise existieren Fahrzeugflotten, die über besondere Berechtigungen verfügen. So dürfen Taxifahrer beispielsweise häufig Busspuren mitverwenden und können auf diesen Fahrstreifen signifikant schneller fahren, als auf den normalen Fahrstreifen. Für große Sportveranstaltungen wie die Olympischen Spiele werden teilweise extra Fahrstreifen für die Fahrzeuge eingerichtet, die Sportler und Funktionäre transportieren.



Abbildung 6.10: Fahrstreifen für die Olympische Flotte in London [MGN Ltd., 2011]

Abbildung 6.10 zeigt die für die Olympischen Spiele in London eingerichtete Bus- und Olympic Lane. Wird den Fahrzeugen einer bevorrechtigten Flotte ein Strategisches Routing zur Verfügung gestellt, so können speziell für diese Fahrzeuge geltende Regeln bei der Routensuche berücksichtigt werden, ohne ein eigenes Navigationssystem entwickeln zu müssen. Abbildung 6.11 zeigt eine Route über die Olympic Routes, welche augenscheinlich deutlich länger ist, als die kürzeste Route. Durch die Verwendung der freigehaltenen Fahrstreifen kann auf dieser Route jedoch eine deutlich höhere Geschwindigkeit gefahren werden und somit eine insgesamt kürzere Reisezeit erreicht werden.

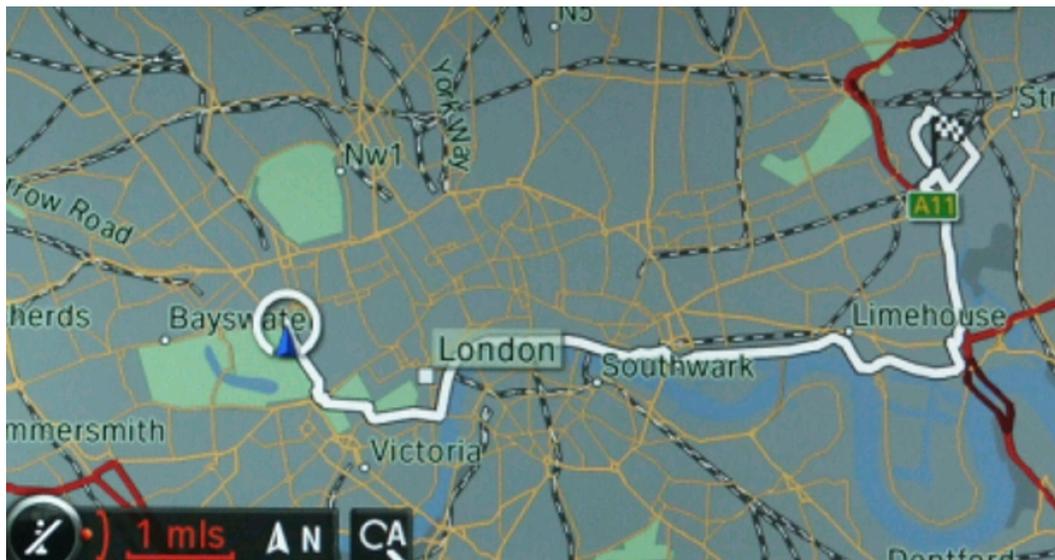


Abbildung 6.11: Adaption der Olympic Route in einem BMW-Navigationssystem

6.4 Erkenntnisse aus den Testfeldern

Die Anwendung am Beispiel der Allianz Arena zeigte, dass der implementierte Demonstrator für Strategische Routen in einem Prototyp funktioniert. Die gesamte Prozesskette von Empfang der Strategien über die Verarbeitung dieser bis zur Anzeige im Fahrzeug konnte abgebildet werden.

Auch die Anwendbarkeit der allgemeingültigen Strategien konnten an einem exemplarischen Beispiel nachgewiesen werden.

Durch die Kombination von realen Strategien und Echtzeit XFCD-Daten konnte am Testfeld Düsseldorf eine Metrik für die Qualitätsbewertung ermittelt werden. Dabei konnten sowohl wirksame, als auch optimierungsfähige Strategien ermittelt werden.

Zusammenfassend wurde festgestellt, dass der erstellte Demonstrator in allen Bereichen funktioniert und das Zusammenspiel mit städtischen Verwaltungen erreicht werden konnte. Offen bleibt die Frage nach der Auswirkung des Strategischen Routings auf ein Gesamtnetz. Diese Fragestellung wird im folgenden Kapitel untersucht.

7 Verkehrsflusssimulation

Die technische Funktionalität des entwickelten Routingsystems wurde für mehrere aktuelle Testfelder gezeigt. Allerdings wurde bei diesen Untersuchungen jeweils nur die Funktionalität für ein individuelles Fahrzeug betrachtet. Um einen Nutzen für das Gesamtsystem nachzuweisen, muss zunächst ein Schwellwert der Ausstattungsrate erreicht werden, welcher überhaupt erst eine messbare Veränderung des Systems bewirkt. Oder anders ausgedrückt, so lange nur sehr wenig ausgerüstete Fahrzeuge existieren, ist eine signifikante Veränderung des Gesamtsystems nicht zu erwarten. Die Höhe des Schwellwerts dieser Ausstattungsrate lässt sich mit Realversuchen nicht ermitteln, da es nahe liegt, dass hierzu sehr viele Versuchsträger benötigt würden. Der Aufwand eines solchen Versuches würde den Nutzen bei weitem übersteigen. Daher sollen die Untersuchungen hinsichtlich des Systemverhaltens mithilfe einer Verkehrssimulation ermittelt werden. Dabei soll vor allem die Fragestellung im Mittelpunkt stehen, inwiefern sich das Re-Routing einzelner Fahrzeuge auf das Gesamtsystem auswirkt.

Es wird vermutet, dass sich auch für das Gesamtsystem zunächst positive Auswirkungen ergeben. Die Verkehrssimulationen werden in zwei Untersuchungen unterteilt. Im ersten Schritt werden die Auswirkungen der Ausstattungsraten verschiedener Technologien untersucht. Hierzu werden die Verkehrsteilnehmer in Gruppen unterschiedlich ausgestatteter Fahrzeuge unterteilt. Mit verschiedenen Ausstattungsraten der Gruppen wird der Einfluss aufeinander simuliert. Dies geschieht zunächst auf Basis eines einfachen, künstlichen Straßennetzes, um viele unterschiedliche Szenarien simulieren zu können. Anschließend werden die aus dieser Simulation gewonnenen Erkenntnisse auf ein komplexes, reales Straßennetz der Stadt Hannover übertragen, um die Auswirkungen auf eine reale Situation zu untersuchen.

7.1 Grundlagen der Verkehrsflusssimulation

Zur Abbildung des Verkehrsgeschehens in einem Modell können unterschiedliche Verfahren verwendet werden. Ihnen allen ist gemein, dass die Realität über ein Netzmodell bestehend aus Straßenkanten und Knotenpunkten digital abgebildet wird. Versorgt werden diese Netzmodelle mit einer Verkehrsnachfrage gegliedert nach Start-Zielbeziehungen (Origin-Destination), meist abgebildet in einer O-D-Matrix. Auf diese versorgten Netzmodelle können anschließend unterschiedliche Verkehrsflussmodelle angewendet werden. Die bekanntesten Modelle stellen dabei die makroskopische, die mesoskopische und die mikroskopische Verkehrsflussmodelle dar.

Die ersten makroskopischen Modellierungen wurden auf Basis von kinematischen Wellen in Flüssen auf das Straßennetz übertragen und beruhen daher auf der

Kontinuitätsgleichung mit einer dichteabhängigen Gleichgewichtsgeschwindigkeit [Lighthill u. Whitham, 1955]. Über die Jahre wurde die makroskopische Modellierung weiterentwickelt, um auch den Verkehrsdruck [Payne, 1971] oder verbesserte Bewegungsmodelle [Kühne, 1991] zu berücksichtigen. Makroskopische Modelle zeichnen sich dadurch aus, dass sie einfach genug sind, um größere Straßennetze in Echtzeit simulieren zu können, aber gleichzeitig über ausreichend Komplexität verfügen, um die wichtigsten Verkehrskenngrößen simulieren zu können und hieraus weitere Informationen wie beispielsweise Reisezeiten, Lärm- oder Abgasemissionen abschätzen zu können [Kemper, 2006].

Mikroskopische Verkehrsflussmodelle simulieren im Gegensatz zu den makroskopischen Modellen Einzelfahrzeuge und ermöglichen somit Rückschlüsse auf individuelle Verkehrsteilnehmer und die unterschiedliche Attributierung von Fahrzeugen. Die Anfänge von mikroskopischen Modellen bildeten Fahrzeugfolgemodelle [Reuschel, 1950]. Diese Folgemodelle wurden stetig weiterentwickelt, um immer komplexere Randbedingungen (z. B. Antriebstechnik, Wahrnehmungsvermögen und Fahrerverhalten) berücksichtigen zu können. Wiedemann [1974] hat ein komplexes Interaktionsmodell entwickelt, dessen Grundlagen auch heute noch Verwendung in modernen Verkehrsflusssimulationen finden [TSS - Transport Simulation Systems, 2010]. Die mesoskopischen Verkehrsmodelle bilden eine Zwischenstufe zwischen den makroskopischen und mikroskopischen Modellen, bei welcher zwar Einzelfahrzeuge simuliert werden, das Verhalten der Fahrzeuge wird aber vereinfacht, durch Basis makroskopischer Gleichungen, beschrieben [Daganzo, 1994].

7.2 Verkehrsflusssimulationssoftware

Es existieren bereits diverse professionelle, zum Teil kommerzielle Applikationen, um Verkehrsflusssimulationen durchzuführen. Bei der Entwicklung einer eigenen Komponente müssten sehr viele und komplexe Methoden, Visualisierungen und Algorithmen implementiert werden. Daher wird auf eine existierende Lösung zurückgegriffen. Um die Auswahl einer geeigneten Software treffen zu können, muss zunächst eine der genannten Simulationenmethoden festgelegt werden. Folgende Rahmenbedingungen sollen bei einer Simulation ermöglicht werden:

1. Einteilung der Fahrzeuge in Gruppen von Fahrzeugen mit unterschiedlichen Ausstattungen.
2. Variation der Ausstattungsraten.
3. Beeinflussung von Routenentscheidungen einzelner Fahrzeuge zur Laufzeit der Simulation.

4. Auswertung der Reisezeiten aller Fahrzeuge, sowie einzelner Fahrzeuggruppen.
5. Integration eines realen Straßennetzes.

Da bei der Simulation diverse Attribute von Fahrzeugen verändert werden sollen, sowie die Interaktion der Fahrzeuge untereinander, vor allem in Form von Kapazitätsbeeinflussung an Knotenpunkten, untersucht werden soll, ist die Anwendung eines makroskopischen oder mesoskopischen Modells nicht ausreichend. Es wird daher eine mikroskopische Verkehrsflusssimulation durchgeführt. Zu den bekanntesten mikroskopischen Verkehrsflusssimulationsanwendungen gehören Aimsun von der Firma TSS, Vissim von der Firma PTV oder Sumo vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). Alle drei genannten Programme besitzen die Möglichkeit über APIs die Steuerung diverser Funktionen, eingeschlossen der Routenwahl, vorzunehmen. Die Entscheidung für die Software Aimsun wurde sehr pragmatisch gefällt. Es existierte bereits ein Netz der Stadt Hannover mit der Abbildung des realen Straßennetzes, sowie Eingangsdaten für die Quelle-Ziel-Beziehung der Fahrzeuge, welches vom Institut für Verkehr und Stadtbauwesen (IVS) der TU Braunschweig zur Verfügung gestellt wurde.

7.3 Simulation mit einem künstlichen Straßennetz

Diverse Untersuchungen beschäftigten sich bereits mit der Fragestellung, ob Routen, die von einer zentralen Stelle berechnet werden, einen positiven Einfluss auf das Gesamtsystem bewirken. Kim [2016] untersuchte, unter Verwendung einer Verkehrsflusssimulation, den Einfluss auf das Gesamtsystem beim Übergang von Verkehrsteilnehmern, welche rein individuell routende Navigationssysteme verwenden, zu einer Versorgung durch eine zentrale Stelle zur Routenberechnung. Wie bei sehr vielen Untersuchungen zu diesem Thema übernimmt die zentrale Stelle dabei gleichzeitig die Aufgabe der optimierten Verkehrsflussverteilung über das Netz. Kim [2016] „bestraft“ hierzu Routen, die bereits von anderen Verkehrsteilnehmern genutzt wurden, indem die Kantengewichte für den Routingalgorithmus erhöht werden. Somit werden bereits genutzte Verkehrswege nur noch seltener genutzt und somit eine Verteilung über das gesamte Streckennetz erreicht. Unter Verwendung eines solchen Ansatzes können sehr hohe Effizienzsteigerungen im Netz erreicht werden. Liang u. Wakahara [2014] erzielte in Simulationen beispielsweise eine Reduzierung der durchschnittlichen Reisezeit im Netz um ca. 70%.

Diese Zahlen wirken zunächst sehr effektiv, allerdings wird bei vielen Untersuchungen stets die Annahme getroffen, dass die vollständige Kenntnis über die Kapazitäten des Straßennetzes vorliegt. Die Kapazität eines Straßenabschnittes kann abgeschätzt werden, wenn Kenntnisse über den Straßenquerschnitt, insbesondere die Anzahl der Fahrstreifen vorliegen. Soll die Kapazität einer Route, also mehrerer aufeinanderfolgender Straßenabschnitte, ermittelt werden, so müssen die Einflüsse der Knotenpunkte mitbetrachtet werden. An diesen Stellen im Netz ist die Bestimmung der Kapazität besonders schwierig. Diese ist unter anderem abhängig von den Verkehrsstärken der jeweiligen, zubringenden Äste. Für Knotenpunkte mit LSA ist die Kapazität zusätzlich abhängig von dem Schaltprogramm der LSA. Diese Informationen liegen nicht flächendeckend vor.

Weiterhin wird häufig die Annahme getroffen, dass alle Verkehrsteilnehmer von einer zentralen Stelle gesteuert werden und somit vollständige Kenntnis über die Routenwahl und die Möglichkeit der Beeinflussung aller Verkehrsteilnehmer vorliegt. Es ist jedoch davon auszugehen, dass im Netz stets auch Verkehrsteilnehmer existieren, die nicht beeinflusst werden können und von denen auch keine Informationen über Fahrziel und Route bereitgestellt werden.

In dieser Untersuchung wird bewusst nicht versucht, das Verkehrssystem zu optimieren. Die Untersuchungen haben die Prämisse, dass von einer zentralen Stelle einem Teil der Verkehrsteilnehmer eine Routenempfehlung ausgesprochen wird, welche zum Zeitpunkt der Ankündigung noch Restkapazitäten aufweist.

Die Kommunikation dieser Routenempfehlung geschieht kollektiv für alle angeschlossenen Verkehrsteilnehmer identisch. Die Befolgsrate der Empfehlung wird implizit über die Ausstattungsrate betrachtet.

7.3.1 Netzwerktopologie

Die Untersuchungen werden zunächst an einem kleinen, künstlichen Verkehrsnetz durchgeführt. Abbildung 7.1 zeigt das Netz im Überblick.

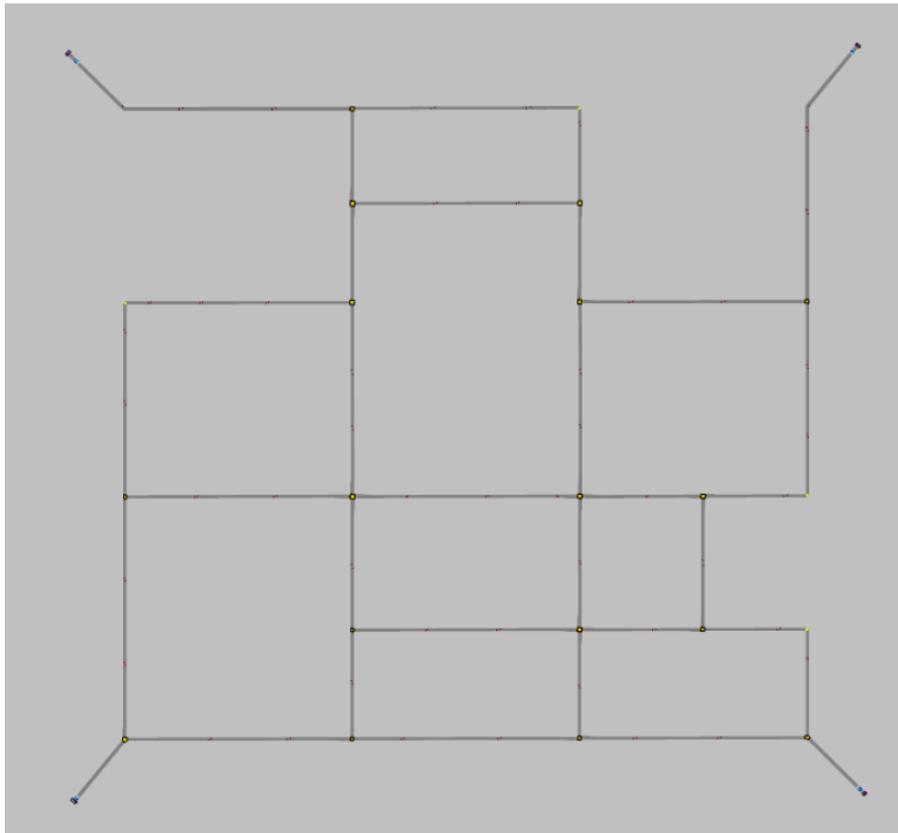


Abbildung 7.1: Verwendetes künstlich erzeugtes Straßennetz

Das rasterförmige Netz besteht aus Kanten zwischen 200 und 900 m Länge. Alle Links sind bidirektional befahrbar und verfügen über ein oder zwei Fahrstreifen je Richtung. Die Knotenpunkte sind alle mit LSA mit statischem Programm ausgestattet. Links mit einer Länge größer als 400 m sind wiederum in kleinere Abschnitte durch weitere LSA unterbrochen, um Fußgängerüberwege oder Knotenpunkte niedriger Ordnung zu modellieren. Da das Vorrangnetz einen urbanen Bereichs abbildet, wurde die Höchstgeschwindigkeit pauschal auf 50 km/h angenommen. Der Verkehr wird über vier Quellen und Senken an den jeweiligen

Extremitäten des Netzes eingespeist und aufgenommen. Dabei fließt der Verkehr jeweils zur der Quelle gegenüberliegenden Senke.

7.3.2 Verkehrserzeugung

Da das untersuchte Netz künstlich generiert wurde, können auch keine realen Verkehrsmengen auf dem Netz abgebildet werden. Nach dem ersten Wardrop'schen Prinzip [Mathew u. Rao, 2007] verteilt sich der Verkehr über ein Netz gleichmäßig, bis ein Nutzergleichgewicht erzielt wird. Dieser Zustand kann über eine dynamische Verkehrsumlegung in der Verkehrsflusssimulation erreicht werden. Hierbei führt die Software eine iterative Umlegung des Verkehrs durch, bis ein Konvergenz-Kriterium von maximal 5% Abweichung erreicht wird. Auf Basis dieser Umlegung werden OD-Matrizen für die gewählten Quellen und Senken berechnet. Die dynamische Verkehrsumlegung dient ausschließlich der Berechnung der Ausgangssituation. Anschließend wird der zentralisierte Routingdienst zugeschaltet. Gemäß des zweiten Wardrop'schen Prinzips kann durch Kooperation der Verkehrsteilnehmer untereinander ein Systemoptimum erreicht werden. Zur Abbildung einer Spitzenstunde werden die Verkehrsmengen an jeder der Quellen gemäß der in Abbildung 7.2 dargestellten Verteilung distribuiert.

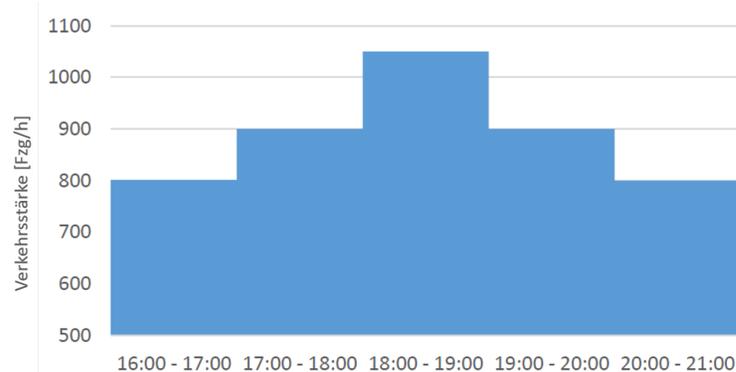


Abbildung 7.2: Zeitlich verteilte Verkehrsstärke

7.3.3 Verkehrsteilnehmer

Die Verkehrsteilnehmer werden in Gruppen unterschiedlich ausgestatteter Fahrzeuge unterteilt. Dabei werden folgende vier Verkehrsteilnehmerarten unterschieden:

- Ortskundiger Fahrer ohne Navigationssystem

- Ortsunkundiger Fahrer (schnellste Route bei freiem Fluss)
- Fahrer mit Echtzeit-Verkehrsinformationen
- Fahrer mit Strategischem Routing

Der ortskundige Fahrer kennt den typischen Verkehrszustand der Stadt zur Spitzenstunde und meidet daher reguläre Staus, wird allerdings nicht über besondere Vorkommnisse informiert. In diese Gruppe fallen auch alle Verkehrsteilnehmer, die zwar über ein Navigationssystem verfügen, dieses aber nicht verwenden. Der ortskundige Fahrer oder der Fahrer mit Navigationssystem ohne Verkehrsinformationen folgt der vermeintlich schnellsten Route. Dieses Verhalten entspricht auch dem Navigieren durch Verwendung einer Straßenkarte. Über die aktuelle Verkehrssituation ist dieser Verkehrsteilnehmer nicht informiert. Die Fahrer mit Echtzeit-Verkehrsinformationen werden regelmäßig (alle fünf Minuten) mit den aktuellen Verkehrsinformationen versorgt. Die Verkehrsteilnehmer mit Strategischem Routing erhalten ihre Routen von zentraler Stelle.

Laut [Statista GmbH \[2015\]](#) verfügen 50% der deutschen Fahrer über ein festeingebautes oder portables Navigationssystem. Für die Untersuchung werden diese 50% auf die drei Klassen mit Navigationssystemen aufgeteilt. Als Ausgangssituation entfallen somit die restlichen 50% auf die ortskundigen Fahrer. Zum Empfang von Echtzeit-Verkehrsinformationen wird ein RDS-Modul oder eine Mobilfunkverbindung benötigt. Als Vergleichsszenario wird zunächst die Ausstattungsrate des Strategischen Routings auf 0% gesetzt und sukzessive in den folgenden Szenarien gesteigert. Die Nutzer von Echtzeit-Verkehrsinformationen werden zu 20% angenommen, so dass auf die ortskundigen Fahrer, bzw. die Fahrer des schnellsten Weges, 30% der Verkehrsteilnehmer entfallen. Tabelle zeigt die gewählten Ausstattungsgrade der Verkehrsteilnehmer bei den unterschiedlichen Szenarien.

	Szenarien		
	0% Strat.	5% Strat.	10% Strat.
Ortskundige Fahrer	50%	45%	40%
Ortsunkundige Fahrer	30%	30%	30%
Echtzeitinformationen	20%	20%	20%
Strategisches Routing	-	5%	10%

	Szenarien		
	20% Strat.	25% Strat.	30% Strat.
Ortskundige Fahrer	30%	25%	20%
Ortsunkundige Fahrer	30%	30%	30%
Echtzeitinformationen	20%	20%	20%
Strategisches Routing	20%	25%	30%

Bei der Steigerung der Ausstattungsrate des Strategischen Routings wird von einer

7.3.5 Routenwahl

Die Routenwahl der einzelnen Fahrzeuge wird je nach Ausstattungsrate des Fahrzeuges von der Simulation unterschiedlich behandelt. Die Fahrzeuge, die das Strategische Routing verwenden, werden durch einen extern an das Simulationsprogramm angeschlossenen Strategischen Router versorgt. Dieser kennt die entstehenden Verkehrszustände. Dies wird erreicht indem die Simulation für diese Fahrzeuge alle 5 Minuten mit einer Vorausschau von 30 Minuten berechnet wird. Die übrigen Fahrzeuge werden durch die Routenwahl der Simulationssoftware gesteuert, erhalten jedoch jeweils keine oder nur die aktuellen Verkehrsinformationen. Die ortsunkundigen Fahrzeuge greifen auf Free-Flow-Geschwindigkeiten zurück, die ortskundigen werden durch Werte versorgt, die durch eine zuvor durchgeführte Simulation (ohne Sperrung) ermittelt wurden und die Fahrzeuge mit Echtzeitinformationen werden durch während der Simulation erhobene Reisezeiten je Straßenabschnitt versorgt.

7.3.6 Anzahl an Simulationsdurchläufen

Die Ergebnisse einer Verkehrssimulation sind abhängig von den stochastisch getroffenen Entscheidungen der Verkehrsflusssimulationssoftware. Daher werden bei verschiedenen Simulationsdurchläufen mit identischen Simulationsparametern auch leicht unterschiedliche Ergebnisse erzielt. Um sicherzustellen, dass belastbare Ergebnisse durch eine Simulation erreicht werden, müssen mehrere Simulationsläufe durchgeführt werden. Mathematisch beschreibt die Studentische *t*-Verteilung [Gosset, 1908] die Anzahl der notwendigen Simulationsdurchläufe:

$$n \geq \frac{t^2 \cdot s^2}{(l_a)^2} \quad (7.1)$$

mit:

n : Anzahl an Simulationsdurchläufe

t : *t*-Quantil der Verteilung

s^2 : Standardabweichung

l_a : Absolute Abweichung

Für ein Konfidenzniveau von 95% und 5 Simulationsdurchläufe ergibt sich das *t* – Quantil laut zu 2,571. Die Formel lässt sich umstellen zu:

$$s \leq \sqrt{\frac{n \cdot (l_a)^2}{t^2}} \quad (7.2)$$

Wird eine absolute Abweichung von +/- 2 Sekunden angenommen ergibt sich die mittlere Abweichung zu 1.73s. Bei den im Folgenden dargestellten Ergebnissen handelt es sich immer um den Mittelwert von fünf Simulationsdurchläufen.

7.3.7 Network Performance Indikator

Als den Key Performance Indikator zur Analyse eines Gesamtnetzes nennt [Transportation Association of Canada \[2006\]](#) die durchschnittliche Reisezeit der Verkehrsteilnehmer, sowie den im Gesamtnetz entstandenen Reisezeitverlust. Daher wird im Folgenden die Bewertung des Netzzustands im Wesentlichen auf diese beiden Parameter ausgerichtet. Die Betrachtung der durchschnittlichen Reisezeit wird dabei entweder auf alle Verkehrsteilnehmer oder die jeweils relevante Gruppe (beispielsweise die Fahrzeuge mit Strategischem Routing) berechnet. Die Berechnung der Werte erfolgt bereits durch die Simulationsumgebung und folgt dabei der Berechnung eines gewichteten Mittelwertes nach der Anzahl der jeweiligen Fahrzeuge, welche sich zum entsprechenden Simulationszeitpunkt im Netz befinden. Der Reisezeitverlust ist definiert als die Differenz der gemessenen Reisezeiten und der Reisezeit bei freiem Verkehrsfluss. Der Gesamtreisezeitverlust wird berechnet durch Summierung aller Reisezeitverluste über alle Fahrzeuge aller Klassen.

7.3.8 Simulationsdurchführung

Die Untersuchungen an diesem Netz sollen die Relation zwischen der Ausstattungsrate der Fahrzeuge mit dem Strategischen Routing und des Verhaltens des Gesamtverkehrsnetzes analysieren. Hierzu werden Simulationen mit den in Kapitel 7.3.3 genannten Ausstattungsgraden durchgeführt und die Ergebnisse miteinander verglichen. Ziel der Untersuchung ist es, herauszufinden, bei welchem Grad der Ausstattung ein wie hoher Profit für das Gesamtsystem entsteht und welche Fahrzeuggruppen von dieser Ausstattung profitieren. Die im Folgenden genannten Ergebnisse verstehen sich jeweils als die Mittelwerte der fünf durchgeführten Simulationsdurchläufe.

7.3.9 Simulationsergebnisse

Die Simulationen wurden, wie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, durchgeführt. In Abbildung 7.4 sind die durchschnittlichen Reisezeiten für die Szenarien mit Verkehrsteilnehmern mit und ohne Real Time Traffic Information

(RTTI) zwischen 16:30 Uhr und ca. 20:30 Uhr aufgetragen. Die angesetzte Sperrung dauert von 17:05 Uhr bis 17:25 Uhr. Deutlich zu erkennen ist der sehr starke Anstieg der Reisezeit ab ca. 17:30 Uhr. Die Reisezeitmessung erfolgt jeweils erst bei Ankunft der Verkehrsteilnehmer am Ziel, daher entsteht eine scheinbare Verschiebung der Reisezeiteffekte um etwa eine halbe Stunde. Nach Auflösung der Sperrung normalisiert sich der Verkehr wieder langsam, der Normalzustand ist erst gegen 20:30 Uhr wieder erreicht.

Gut zu erkennen ist die frühzeitige Reaktion der Fahrzeuge mit RTTI auf die Störung, da diese bereits vor den anderen Fahrzeugen auf Alternativrouten ausweichen. Im Szenario mit aktiviertem RTTI erreichen einige Fahrzeuge – bereits mit leichter Verzögerung – auch schon vor 17:30 Uhr das Ziel. Da eine Überlastung des Verkehrsnetzes vorliegt, ist der Spitzenwert auch im Szenario mit RTTI stark ausgeprägt, wenn auch nicht ganz so stark wie im statischen Fall. Das Abklingen der Störung erfolgt sogar im Szenario ohne RTTI zunächst etwas zügiger, wahrscheinlich aufgrund des stoischen Handelns der Teilnehmer, welche sich dann nicht mehr gegenseitig beeinträchtigen. Im weiteren Verlauf verbessert sich die Performanz des Szenarios mit RTTI.

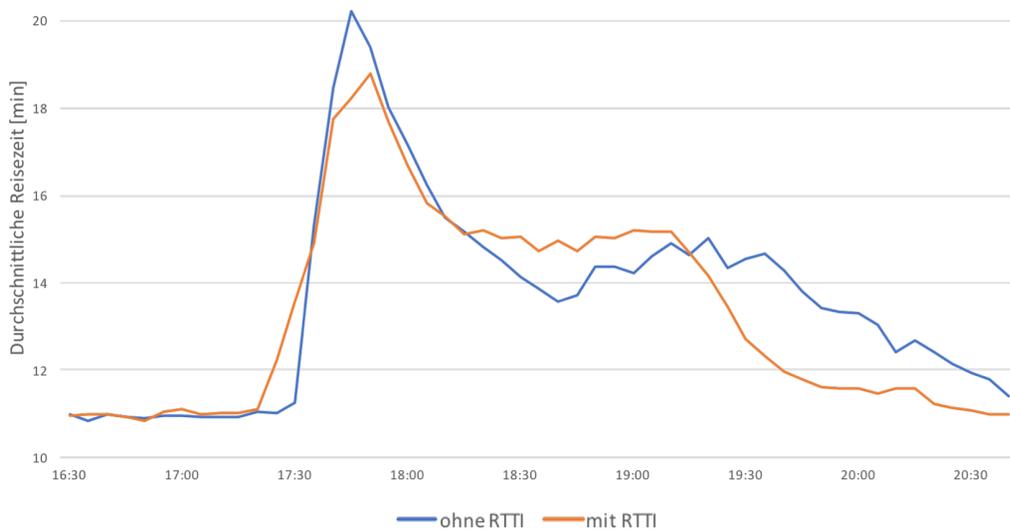


Abbildung 7.4: Durchschnittliche Reisezeit der Szenarien mit und ohne RTTI

In Abbildung 7.5 wurde das Diagramm der durchschnittlichen Reisezeiten ergänzt um die Szenarien, bei denen das Strategische Routingsystem zum Einsatz kommt. Die Kurven stellen wiederum jeweils die durchschnittliche Reisezeit der ankommenden Fahrzeuge, gemittelt über alle Fahrzeugkategorien, je Szenario dar. Die Aufteilung der Fahrzeuggruppen nach Ausstattungsgraden entspricht der in

Kapitel 7.3.3 genannten Verteilung. In der Legende wird als Bezug jeweils der Ausstattungsgrad mit Strategischem Routing genannt.

Zu erkennen ist, dass bereits bei relativ geringen Ausstattungsgraden von 5% bzw. 10% eine deutliche Reduktion der Reisezeit erreicht wird. Auch im weiteren Verlauf nach der Sperrung entsprechen die Reisezeiten etwa dem Niveau ohne Strategien, bzw. weisen sogar leichte Verbesserungen auf. Besonders interessant sind auch die Szenarien mit höheren Ausstattungsgraden, da bei einer Ausstattungsrate von 20% die durchschnittliche Reisezeit nach einer Verbesserung gegen 18:30 Uhr wieder deutlich ansteigt. Dies lässt darauf schließen, dass die Weiterverfolgung einer Strategie nur dann Vorteile bringt, wenn die Strategie eine sinnvolle Maßnahme auf ein Ereignis darstellt. Werden zu viele Verkehrsteilnehmer auf die gleiche Ausweichroute umgeleitet, so entstehen dort auch ohne ein weiteres Ereignis Verkehrsstörungen.

Das Ergebnis der Simulation mit einer Ausstattungsrate von 25% unterstreicht diese Interpretation. Zum Zeitpunkt der Störung liegt die durchschnittliche Reisezeit zwar noch immer unter der Reisezeit des Szenarios ohne Strategien, jedoch teilweise bereits deutlich über der Reisezeit bei geringeren Ausstattungsgraden. Außerhalb des Beeinflussungszeitraums liegt die durchschnittliche Reisezeit sehr stark über den gemessenen Reisezeiten in allen anderen Szenarien. Auch bereits vor Eintritt der Sperrung ist zu erkennen, dass sich bei hohen Ausstattungsgraden (über 20%), Nachteile in der durchschnittlichen Reisezeit ergeben.

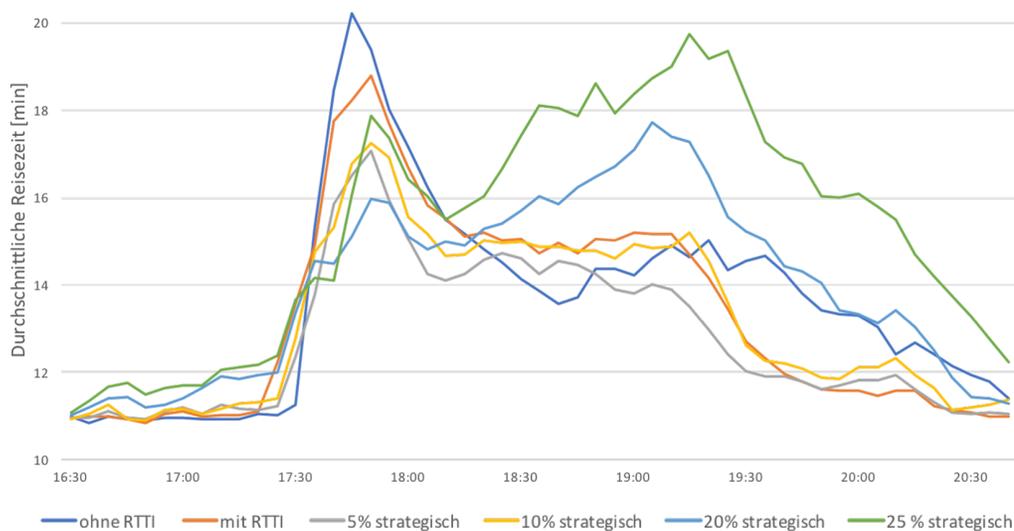


Abbildung 7.5: Durchschnittliche Reisezeit der Szenarien mit strategischem Routing

Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass nur sinnvolle Strategien geschaltet werden, die über Teile des Verkehrsnetzes führen, die genügend Restkapazität

aufweisen, um den zusätzlichen Verkehr aufzunehmen. Daher wird die folgende Auswertung auf den Zeitraum der Störung von 17:00 Uhr bis 18:20 Uhr beschränkt. Die Beobachtungen aus Abbildung 7.5 weisen jeweils leichte Vor- und Nachteile zu unterschiedlichen Zeiten für die verschiedenen Szenarien auf. Daher werden die Reisezeiten über den zeitlichen Verlauf gemittelt und ergeben je Szenario die in Tabelle 7.1 dargestellten Werte.

Szenario	durchschn. Reisezeit	relative Abweichung
ohne RTTI	15,15 min	-
mit RTTI	14,97 min	-
5% Strategisch	13,85 min	-6,9%
10% Strategisch	13,96 min	-5,9%
20% Strategisch	13,92 min	-5,5%
25% Strategisch	14,53 min	-1,6%
30% Strategisch	15,46 min	+4,4%
40% Strategisch	18,11 min	+22,6%

Tabelle 7.1: Mittlere Reisezeiten je Szenario

Darin ist zu erkennen, dass bei Ausstattungsraten mit Strategischem Routing von 5% bis 20% deutliche Verringerungen der Reisezeit von bis zu ca. 7% gegenüber eines Szenarios ohne Strategien entstehen. Auch eine Ausstattungsrate von 25% bewirkt im betrachteten Zeitraum noch eine Verringerung der durchschnittlichen Reisezeit um 1,6%. Bei größeren Ausstattungsraten steigt die durchschnittliche Reisezeit weiter an, ab 40% sogar stark.

Abbildung 7.6 zeigt die prozentualen Abweichungen der durchschnittlichen Reisezeit bei den Szenarien mit Strategischem Routing gegenüber dem Szenario ohne Strategien, aber mit RTTI. Das Diagramm verdeutlicht, dass bereits bei geringen Ausstattungsraten, bei Reduzierungen von 5% bis 7%, die besten durchschnittlichen Reisezeiten erzielt werden können. Bei höheren Raten steigen die Reisezeiten deutlich an.

Neben den durchschnittlichen Reisezeiten wurden die Gesamtreisezeitverluste als Network Performance Indikator festgelegt. Zur Einschätzung der Gesamtsituation im Netz können die Reisezeitverluste genutzt werden, um – gemittelt über alle Fahrten – unabhängig von Fahrbeziehung, Fahrzeugklasse oder Zeitpunkt festzustellen, ob sich die Reisezeiten im Gesamtnetz verbessert haben. Da ein einzelner Wert zum Reisezeitverlust nicht aussagekräftig ist, werden in Tabelle 7.2 die Differenzen zwischen dem Szenario ohne Strategischem Routing und den Szenarien mit unterschiedlichen Ausstattungsgraden dargestellt. Des Weiteren sind sowohl die Werte für den zuvor definierten Auswertungszeitraum, als auch für den gesamten Simulationszeitraum aufgetragen.

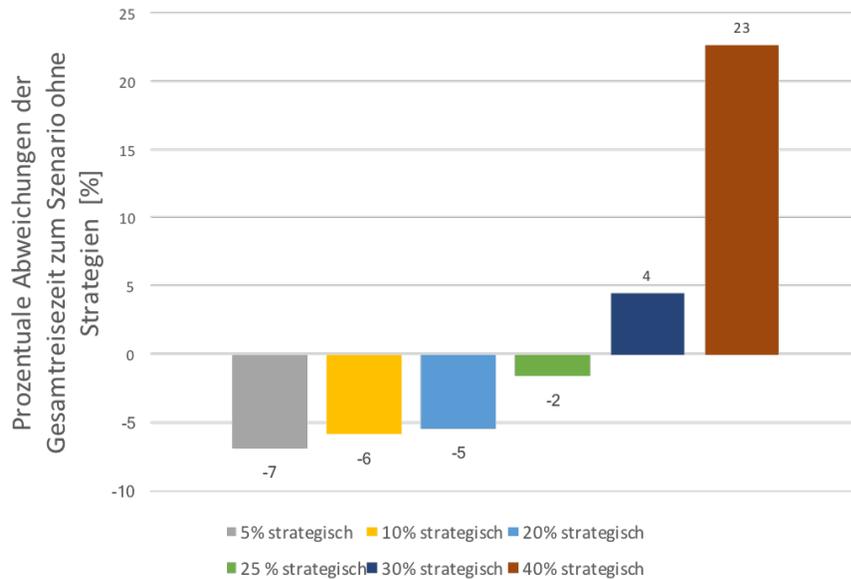


Abbildung 7.6: Prozentuale Abweichungen der Gesamtreisezeit bezogen auf das Szenario ohne Strategien

Szenario	Gesamtzeitraum	Auswertungszeitraum
5% Strategisch	-142,3 h	-73,2 h
10% Strategisch	-82,0 h	-145,9 h
20% Strategisch	117,9 h	-72,0 h
25% Strategisch	540,3 h	-15,2 h
30% Strategisch	792,8 h	-33,0 h
40% Strategisch	2406,7 h	162,0 h

Tabelle 7.2: Gesamtreisezeitverluste je Szenario

Die Zahlen verdeutlichen, dass die Reisezeitverluste bei Ausstattungsraten von 5% oder 10%, negativ sind. Es treten also im Durchschnitt Verbesserungen für das Gesamtsystem auf. Wird nur der Auswertungszeitraum betrachtet, so treten sogar bei höheren Ausstattungsraten bis zu 30% Verbesserungen im Gesamtnetz auf. Die schlechteren Ergebnisse bei Betrachtung des Gesamtreisezeitraums sind wiederum darin begründet, dass die Strategischen Routen außerhalb des Sperrungszeitraums nicht genügend Kapazität aufweisen, um die durch hohe Ausstattungsraten umgeleiteten Verkehrsmengen aufzunehmen.

Abbildung 7.7 zeigt die prozentualen Veränderungen des Gesamtreisezeitverlustes bezogen auf das Szenario ohne Strategien. Es wird deutlich, dass mit einer Ausstattungsquote von 10% mit bis zu ca. 22% weniger Reisezeitverlusten eine erhebliche Steigerung der Netzqualität erreicht werden kann. Ausstattungsraten

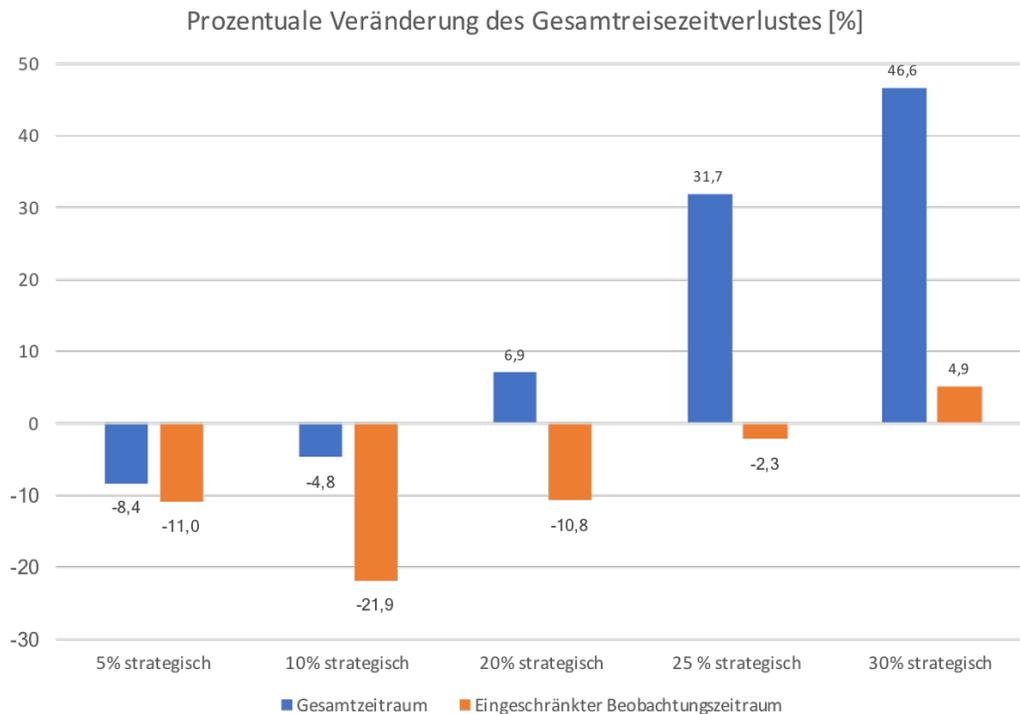


Abbildung 7.7: Gesamtreisezeitverluste je Szenario

von über 30% führen in beiden Betrachtungszeiträumen zu Verschlechterungen des Netzzustands.

Die bisherigen Betrachtungen haben gezeigt, dass die durchschnittliche Reisezeit im Netz durch die Anwendung der Strategien bis zu einem gewissen Ausstattungsgrad gesenkt wurde. Dabei wurden bisher nur Durchschnittswerte über alle Fahrzeuge unabhängig von deren Start-Ziel-Beziehung und deren Ausstattungsgrad gebildet. Um zu analysieren, ob sich diese Reisezeitverbesserungen für alle Verkehrsteilnehmer einstellen oder ob nur eine Gruppe von Verkehrsteilnehmern extrem profitiert, während ein anderer Teil eine Verschlechterung der Reisezeiten erfährt, werden die durchschnittlichen Reisezeiten je Fahrzeuggruppe und Start-Ziel-Beziehung gebildet.

Tabelle 7.3 zeigt die ermittelten durchschnittlichen Reisezeiten je Fahrzeuggruppe. Im Fall ohne Strategien sind die Fahrzeuge mit RTTI über zwei Minuten schneller am Ziel als ortskundige Fahrer, welche wiederum etwa vier Minuten schneller unterwegs sind, als die ortsunkundigen Fahrer. Die Daten verdeutlichen, dass bei Anwendung des Strategischen Routings mit geringen Ausstattungsraten alle Fahrer von einer geringeren Reisezeit profitieren. Ab einer Ausstattungsrate von 40% weisen alle Fahrzeuggruppen höhere Reisezeiten auf, als im Szenario ohne

7.3 Simulation mit einem künstlichen Straßennetz

	Durchschnitt	ortskundig	ortsunkundig	RTTI	Strategisch
RTTI	19,46 min	18,62 min	22,60 min	16,38 min	-
5% strat.	17,32 min	16,78 min	20,37 min	14,59 min	12,37 min
10% strat.	17,21 min	16,72 min	19,90 min	14,97 min	13,23 min
20% strat.	15,61 min	15,48 min	17,39 min	13,54 min	13,76 min
25% strat.	16,98 min	16,71 min	19,30 min	15,66 min	13,95 min
30% strat.	17,50 min	17,39 min	19,98 min	15,39 min	15,88 min
40% strat.	20,41 min	21,38 min	24,48 min	19,12 min	17,50 min

Tabelle 7.3: Durchschnittliche Reisezeit je Fahrzeuggruppe

Strategien. In jedem Fall bleiben die durchschnittlichen Reisezeiten der Verwender von RTTI unter den Reisezeiten der ortskundigen Fahrer, welche wiederum schneller sind als die ortsunkundigen. Die durchschnittlichen Reisezeiten der Verkehrsteilnehmer mit dem strategischen Routensystem sind noch geringer, als bei den Fahrzeugen mit RTTI. Nur im Fall einer Ausstattungsrate von 20% sind die Fahrzeuge mit RTTI sogar am schnellsten.

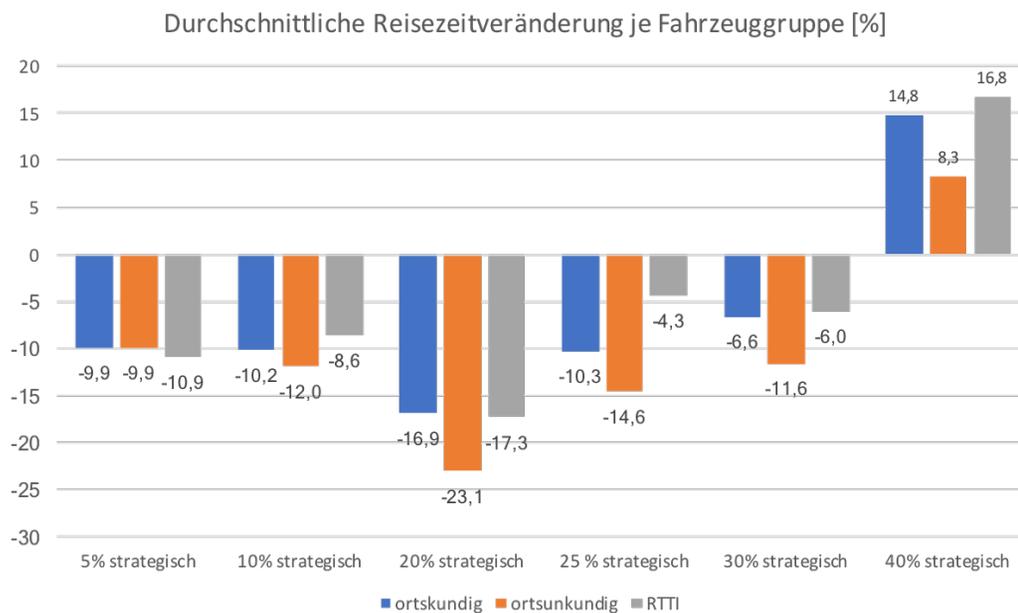


Abbildung 7.8: Durchschnittliche Reisezeitveränderung je Fahrzeuggruppe bezogen auf die durchschnittliche Reisezeit je Fahrzeuggruppe ohne Strategien

Abbildung 7.8 zeigt die Veränderungen der durchschnittlichen Reisezeit für jede Fahrzeuggruppe bezogen auf die durchschnittliche Reisezeit der entsprechenden Fahrzeuggruppe in dem Szenario ohne Strategien. Es wird deutlich, dass in

den meisten Fällen die ortsunkundigen Fahrer am meisten profitieren, bei einer Ausstattungsrate von 20% sogar über 23%. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die Verkehrsteilnehmer immer den gleichen Weg nutzen und dadurch profitieren, dass die anderen Verkehrsteilnehmer auf alternative Routen ausweichen und den Weg frei halten.

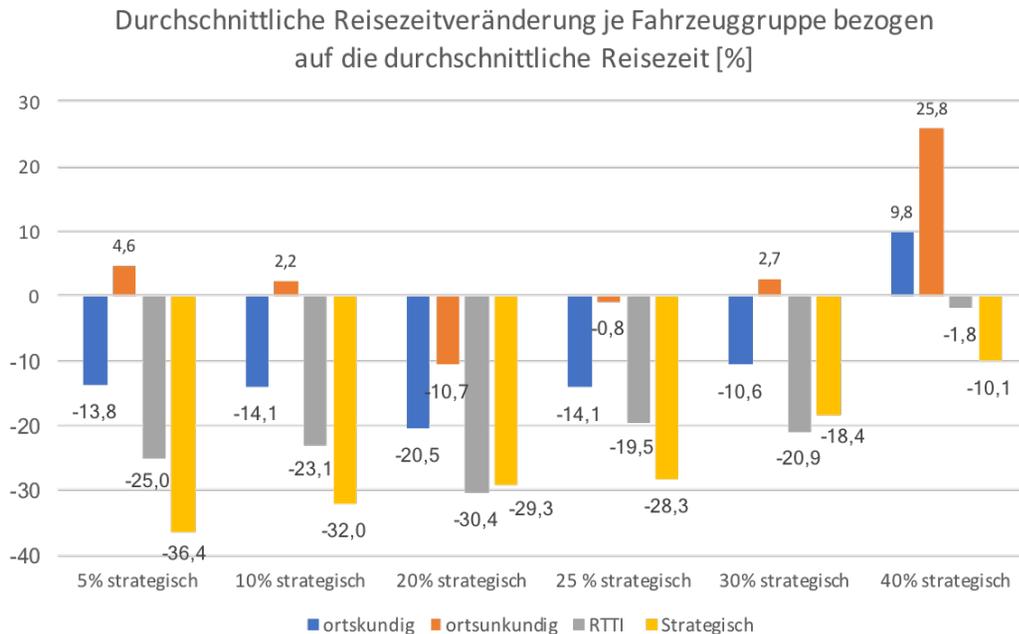


Abbildung 7.9: Durchschnittliche Reisezeitveränderung je Fahrzeuggruppe bezogen auf die durchschnittliche Reisezeit ohne Strategien

Um Aussagen über die Fahrzeuge mit strategischem Routing treffen zu können, zeigt Abbildung 7.9 den Zusammenhang zwischen der durchschnittlichen Reisezeit der entsprechend ausgestatteten Verkehrsteilnehmer je Szenario und der durchschnittlichen Reisezeit aller Verkehrsteilnehmer im Falle ohne Strategien. Deutlich zu erkennen ist, dass die Fahrzeuge mit Strategischem Routing und RTTI die geringsten Reisezeiten aufweisen und sogar bei sehr hohen Ausstattungsraten immer noch etwas schneller unterwegs sind, als die durchschnittliche Reisezeit ohne Strategien. Bei einer Ausstattungsrate von 20% bis 25% sind sogar alle Fahrzeuge schneller unterwegs, als die durchschnittliche Reisezeit. Zu erkennen ist auch, dass die Fahrzeuge mit strategischem Routing selbst am meisten profitieren, wenn die Ausstattungsrate gering ist und steigende Reisezeiten aufweisen, je mehr Fahrzeuge mit dem System unterwegs sind.

Abschließend werden die durchschnittlichen Reisezeiten je Start-Ziel-Beziehung betrachtet. Die eingeführte Sperrung betrifft nur Verkehrsteilnehmer mit der Start-Ziel-Beziehung A-C (OD1) direkt (vgl. Kapitel 7.3.4). Nicht direkt betroffen sind

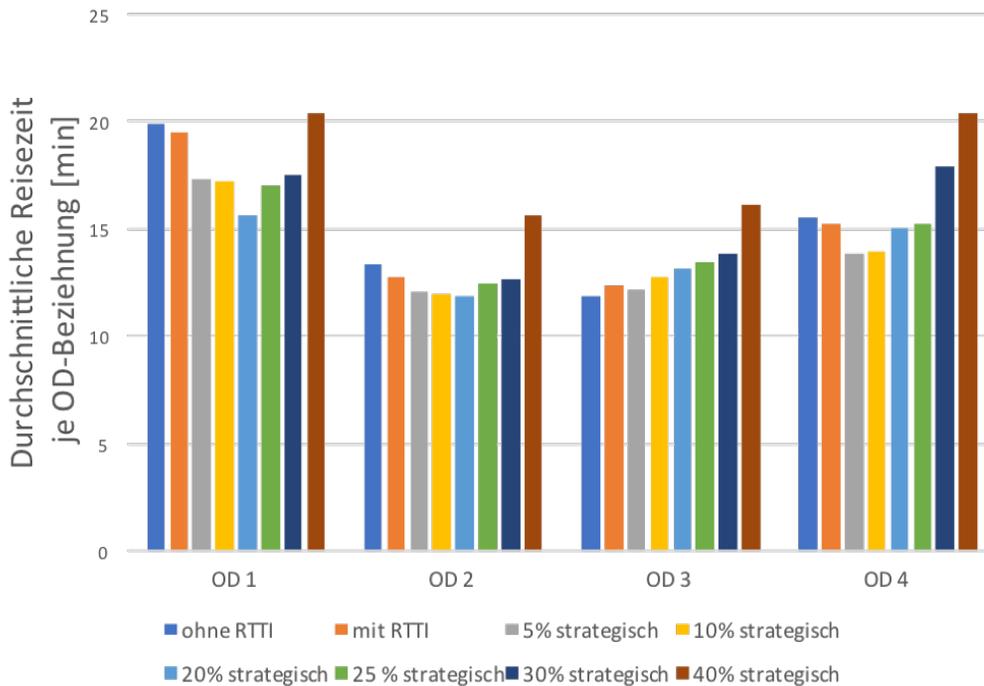


Abbildung 7.10: Durchschnittliche Reisezeit je Start-Ziel-Beziehung

die Gegenrichtung C-A und die Beziehungen zwischen B und D (OD2 & OD3 & OD4). Abbildung 7.10 veranschaulicht die durchschnittlichen Reisezeiten je Szenario aufgliedert nach den OD-Beziehung der Verkehrsteilnehmer. Zunächst ist deutlich zu erkennen, dass die Reisezeiten für OD1 wie erwartet höher sind, als für alle anderen OD-Beziehungen, da der Verkehr auf dieser OD-Beziehung direkt gestört ist.

Die durchschnittlichen Reisezeiten von OD2 und OD4 weisen einen ähnlichen Verlauf auf, wie dies auch bei OD1 und im Gesamtdurchschnitt zu beobachten ist. Die durchschnittlichen Reisezeiten sinken zunächst mit steigender Ausstattungsrate und steigen bei Ausstattungsraten von über 20% an. Bei OD4 tritt dieser Effekt bereits etwas früher, nämlich bei Ausstattungsraten über 10%, auf. Im Gegensatz zu allen anderen OD-Beziehungen tritt dieser Effekt bei OD3 nicht auf. Die Reisezeiten für diese Start-Zielbeziehung steigt mit wachsender Ausstattungsrate. OD3 weist in den Szenarien ohne Strategisches Routing die geringste Reisezeit auf. Durch die Einführung des Strategischen Routings findet eine Umverteilung des Verkehrs auf Routen statt, welche bisher geringere Verkehrsstärken hatten. Diese Umverteilung beeinflusst diejenigen Strecken negativ, welche am wenigsten von einer Störung im Netz betroffen sind – in diesem Fall OD3, da diese durch eine Mehrbelastung steigende Reisezeiten verzeichnet. Das Streben nach einem Nutze-

roptimum, welches durch die Umverteilung mit Hilfe des Strategischen Routings erreicht werden soll, fordert von einigen Verkehrsteilnehmern die Investition von Reisezeit für den Profit des Gesamtsystems.

7.3.10 Erkenntnisse aus der Verkehrssimulation in einem künstlichen Netz

Durch die Simulationen an einem kleinen, künstlichen Straßennetz, konnte nachgewiesen werden, dass es prinzipiell möglich ist, die Verkehrsqualität im Gesamtnetz im Schnitt zu verbessern. Durch eine Umverteilung des Verkehrs auf Strecken mit Restkapazitäten wurden durchschnittlich niedrigere Reisezeiten im Gesamtnetz erreicht. Die Simulation hat gezeigt, dass von diesem Effekt nicht nur die Fahrzeuge profitieren, die mit einem entsprechenden System ausgestattet sind, sondern, dass sich dieser Effekt auf alle Verkehrsteilnehmer, unabhängig von der Ausstattungsvariante, auswirkt. Bei Ausstattungsraten von 10-20% konnten die geringsten Gesamtreisezeiten festgestellt werden. Dabei wurden bis zu einer Ausstattungsrate von 20-25% sinkende durchschnittliche Reisezeiten gemessen und es konnten Zeitersparnisse, je nach Ausstattungsart von 10-30% der Reisezeit erreicht werden. Nur für die Verkehrsteilnehmer mit strategischem Routing wirkten sich in diesem Bereich höhere Ausstattungsraten negativ aus: Je höher die Ausstattungsrate stieg, umso geringer wurden die Vorteile für diese Verkehrsteilnehmer. Bei Ausstattungsraten ab 25% konnte beobachtet werden, dass die Reisezeiten für alle Verkehrsteilnehmer wieder steigen, bei Raten ab 30-40% wirkte sich das System sogar so negativ aus, dass die durchschnittlichen Reisezeiten höher lagen, als ohne Verwendung des Systems.

Eine Analyse nach Fahrbeziehungen hat gezeigt, dass sich die Verteilung der Verkehrsmengen auf andere Routen nachteilig auf die Reisezeiten von Verkehrsteilnehmern auswirken kann, die ohne das System nicht von einer Störung betroffen gewesen wären. Die Analyse wurde auf einen Beobachtungszeitraum bis zum Abklingen der Nachwirkungen der eingeführten Störung beschränkt, da im unbeeinflussten Netz die Wahl von sinnvollen Strategien nicht möglich war. Die Anwendung des Strategischen Routings auf den ungestörten Zustand hat gezeigt, dass die durchschnittlichen Reisezeiten im Netz deutlich ansteigen, wenn zu hohe Ausstattungsgrade eingesetzt werden. Dieses Verhalten lässt darauf schließen, dass die Auswirkungen auf die Reisezeit sehr stark von der Beschaffenheit des Straßennetzes und der Wahl der Strategie abhängig sind. Das betrachtete Netz ist sehr klein und somit hatte die eingeführte Störung einen Einfluss auf alle Verkehrsteilnehmer. Es bleibt zu ermitteln, ob die in dieser Simulation beobachteten Phänomene auf ein großes, reales Straßennetz übertragbar sind. Daher wird im Folgenden eine Simulation an einem realen Straßennetz durchgeführt.

7.4 Simulation mit einem realen Straßennetz

In der vorherigen Simulation wurden die Auswirkungen der Ausstattungsgrade untersucht. Dies wurde an einem künstlichen Netz durchgeführt, da diese Simulationen deutlich schneller berechnet werden können. Abschließend soll nun untersucht werden, ob sich die Erkenntnisse aus den Simulationsreihen an dem künstlichen Netz auch auf ein reales Netz übertragen lassen. Bei den Simulationen mit der Software Vissim wurde festgestellt, dass sich die Beeinflussung der Routen der Verkehrsteilnehmer durch die bereitgestellte API nicht auf größere Straßennetze anwenden lässt. Daher wurde für die Simulation des realen Straßennetzes die Verkehrsflusssimulation AIMSUN (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks) der Firma TSS verwendet.

7.4.1 Modifikation des Verkehrsnetzes

Vom Institut für Verkehr und Stadtbauwesen (IVS) der TU Braunschweig wurde ein Straßennetz der Stadt Hannover zur Verfügung gestellt. Die modellierten Straßen reichen von der höchsten Kategorie „Autobahn“ bis hin zu „Sammelstraßen“, von denen jedoch nicht alle in vollem Detail eingetragen sind. Alle für das Verkehrsgeschehen relevanten Straßen sind vorhanden. Das Netz wurde vom IVS (damals IVH) bereits für ähnliche Untersuchungen eingesetzt [Matschke, 2007] und verfügt daher auch bereits über einen validierten Stand der Verkehrsnachfrage in Form von OD-Matrizen. Bei der Überprüfung des Straßennetzes wurde festgestellt, dass einige wichtige Informationen fehlten beziehungsweise wahrscheinlich durch eine neuere Version von AIMSUN verloren gegangen sind. Die Modifikationen werden im Folgenden kurz dargestellt.

Die Geschwindigkeitsbeschränkungen und Kapazitäten der Straßenkanten wurden nicht korrekt übernommen, diese wurden gemäß ihrer Straßenklasse neu festgesetzt. Die Knotenpunkte werden in AIMSUN über sogenannte „Yellow Boxes“ dargestellt. In einigen Fällen wurden die Abbiegebeziehungen mancher Knotenpunkte nicht korrekt übernommen. Diese wurden entsprechend der eingetragenen Fahrbeziehungen korrigiert. Jeder Knotenpunkt verfügt über einen „Yellow Box Speed“ – eine Mindestgeschwindigkeit, welche erreicht werden muss, damit Fahrzeuge den Knotenpunkt passieren. Dieser musste für die Knotenpunkte noch gesetzt werden und wurde nach Empfehlung der Dokumentation pauschal auf 15 km/h angenommen.

Weiterhin mussten für viele Knotenpunkt neue virtuelle Haltelinien eingesetzt werden, um die Fahrzeuge daran zu hindern, zu weit in den Knotenpunkt einzufahren und diesen zu blockieren. Über diese Maßnahmen hinaus wurden noch

einige kleine Korrekturen an Fahrstreifenzuweisungen und Wendemöglichkeiten vorgenommen. Die restlichen Randbedingungen insbesondere die Steuerungen der Lichtsignalanlagen und die Simulationsparameter zum Fahrzeugverhalten, wurden auf Plausibilität überprüft und nicht verändert.

7.4.2 Erzeugen und Validieren der Verkehrsnachfrage

Als Basis für die Verkehrsnachfrage werden die OD-Matrizen verwendet, die vom IVS geliefert wurden. Insgesamt verfügt das Netz über 303 Quellen und Ziele. Die Matrix umfasst die Summenwerte einer 24 Stunden Betrachtung für diese Quellen und Ziele. Um die tageszeitlichen Verkehrsmengen abzubilden, wurden mit Hilfe von Verkehrszählungen die Anteile in 15-Minuten-Intervallen aufgeteilt [Matschke, 2007]. Die Simulation betrachtet die morgendliche Spitzenstunde von 06:00 Uhr bis 10:00 Uhr. Abbildung 7.11 zeigt die Tagesganglinie für die verwendeten Verkehrsmengen.

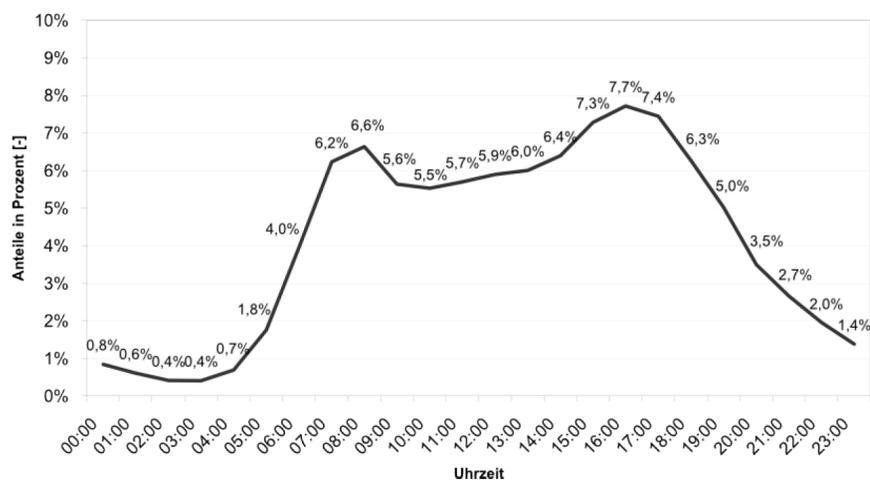


Abbildung 7.11: Tagesganglinie der in der Simulation verwendeten Verkehrsnachfrage [Matschke, 2007]

Die Verkehrsteilnehmer werden in fünf verschiedene Fahrzeugkategorien eingeteilt, welche Einfluss auf die Abmessungen und kinematische Größen wie Höchstgeschwindigkeit und Beschleunigungsvermögen der Fahrzeuge haben. Der Anteil der verschiedenen Fahrzeugklassen ergibt sich wiederum aus Verkehrszählungen. Die Anteile wurden wie folgt übernommen:

- Pkw 52%
- Pkw Fernverkehr 23%
- Pkw Wirtschaft 15%

- Lkw bis 7,5t 6%
- Lkw über 7,5t 4%

7.4.3 Routenwahl

Das Verhalten zur Routenwahl wurde wiederum aus der gegebenen Simulation übernommen. Auf Basis einer C-Logit-Bewertung wird die Routenwahl von einem Start- zu einem Zielpunkt durch Bestimmung des geringsten Widerstandes durchgeführt (vgl. Kapitel 3.2.4). Der Widerstand drückt sich dabei durch die Reisezeit aus. Das Verfahren verfügt darüber hinaus über sogenannte Komfort-Komponenten, welche unter anderem berücksichtigen, dass Straßen mit einer hohen Ausbaustufe, hoher Kapazität und wenigen Knotenpunkten (zum Beispiel Autobahnen, Kraftfahrstraßen) eine bessere Bewertung erhalten als niederrangige Straßen [Matschke, 2007]. Gleichung 7.3 zeigt die mathematische Beschreibung dieses Commodity Factors (CF):

$$CF_{a,VT,v} = TT_{a,VT,v} \cdot \left[1 + \varphi_{VT} \cdot \ln(NbStops + 1) + \mu_{VT} \cdot \left(1 - \frac{Cap_a}{CapNet_{max}} \right) \right] \quad [s] \quad (7.3)$$

mit:

- $TT_{a,VT,v}$ aktuelle Reisezeit auf Link a für Fahrzeugtyp VT im Zeitintervall v
- $NbStops$ mittlere Anzahl von Halten auf Link a im Intervall v
- φ_{VT} Gewichtungsfaktor zur Berücksichtigung der Behinderungsfreiheit in Abhängigkeit vom Fahrzeugtyp VT
- Cap_a Kapazität von Link a [Fz/h]
- $CapNet_{max}$ maximale Kapazität, welche auf einem Link im Netz vorhanden ist
- μ_{VT} Kapazitätsgewichtung abhängig vom Fahrzeugtyp VT

Die Verkehrsteilnehmer werden in unterschiedliche Gruppen gemäß ihrer Routenwahl und Verkehrskennntnis eingeteilt. Mit Ausnahme der Verkehrsteilnehmer mit vorgegebener Route, treffen jedoch alle Fahrzeuge ihre Routenwahl über das C-Logit-Modell. Die Fahrzeuge der einzelnen Gruppen unterscheiden sich allerdings neben ihrer Kenntnis über den Verkehrszustand auch durch die Häufigkeit ihrer Routenwahl (vgl. Kapitel 7.4.5).

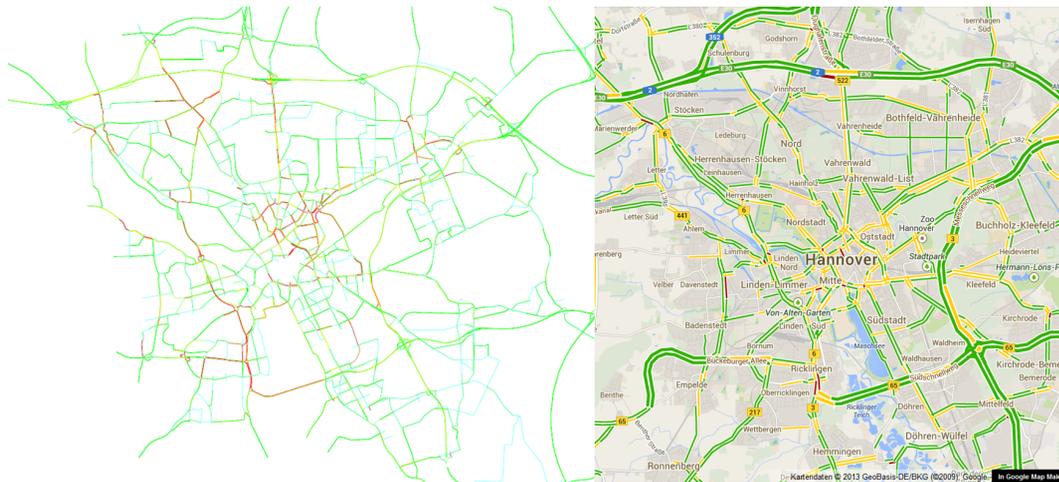


Abbildung 7.12: Gegenüberstellung der Verkehrsdichte aus der Simulation und der real aufgetretenen Geschwindigkeit [Google LLC, 2015]

7.4.4 Kalibrierung des Netzes

Durch die vorgenommenen Veränderungen am Netz kann nicht gewährleistet werden, dass die Verkehrsstärken noch zu dem aktuellen Netz passen. Daher erfolgt eine erneute Validierung der Verkehrsstärken. Diese wird sowohl durch eine qualitative, als auch durch eine quantitative Bewertung des Modells durchgeführt. Für die quantitative Bewertung werden die Verkehrsflüsse in der Simulation mit den Verkehrsstärken aus der Verkehrsmengenkarte 2010 [[Niedersächsische Landesbehörde für Straßenbau und Verkehr, 2010](#)] verglichen. Hierzu werden in der Simulation Durchflussmengen erhoben und entsprechend der angenommenen Tagesganglinien (vgl. Abbildung 7.11) gewichtet und mit den durchschnittlichen täglichen Verkehrsmengen (DTV) in Beziehung gesetzt. Für die Autobahnen ergeben sich hierbei Werte, welche weniger als 10% Abweichung aufweisen. Die Abdeckung der innerstädtischen Straßen durch die Verkehrsmengenkarte ist sehr schwach und bietet dementsprechend wenig Raum für Referenzstellen. Insbesondere sind die angegebenen Werte jeweils für größere Straßenabschnitte gemittelt, so dass vereinzelt mit großen Abweichungen zu rechnen ist. Es wird daher als ausreichend genau betrachtet, dass die Größenordnungen für die Verkehrsmengen stimmen und die Abweichungen im Mittel 15% nicht übersteigt.

Für die qualitative Bewertung wird die zur Spitzenstunde entstehende Verkehrslage mit der realen Verkehrslage der Stadt Hannover zur Spitzenstunde verglichen. Es ist davon auszugehen, dass Verkehrsstaus bei korrekt injizierter Verkehrslage an ähnlichen Stellen und in ähnlicher Ausprägung auch in der Realität entstehen.

In einer Gegenüberstellung (vgl. Abbildung 7.12) ist erkennbar, dass sich Bereiche

mit hoher Fahrzeugdichte in AIMSUN mit denen geringer Geschwindigkeit aus Google Maps gleichen. Besonders gut ist dies auf den Schnellwegen in Herrenhausen und Ricklingen zu beobachten. Auch die Zubringer im Norden (Vahrenwalder Straße) und Osten (Podbielskistr.) zeigen das zur Spitzenstunde typische hohe Verkehrsaufkommen. Nördlich des Hauptbahnhofs entstehen periodisch starke Verkehrsaufkommen. Diese sind nur von kurzer Dauer und haben keine gravierenden Auswirkungen auf das Gesamtsystem. Das Verkehrsnetz soll lediglich eine beispielhafte Darstellung einer Großstadt darstellen und ist nicht als quantitative Vorlage der Stadt Hannover zu verstehen. Die Beobachtungen zeigen, dass das Modell insgesamt das Verkehrsnetz einer Großstadt qualitativ gut abbildet. Da bei den Untersuchungen die Erkenntnisse jeweils nur in Relation zueinander gesetzt werden sollen und keine Maßnahmen für die Stadt Hannover abgeleitet werden sollen, wird das Modell als ausreichend kalibriert angenommen.

7.4.5 Differenzierung der Verkehrsteilnehmer

Wie bereits bei den Untersuchungen am künstlichen Verkehrsnetz (vgl. Kapitel 7.3) werden auch bei dieser Simulation die Verkehrsteilnehmer wieder in vier unterschiedliche Gruppen eingeteilt:

- Fahrzeuge ohne Navigationsgerät (ortskundige Fahrer) (40%)
- Fahrzeuge mit Navigationsgerät (ohne Echtzeit-Verkehrsinformationen) (30%)
- Fahrzeuge mit Navigationsgerät (mit Echtzeit-Verkehrsinformationen) (20%)
- Fahrzeuge mit Strategischen Routen (10%)

Die Verteilung dieser Fahrzeuge wird auf Basis der Vorerkenntnisse (vgl. Kapitel 7.3) wie oben genannt festgesetzt.

7.4.6 Programmerweiterung für AIMSUN

Die Zuweisung der Strategischen Routen für die Verkehrsteilnehmer erfolgt wiederum über eine Programmerweiterung, die über die AIMSUN API an das Simulationsprogramm angeschlossen werden kann. Im Gegensatz zu dem Vorgehen in der VISSIM Simulation, werden durch die Erweiterung nicht nur die Routen samt Verteilungen in der Simulationsumgebung gesetzt, sondern den Fahrzeugen werden individuelle Routen zugewiesen. Die Fahrzeuge ohne Echtzeitinformationen und ohne Navigationsgerät werden von AIMSUN direkt verwaltet, da sich deren Routen zur Simulationszeit nicht ändern. Auch die Fahrzeuge mit „normalen“ Echtzeit-Verkehrsinformationen werden direkt von AIMSUN verwaltet und aktualisieren ihre Verkehrslage alle fünf Minuten auf Basis der in der Simulation

automatisch erfassten Verkehrslage (durchschnittliche Reisezeit je Straßenkante). Die Programmerweiterung berücksichtigt daher nur die Fahrzeuge mit strategischen Routen. Um eine geeignete Verteilung der Fahrzeuggruppen zu erreichen, verwaltet die Erweiterung alle Fahrzeuge und deren Zuteilung zu den Gruppen.

7.4.7 Beschreibung der Simulation

Zur Auswertung der unterschiedlichen Szenarien werden drei verschiedene Situationen simuliert:

- Freier Verkehrszustand
- Gestörter Verkehrszustand ohne Strategisches Routing
- Gestörter Verkehrszustand mit Strategischem Routing

Zu Beginn jedes Szenarios wird das Netz mit einem identischen Startzustand versehen, bei dem um 6:00 Uhr ca. 13.000 Fahrzeuge unterwegs sind. Der Ausgangszustand ist die Simulation des Verkehrsnetzes ohne Störungen. Der Zeitraum der verwendeten OD-Matrix umfasst die Stunden von 6:00 Uhr bis 10:00 Uhr, wobei die Simulation weiter läuft, bis alle Fahrzeuge das Netz verlassen haben. Dies ist nötig, um die Gesamtreisezeit im Netz mit den anderen Szenarien vergleichen zu können. Die Störung des Verkehrszustands wird durch eine Sperrung der A2 in östlicher Richtung hinter der Abfahrt Hannover Lahe herbeigerufen (vgl. Sperrung in Abbildung 7.13). Durch die Sperrung direkt hinter der Abfahrt müssen alle Fahrzeuge die Autobahn verlassen und neue Routen suchen. Die Sperrung beginnt um 7:00 Uhr und dauert bis 10:00 Uhr.

Für die Fahrzeuge, welche die Strategischen Routen verwenden, werden – abhängig von deren Ziel – vier unterschiedliche Strategische Routen ausgewählt. Hierbei handelt es sich um Routen, die noch über eine hohe Restkapazität im Netz verfügen und sich daher besonders für die Verwendung als Ausweichroute eignen. Die gewählten Routen sind Abbildung 7.13 zu entnehmen. Da die Sperrungsmaßnahme auf der Autobahn herbeigerufen wurden, ist der Großteil der durch diese Sperrung betroffenen Fahrzeuge vom Typ „PKW Fernfahrer“. Um eine möglichst hohe Ausstattungsrate bei den Fahrzeugen zu platzieren, die auch wirklich von der Maßnahme betroffen sind, werden ausschließlich diese Fahrzeuge mit dem Strategischen Routen-System ausgestattet. Es werden 50% dieser PKW mit dem System ausgestattet, um insgesamt einen Anteil von ca. 10% (vgl. Kapitel 7.4.5) der Gesamtausstattung zu erreichen.

Für jedes genannte Szenario werden jeweils fünf Simulationsdurchläufe durchgeführt und die Ergebnisse aufgezeichnet. Bei den im folgenden Kapitel genannten Ergebnissen handelt es sich jeweils um die Mittelwerte der fünf Simulationen.



Abbildung 7.13: Strategische Routen und Sperrung im Simulationsnetz

7.4.8 Ergebnisse der Simulation

Erwartungsgemäß bewirkt die Sperrung der Autobahn einen Anstieg sowohl der durchschnittlichen zurückgelegten Weglängen, als auch einen signifikanten Anstieg der durchschnittlichen Reisezeit.

Diagramm 7.14 zeigt die über alle Fahrzeuggruppen gemittelten durchschnittlichen Reisezeiten. Das Einsetzen der Störung bewirkt für das Gesamtsystem eine Verlängerung der durchschnittlichen Reisezeit von ca. 26 Minuten auf etwa 31 Minuten und somit einen Anstieg um ca. 15%. Durch die Verwendung der Strategischen Routen kann der Anstieg verglichen mit dem störungsfreien Szenario auf rund 11% gesenkt werden. Dies entspricht einer durchschnittlichen Reisezeit von ca. 30 Minuten. Dies bedeutet, dass die Steigerung um etwa 23% geringer ausfällt, als bei dem gestörten Szenario ohne Strategische Routen.

Diagramm 7.15 veranschaulicht die über alle Fahrzeuggruppen gemittelte durchschnittliche Wegstrecke. Diese steigt im Vergleich zwischen dem gestörten und dem freien Szenario um etwa 1,7% von 12,3 km auf etwa 12,5 km. Auch in diesem Fall sinkt die zurückgelegte durchschnittliche Strecke bei Anwendung des Strategischen Routings auf eine Steigerung von etwa 1,5% verglichen mit dem freien Szenario. Dies entspricht einer Reduktion um etwa 12% bei einem direkten

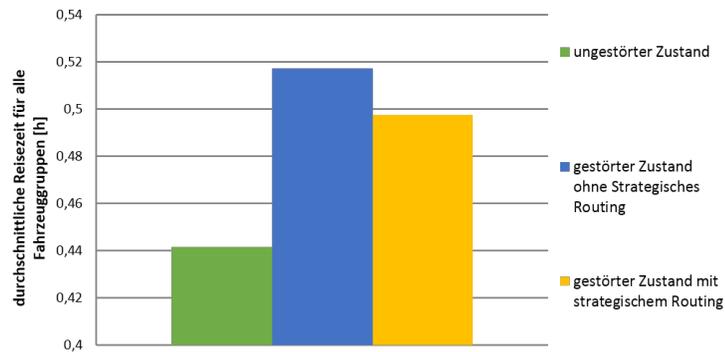


Abbildung 7.14: Durchschnittliche Reisezeit gemittelt über alle Fahrzeuge

Vergleich zwischen dem gestörten Szenario mit und ohne Strategisches Routing. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass sich für das Gesamtverkehrssystem eine deutliche Verbesserung, sowohl für die durchschnittliche Reisezeit, als auch für die Wegstrecke durch die Verwendung des Strategischen Routings ergibt. Um die Auswirkungen und die Veränderungen für die einzelnen Fahrzeuggruppen besser zu verstehen, werden im Folgenden die Fahrzeuge mit und ohne Strategischen Routeninformationen differenziert betrachtet. Die Auswirkungen auf die Reisezeit der Fahrzeuge des Fernverkehrs, welche mit und ohne das Strategische Routing System unterwegs sind, können Diagramm 7.16 entnommen werden.

Mit einer Steigerung der Reisezeit um etwa 65% von ca. 22 Minuten auf ca. 34 Minuten sind die Fahrzeuge im Fernverkehr natürlich besonders von der Sperrung der Autobahn betroffen. Durchschnittlich über alle Fahrten hat der Anstieg nur 15% betragen. Die Fahrzeuge, welche mit dem Strategischen Routing System

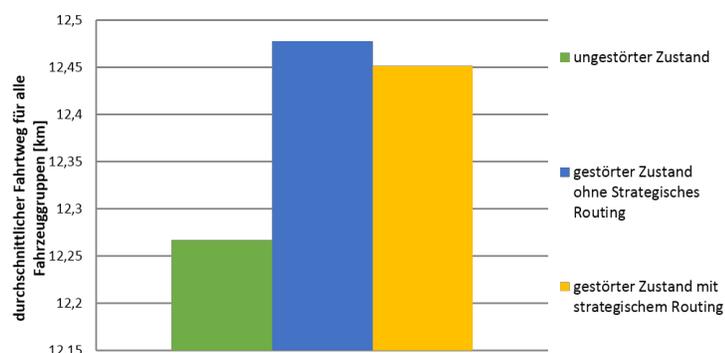


Abbildung 7.15: Durchschnittliche Fahrstrecke gemittelt über alle Fahrzeuge

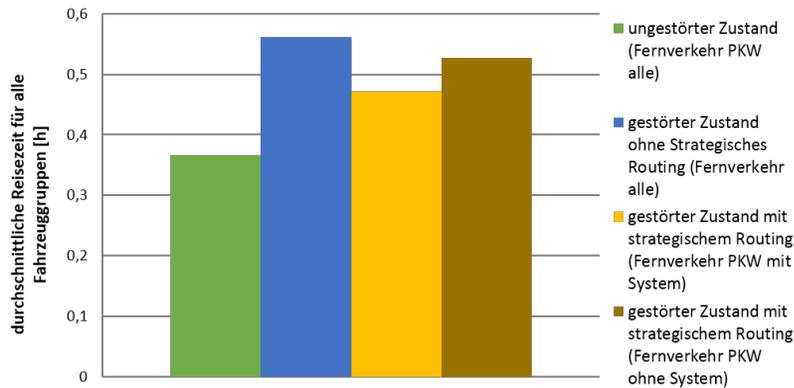


Abbildung 7.16: Durchschnittliche Reisezeit der PKW des Fernverkehrs

ausgestattet sind, profitieren von diesem System sehr stark. Die mit dem System ausgestatteten Fahrzeuge benötigen im gestörten Szenario im Durchschnitt mit 28 Minuten nur etwa 6 Minuten länger, als im freien Zustand. Dies entspricht einer Reduktion der zusätzlichen Stauzeit um über 35%.

Sogar die Fahrzeuge, die nicht mit dem System ausgestattet sind, profitieren von dem System. Diese Fahrzeuge benötigen zwar mit rund 32 Minuten über 30% länger im Vergleich zu dem freien Zustand, dies ist allerdings darin begründet, dass ein großer Teil der Fahrzeuge von der Sperrung der Autobahn direkt betroffen ist. Im Vergleich zu den 35% im Fall ohne das Strategisches Routing System profitieren die Fahrzeuge um rund 12% oder 2 Minuten.

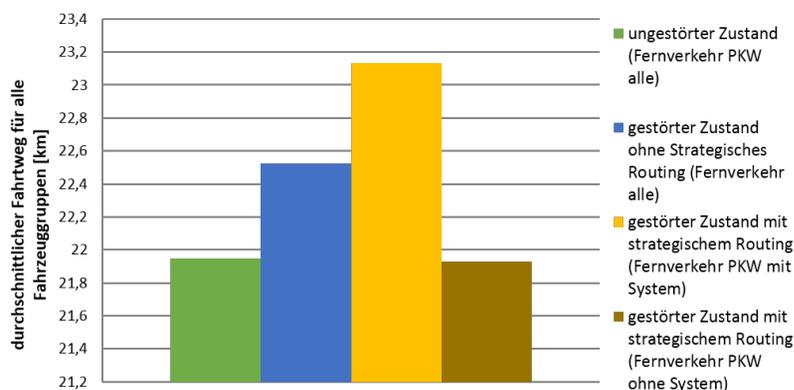


Abbildung 7.17: Durchschnittliche Fahrstrecke der PKW des Fernverkehrs

Diagramm 7.17 stellt die analoge Betrachtung für die durchschnittliche Wegstrecke

aller Fernverkehrsfahrzeuge dar. Der Anstieg der durchschnittlichen Wegstrecke fällt mit einer Steigerung um rund 2,5% von 21,5 km auf 22,1 km für die PKW des Fernverkehrs wiederum ein wenig stärker aus als im Gesamtdurchschnitt. Besonders deutlich wird an dieser Stelle die großräumige Umfahrung der Sperrung durch die Fahrzeuge mit Strategischem Routingsystem, denn die Wegstrecke dieser Fahrzeuge steigert sich - sogar im Vergleich zum gestörten System - noch einmal um rund 5% auf durchschnittlich 23,1 km. Die Fahrzeuge, welche nicht mit dem System ausgestattet sind, profitieren wiederum davon. Die durchschnittliche Wegstrecke dieser Fahrzeuge reduziert sich um etwa 1,9% auf 21,9 km. Die Fahrzeuge mit strategischem Routingsystem nehmen somit zwar einen Umweg zur großräumigen Umfahrung der Sperrung in Kauf, profitieren aber selbst durch eine geringere Reisezeit und tragen gleichzeitig zu einer Verbesserung des gesamten Verkehrsnetze bei und verbessern die Reisezeit und Strecke der Fahrzeuge ohne das System.

7.5 Schlussfolgerung

Es konnte gezeigt werden, dass auch in einem realen Netzwerk Verbesserungen der Reisezeit für durchschnittlich alle Verkehrsteilnehmer erzielt werden konnten. Allerdings ist bei den genannten Zahlen immer die Bezugsgröße zu beachten. Die Art, Dauer und Ausprägung der Verkehrsstörung beeinflusst das Verhalten des Netzes extrem. Kleinere Störungen würden im Gesamtnetz nur Auswirkungen von nahezu nicht messbarer Größe haben. Des Weiteren ist die Beschaffenheit des Netzes und damit auch der möglichen Alternativrouten von großer Bedeutung. In beiden Simulationsnetzen lagen ausreichend Alternativrouten mit Restkapazitäten vor. Ist dies nicht der Fall, so kann auch ein Strategisches Routing nicht greifen. Die genannten Zahlen, sowohl absolut als auch relativ, sind daher nur mit entsprechender Deutung zu verstehen. Das Finden dieser Alternativrouten mit ausreichend Restkapazitäten ist allerdings nicht trivial. Ein normales Routing ohne Zusatzinformationen findet sehr viele Alternativrouten. Welche dieser Routen allerdings über hohe Restkapazitäten verfügt, kann nur durch lokales Wissen ermittelt werden. In jedem Fall wurde gezeigt, dass das Strategische Routing auch im Gesamtnetz Verbesserungen der Reisezeit erzielen kann, jedoch ab einem gewissen Ausstattungsgrad negative Auswirkungen hat. Dieser Ausstattungsgrad liegt mit $> 20\%$ sehr hoch. An dem untersuchten Netz in Hannover wurde dieser Ausstattungsgrad nur auf die Fernfahrer angewendet. Wird angenommen, dass Fernfahrer im Allgemeinen besser ausgestattete Fahrzeuge haben, so liegt der durchschnittliche Ausstattungsgrad im Untersuchungsgebiet etwas niedriger. Auch dieser ist jedoch abhängig von der Beschaffenheit des Netzes und der Störung. Je nach Restkapazität können mehr oder weniger Fahrzeuge von der Alternativroute aufgenommen werden. Die Ausprägung der Störung beeinflusst die Anzahl der betroffenen Fahrzeuge. Ist diese ohnehin sehr gering, so können auch hohe Ausstattungsgrade keinen negativen Effekt auf das Gesamtnetz erzielen.

8 Ausblick und Zusammenfassung

8.1 Ausblick

8.1.1 Steigende Bedeutung der Umweltbeeinflussung

In den letzten Jahren sind die Umweltbelastungen durch den Individualverkehr immer stärker in den Fokus gerückt. Viele Städte haben bereits durch Umweltzonen oder generelle Fahrverbote für Fahrzeuge mit Diesel- oder Verbrennungsmotoren im innerstädtischen Bereich diese Entwicklung vorangetrieben. Bei diesen Verboten oder zeitweisen Verboten handelt es sich ebenfalls um Verkehrsmanagementmaßnahmen durch städtische Verwaltungen. Über ein strategisches Routing ist es den Verkehrsbetreibern möglich, sehr präzise und detaillierte Verkehrsmanagementmaßnahmen fahrzeugspezifisch zu entwickeln. Werden solche Maßnahmen den Fahrzeugen zugänglich, so ist es möglich, Fahrstrategien von Hybridfahrzeugen anzupassen, um in Bereichen hoher Belastung vorzugsweise elektrisch zu fahren und den Verbrennungsmotor in wenig belasteten Gebieten zu verwenden. Je nach Motorisierung eines Fahrzeugs ist es durch strategisches Routing möglich unterschiedliche Routen zu berechnen. Somit steigt mit der Bedeutung der Umweltbelastung durch den Individualverkehr auch die Bedeutung des Strategischen Routings.

8.1.2 Veränderungen durch hochautomatisiertes Fahren

Die Entwicklungen im Bereich des hochautomatisierten Fahrens schreiten in den letzten Jahren rapide voran, so dass damit zu rechnen ist, dass in wenigen Jahren Fahrzeuge in der Lage sind, größere Abschnitte hochautonom, ohne Eingriff des Fahrers, zurückzulegen. Diese Weiterentwicklung gibt auch dem Strategischen Routing eine neue Bedeutung. Neue Verkehrsstrategien können dadurch entstehen, dass eine Verwendung von Strecken, welche hochautonom zurückgelegt werden können, bevorzugt werden.

Das Forschungsprojekt Inframix [[INFRAMIX consortium, 2018](#)] verfolgt unter anderem das Ziel, Verkehrsstrategien zu entwickeln, welche speziell auf den Mischverkehr aus autonomen und nicht autonomen Fahrzeugen angepasst sind. Hiervon betroffen sind auch die Routen, welche an das Fahrzeug übermittelt werden. Für die Berechnung von hochautonomen Routen - also Routen, welche einen größtmöglichen Anteil an Strecken berücksichtigen, welche autonom zurückgelegt werden können - sind sehr viele Informationen über die Infrastruktur notwendig, welche nicht vollständig ans Fahrzeug kommuniziert werden können. An dieser Stelle kann ein hybrider Routingansatz, wie er auch beim Strategischen Routing

eingesetzt wurde, angewendet werden, um zwischen Server und Fahrzeug zu kommunizieren.

8.1.3 Veränderungen durch vollautomatisiertes Fahren

Wird das hochautonome Fahren zu einem vollautonomen Fahren weiterentwickelt, so hat auch dieser Entwicklungsschritt Bedeutung für das Strategische Routing. Ist der Fahrer in der Lage, während der Fahrt anderen Tätigkeiten nachzugehen, wie beispielsweise Lesen, Fernsehen, Arbeiten oder Schlafen, so steigt auch die Bereitschaft größere zeitliche Umwege in Kauf zu nehmen. Dies würde für das Strategische Routing bedeuten, dass größere Umfahrungen oder sogar Zwischenhalte möglich wären, um den Verkehr effizient über ein Netz zu verteilen. Auch müssen Fahrten ggf. nicht mehr unbedingt zu einem bestimmten Zeitpunkt angetreten werden, so dass Teile des Verkehrs auch abseits von Spitzenstunden abgewickelt werden können. Zur Optimierung dieser Verkehrsverteilungen ist lokales Wissen über die Verkehrsinfrastruktur und die Verkehrseigenschaften der Städte notwendig, welche von den Verkehrsbetreibern selbst zu Verfügung gestellt und über eine Art Strategisches Routing in die Navigation integriert werden kann.

8.1.4 Forschungsprojekt Socrates 2.0

Eine der Kernherausforderungen im Strategischen Routing liegt in der Notwendigkeit der Zusammenarbeit von unterschiedlichen Navigationsherstellern und Straßenverkehrsbetreibern. Um einen überzeugenden Nutzen des Strategischen Routings zu erreichen, ist es notwendig eine große Anzahl von Straßenverkehrsbetreibern anzubinden. Um wiederum einen messbaren Einfluss auf das Verkehrsverhalten zu erzielen, müssen eine große Anzahl von Fahrzeugen ausgestattet werden. Das Forschungsprojekt Socrates 2.0 wurde von der Traffic Management 2.0 Initiative [TM 2.0 Executive, 2018] initiiert, um diese Zusammenarbeit zwischen Verkehrsbetreibern, Navigationsherstellern und Serviceprovidern voranzutreiben. Im Rahmen dieses Projektes werden die in dieser Arbeit entwickelten Ansätze aufgegriffen und insbesondere der in dieser Arbeit nicht betrachtete organisatorische Aufwand zur Beschaffung einer soliden Datengrundlage beleuchtet.

8.2 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde im Rahmen einer Literaturrecherche gezeigt, dass schon diverse Vorarbeiten und Untersuchungen zum Thema Strategisches Routing existieren. Daher wurde zunächst im Rahmen eines Erkundungsprojektes überprüft, warum bisher noch keine Integration von diesen Strategien in Navigationssysteme existiert. Dabei wurde festgestellt, dass an vielen Stellen Vereinfachungen getroffen wurden, welche eine flächendeckenden Integration verhindern. Diese Vereinfachungen wurden als Handlungsfelder definiert und detailliert betrachtet.

Das Erkundungsprojekt offenbarte, dass die Bewertung einer Route keineswegs eine triviale Aufgabe ist, da ggf. subjektive Einflüsse auf eine Routenbewertung existieren. Um ein besseres Verständnis hinsichtlich der Bewertung von Routen zu erhalten, wurde eine Nutzerstudie durchgeführt, bei welcher die Teilnehmer verschiedene Routen nach subjektiver Güte sortieren mussten. Die Auswertung erfolgte auf Basis eines Machine-Learning-Ansatzes und zeigte, dass neben der Länge und der Reisezeit der Route keine weiteren Faktoren relevanten Einfluss auf die Bewertung einer Route haben.

Anschließend wurden digitale Repräsentationen von Strategischen Routen erstellt. Diese wurden als Vorschläge zur Standardisierung in ein entsprechendes Format überführt. Es wurde ein Web-Editor erstellt, welcher in der Lage ist Strategien in diesem Format zu erstellen.

Eine wesentliche Herausforderung bei der Digitalisierung der Strategie stellt die Georeferenzierung, also die Abbildung der Route auf eine digitale Karte dar. Es existieren bereits diverse Ansätze zum Austausch zwischen Verkehrsinformationen zwischen zwei Karten. Das Verfahren openLR eignet sich grundsätzlich zum Austausch von Strategischen Routen zwischen zwei Karten, musste jedoch angepasst werden, um eine ausreichende Dekodierungsqualität zu erzielen. Hierzu wurde das Verhalten beim Setzen von Stützpunkten modifiziert und die Möglichkeit geschaffen unterschiedliche Parameter für verschiedene Randbedingungen zu verwenden.

Je nach Ausprägung einer Strategie lassen sich diese Strategien unterschiedlich im Routing berücksichtigen. Für alle Verkehrsteilnehmer allgemeingültige Strategien, welche messbare und damit definierte Auswirkungen auf den Verkehr haben, lassen sich einfach in existierende Routensuchalgorithmen wie den A*-Algorithmus integrieren. Hierfür wurde der A*-Algorithmus um eine zeitliche Komponente und eine Liste der Strategien erweitert. Die Integration von fahrerrelationsabhängigen Strategien wurde durch einen angepassten, beidseitigen A*-Algorithmus gelöst. Die Laufzeit des Algorithmus wurde erweitert, um den

relevanten Suchraum zu erfassen. Anschließend ist es möglich durch Kombination der Suchbäume die Strategische Route zu ermitteln.

Auf Basis der zuvor durchgeführten Entwicklungen wurde ein Routingserver aufgebaut, welcher in der Lage war sowohl strategische Fahrempfehlungen von Städten zu empfangen, als auch mit einem Versuchsfahrzeug zu kommunizieren. Eine im Fahrzeug berechnete Route wird automatisch an den Server übermittelt. Auf Basis der von Städten empfangenen Informationen wird durch den angepassten Algorithmus eine strategische Route berechnet. Weicht diese von den im Navigationsgerät berechneten Route ab, so wird sie an das Versuchsfahrzeug übermittelt und dort in die Routenführung übernommen.

Mithilfe dieses Prototyps wurden am Testfeld Allianz Arena Strategische Routen zur Befüllung des Parkhauses der Allianz Arena an das Backend übermittelt. Das Versuchsfahrzeug konnte je nach Schaltzustand der Wechselweganzeiger auf der Zufahrt zum Stadion, die jeweils gewünschte Route am Server abfragen und in die Navigation übernehmen.

Auf Basis der Strategien, welche im Projekt dMotion 2.3 erzeugt wurden, konnte ein Bewertungsverfahren für die Strategien entwickelt werden. Dieses Verfahren vergleicht die Verkehrsstrategien mit auf diesen Strecken ermittelten Floating Car Data und bestimmt, ob die Strategie über eine ausreichende Qualität verfügt. Nur so kann sichergestellt werden, dass Verkehrsteilnehmer nicht zu große Umwege fahren müssen, um der Strategie zu genügen. Dies könnte zu einer Ablehnung der Strategie führen.

Um die Auswirkungen von Strategischen Routen auf das Gesamtnetz zu betrachten, wurden zweistufig Verkehrssimulationen durchgeführt. Der Ausstattungsgrad der Verkehrsteilnehmer mit dem Strategischen Routing System hat Einfluss auf die im Gesamtnetz erzielten Reisezeitveränderungen. Zunächst wurde an einem einfachen Netz ermittelt, mit welchen Ausstattungsgraden die besten durchschnittlichen Reisezeitverbesserungen erzielt werden. Hierzu wurde in einem künstlichen Netz eine Verkehrsstörung simuliert, welche durch verschiedene Strategische Routen umfahren werden konnte. Die Ergebnisse zeigen, dass bei einem Ausstattungsgrad von ca. 20% die größte durchschnittliche Reisezeitersparnis erzielt werden kann. In diesem Fall können nicht nur Verbesserungen bei den Verkehrsteilnehmern festgestellt werden, welche mit dem System ausgestattet sind, sondern auch Verkehrsteilnehmer mit normalem Navigationssystem oder ganz ohne Navigationssystem profitieren im Durchschnitt von der Verfügbarkeit des Systems.

Die Erkenntnisse aus der vereinfachten Simulation wurden auf ein großes Verkehrsnetz der Stadt Hannover übertragen. Auch bei dieser Simulation wurde eine Verkehrsstörung durch Strategische Routen umfahren. Ebenso konnte bei dieser

Simulation ein durchschnittlicher Reisezeitvorteil für das Gesamtnetz bewirkt werden. Auch die Verkehrsteilnehmer aller untersuchten Ausstattungsvarianten profitierten im Schnitt von Strategischen Routing. Für die betroffenen Verkehrsteilnehmer konnten Reisezeiteinsparungen von bis zu 23 % erzielt werden. Die Simulationen zeigten aber auch, dass sowohl die für die Reisezeiteinsparung, als auch die für den Ausstattungsgrad ermittelten Werte, stark von der gegebenen Infrastruktur und den gewählten Strategien abhängig ist.

Im Ausblick wurden die zukünftigen Einsatzmöglichkeiten dargelegt. Gerade in Hinblick auf die eingeführten Dieselfahrverbote oder den Wandel durch hochautonome Fahrzeuge bieten sich zukünftig vielfältige Verwendungsmöglichkeiten für das Strategische Routing.

Literaturverzeichnis

- [Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e. V. 2010] ALLGEMEINER DEUTSCHER AUTOMOBIL-CLUB E. V.: *Verkehrslage auf der Internetpräsenz des ADAC*. München, 2010 <http://maps.adac.de/>
- [ANTENNE BAYERN GmbH & Co. KG 2010] ANTENNE BAYERN GMBH & Co. KG: *Verkehrslage auf der Internetpräsenz von Antenne Bayern*. Ismaning, 2010 <http://www.antenne.de/verkehrsuebersicht.html>
- [Autobahndirektion Südbayern 2015] AUTOBAHNDIREKTION SÜDBAYERN: *Internetpräsenz der ABDS*. München, 2015 <http://www.abdsb.bayern.de/>
- [Bayerischer Rundfunk 2010] BAYERISCHER RUNDfunk: *Verkehrslage auf der Internetpräsenz des Bayerischen Rundfunks*. München, 2010 <http://www.br.de/nachrichten/verkehr/>
- [Beckmann et al. 1956] BECKMANN ET AL.: Studies in the economics of transportation. In: *Yale University Press*. New Haven, 1956
- [BMW Group Presse Club Deutschland 2011] BMW GROUP PRESSE CLUB DEUTSCHLAND: *Zuverlässig und präzise gegen den Stau*. München, 2011
- [Bogenberger 2003] BOGENBERGER, K.: Qualität von Verkehrsinformationen. In: *Straßenverkehrstechnik, Seite 518-526*. 10. Bonn : Kirschbaum Verlag GmbH, 2003
- [Bogenberger u. Neuherz 2006] BOGENBERGER, K. ; NEUHERZ, M.: Schlussbericht BMW AG. In: *Forschungsinitiative INVENT - Intelligenter Verkehr und nutzergerichte Technik*. München, 2006
- [Boltze u. a. 2008] BOLTZE ; PFAHL ; KITTLER: Der Verkehr im Jahr 2030. Version: 2008. <http://www.tt2030.com>. In: *Traffic and Transport 2030*. Darmstadt : DVWFG Nahverkehrsforum, 2008
- [Braess 1969] BRAESS, D.: Über ein Paradoxon aus der Verkehrsplanung. In: *Mathematical Methods of Operations Research*. Berlin : Springer Verlag, 1969
- [Brieter et al. 2010] BRIETER ET AL.: Mit Navi sicher in den Stau. In: *ADAC Motorwelt*. München : ADAC e. V., 2010

- [Bundesanstalt für Straßenwesen 2010] BUNDESANSTALT FÜR STRASSENWESEN: *MDM: Mobilitäts Daten Marktplatz / Projektskizze*. Bergisch Gladbach, 2010
- [Bundesanstalt für Straßenwesen 2015] BUNDESANSTALT FÜR STRASSENWESEN: *Maßnahmen zur Gewährleistung der Interoperabilität zwischen öffentlichem Verkehrsmanagement und individuellen Navigationsdiensten*. Bergisch Gladbach, 2015
- [Böhme et al., Amt für Verkehrsmanagement, Landeshauptstadt Düsseldorf 2009] BÖHME ET AL., AMT FÜR VERKEHRSMANAGEMENT, LANDESHAUPTSTADT DÜSSELDORF: *Projektschlussbericht Landeshauptstadt Düsseldorf*. In: *dMotion - Düsseldorf in Motion*. Düsseldorf, 2009
- [Cao u. et al. 2007] CAO, Z. ; ET AL.: *Learning to rank: from pairwise approach to listwise approach*. In: *Proceedings of the Twenty-Fourth International Conference for Machine Learning*. Beijing, 2007
- [Car 1996] CAR, A.: *Hierarchical Spatial Reasoning: Theoretical Consideration and its Application to Modeling Wayfinding*. Wien : Department of Geoinformation TU Wien, 1996
- [Cascetta et al. 1996] CASCETTA ET AL.: *A Modified Logit Route Choice Model Overcoming Path Overlapping Problems. Specification and some Calibration Results for Interurban Networks*. Lyon : International Symposium on Transportation and Traffic Theory, 1996
- [Chantelau u. Brothuhn 2010] CHANTELAU, K. ; BROTHUHN, R.: *Multimediale Client-Server-Systeme*. Berlin : eXamen.press, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010
- [Daganzo 1994] DAGANZO, C.: *The cell transmission model: A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory*. In: *Transportation Research Part B*, 28. Amsterdam : Elsevier B. V., 1994
- [Damrath 2005] DAMRATH, R.: *Graphen in der Bauinformatik*. Hannover : Institut für Bauinformatik, Leibniz Universität Hannover, 2005
- [Damrath u. Pahl 2000] DAMRATH, R. ; PAHL, P.: *Mathematische Grundlagen der Ingenieurinformatik*. Volume 1. Berlin : Springer Verlag, 2000
- [Dees et al 2010] DEES ET AL: *Defining and Computing Alternative Routes in Road Networks*. Karlsruhe : Karlsruhe Institute of Technology, 2010
- [Delling u. Wagner 2009a] DELLING, D. ; WAGNER, D.: *Pareto Paths with SHARC*. Dortmund : Proceedings of the 8th International Symposium on Experimental Algorithms, 2009

- [Delling u. Wagner 2009b] DELLING, D. ; WAGNER, D.: Time-Dependent Route Planning. In: *Robust and Online Large-Scale Optimization*. Karlsruhe, 2009 (Computer Science Vol. 5856, Seite 207-230)
- [Deutsches Institut für Normung e.V. 2011] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN EN ISO 14819-1:2011-08: Intelligente Transportsysteme - Verkehrs- und Reisein-formationsbotschaften über Verkehrsbotenschaftskodierung - Teil 1: Kodierprotokoll für Radiodatensysteme - Verkehrsbotenschaftskanal (RDS-TMC) unter Nutzung von ALERT-C*. Berlin, 2011
- [Dijkstra 1959] DIJKSTRA, E.: A note on two problems in connexion with graphs. In: *Numerische Mathematik 1*, Seite 269-271. Amsterdam, 1959
- [DriveNow GmbH & Co. KG 2015] DRIVENOW GMBH & Co. KG: *Internetpräsenz von DriveNow*. München, 2015 <https://de.drive-now.com/>
- [Eppstein 1994] EPPSTEIN, D.: Finding the k shortest paths. In: *Proceedings of the 35th Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science*, Seite 154-165. Santa Fe, 1994
- [European Broadcasting Union 2007] EUROPEAN BROADCASTING UNION: *Traffic and Travel Information Broadcasting - Language-independent TTI services for the European Citizen*. Le Grand-Saconnex, 2007
- [FGSV Arbeitskreis Fundamentaldiagramm, Kühne, et al. 2004] FGSV ARBEITSKREIS FUNDAMENTALDIAGRAMM, KÜHNE, ET AL.: *FGSV Merkblatt, das Fundamentaldiagramm - Grundlagen und Anwendung*. Berlin : Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., 2004
- [Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) 2010] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN (FGSV): *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS)*. Berlin, 2010
- [Frank u. Wolfe 1956] FRANK, M. ; WOLFE, P.: *An Algorithm for Quadratic Programming*. London : Report of the Department of Environment, 1956
- [Franke, et al. 2010] FRANKE, ET AL.: *Verkehrsmanagementsystem VAMOS im Großraum Dresden*. Dresden : TU Dresden, 2010 <http://www.vimos.org/downloads/Vortraege-Vimos-10/Franke.pdf>
- [Friedrich u. a. 2002] FRIEDRICH ; KESSLER ; SCHÜTTE: Strategisches Verkehrsmanagement - Eine konsistente Theorie und ihre Umsetzung. In: *Straßenverkehrstechnik*. Bonn : Kirschbaum-Verlag, 2002
- [Friedrich 2006] FRIEDRICH, B.: *Verkehrstechnik Vertiefungsstudium*. Hannover : Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Leibniz Universität Hannover, 2006

- [Geisberger u. a. 2012] GEISBERGER, R. ; SANDERS, P. ; SCHULTES, D. ; VETTER, C.: Exact Routing in Large Road Networks Using Contraction Hierarchies. In: *Transportation Science*, Seite 388-404. Catonsville : The Institute for Operations Research and the Management Sciences, 2012
- [Gevas Software GmbH 2009] GEVAS SOFTWARE GMBH: Projektschlussbericht GEVAS software GmbH. In: *dMotion - Düsseldorf in Motion*. Düsseldorf, 2009
- [Goldberg u. Harrelson 2005] GOLDBERG, A. V. ; HARRELSON, C.: Computing the Shortest Path: A* Search Meets Graph Theory. In: *Microsoft Research*. Redmond : Microsoft Corporation, 2005
- [Google LLC 2015] GOOGLE LLC: *Kartendaten von Google Maps*. Mountain View, 2015 <http://maps.google.de/>
- [Gosset 1908] GOSSET, W.: The Probable Error of a Mean. In: *Biometrika*. Oxford : Oxford University Press, 1908
- [Greenshields 1935] GREENSHIELDS, B.: A study in highway capacity. In: *Highway Research Board Proc. 14*, Seite 469-477. Washington, 1935
- [Hart u. a. 1968] HART, P. ; NILSSON, N. ; RAPHAEL, B.: A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. In: *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 1968
- [Here Global B.V. 2010] HERE GLOBAL B.V.: *Verkehrslage auf der Internetpräsenz der Firma HERE*. Veldhoven, 2010 <http://www.map24.de>
- [Here Global B.V. 2011] HERE GLOBAL B.V.: *Relational Database Format, Reference Guide*. Build Version 11.01. Eindhoven : Institut für Bauinformatik, Leibniz Universität Hannover, 2011
- [Here Global B.V. 2015] HERE GLOBAL B.V.: *Internetpräsenz der Firma HERE*. Eindhoven, 2015 <http://company.here.com/>
- [Hilliges 1995] HILLIGES, M.: *Ein phänomenologisches Modell des dynamischen Verkehrsflusses in Schnellstraßennetzen*. Aachen : Shaker-Verlag, 1995
- [Holte et al. 2016] HOLTE ET AL.: Bidirectional Search That Is Guaranteed to Meet in the Middle. In: *AAAI16 Proceedings of the Thirtieth AAAI Conference on Artificial Intelligence*. Phoenix, 2016
- [INDEX Information Services GmbH 2010] INDEX INFORMATION SERVICES GMBH: *Verkehrslage auf der Internetpräsenz von Verkehrsinfo.de*. Köln, 2010 <http://www.verkehrsinfo.de/>
- [INFRAMIX consortium 2018] INFRAMIX CONSORTIUM: *Internetpräsenz des EU Projektes Inframix*. 2018 <https://www.inframix.eu/>

- [Jones u. Brown 2009] JONES, A. ; BROWN, M.: *Choice Routing*. Cambridge : Cambridge Vehicle Information Technology Ltd., 2009
- [Järvelin u. Kekäläinen 2000] JÄRVELIN, K. ; KEKÄLÄINEN, J.: Ir evaluation methods for retrieving highly relevant documents. In: *Proceedings of the 23rd Annual International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval*, Seite 44-48. Athen, 2000
- [Kamvar u. a. 2003] KAMVAR ; SCHLOSSER ; GARCIA-MOLINA: The EigenTrust Algorithm for Reputation Management in P2P Networks. In: *Proceedings of the 12th International Conference on World Wide Web*. Budapest, 2003
- [Kayton 1990] KAYTON, M.: *Navigation – Land, Sea, Air and Space*. New York : IEEE Press, 1990
- [Kemper 2006] KEMPER, C.: *Dynamische Simulation des Verkehrsablaufs unter Verwendung statischer Verflechtungsmatrizen*. Hannover : Leibniz Universität Hannover, 2006
- [Kerner 2009] KERNER, B.: *Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control*. Berlin : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009
- [Kiermaier 2012] KIERMAIER, U.: *Entwicklung einer Webanwendung für die Erstellung und Pflege verkehrsbasierender Geo-Daten*. München : Hochschule München, 2012
- [Kim 2016] KIM, M. K. and K. K. and Kwon: Dynamic Vehicular Route Guidance Using Traffic Prediction Information. In: *Mobile Information Systems*. London : Hindawi Publishing Corporation, 2016
- [Kullback u. Leibler 1951] KULLBACK, S. ; LEIBLER, R. A.: On information and sufficiency. In: *Annals of Mathematical Statistics* 22. Beachwood, 1951
- [Kühne 1991] KÜHNE, R. D.: Traffic pattern in unstable traffic flow on freeways. In: *Highway Capacity and Level of Service*. Rotterdam : Balkema, 1991
- [Landeshauptstadt München, Referat für Stadtplanung und Bauordnung 2005] LANDESHAUPTSTADT MÜNCHEN, REFERAT FÜR STADTPLANUNG UND BAUORDNUNG: *Verkehrsentwicklungsplan der Stadt München*. München, 2005
- [leaflet 2017] LEAFLET: *Internetpräsenz der opensource Software leaflet*. 2017 <https://leafletjs.com/>
- [Lerner u. Kellermann 2010] LERNER ; KELLERMANN: *Projekt Strategisches Routing im Allacher Tunnel - Ergebnisbericht*. München : Pöyry Infra Traffic GmbH, 2010
- [Li 2011] LI, H.: *Learning to Rank for Information Retrieval and Natural Language Processing*. Morgan & Claypool Publishers, 2011

- [Liang u. Wakahara 2014] LIANG, Z. ; WAKAHARA, Y.: Real-time urban traffic amount prediction models for dynamic route guidance systems. In: *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. Berlin : SpringerOpen, 2014
- [Lighthill u. Whitham 1955] LIGHTHILL, M. J. ; WHITHAM, G. B.: *On kinematic waves: II. A theory of traffic on long crowded roads*. London : The Royal Society, 1955
- [Mathew u. Rao 2007] MATHEW, T. ; RAO, K.: Introduction to Transportation Engineering. In: *Traffic Assignment*. Bombay : Indian Institute of Technology Bombay, 2007
- [Matschke 2007] MATSCHKE, I.: *Einfluss dynamischer Navigation auf das Verkehrsgeschehen in städtischen Straßennetzen*. Hannover : Leibniz Universität Hannover, 2007
- [Melzer et al. 2005] MELZER ET AL.: *Service-orientierte Architekturen mit Web Services*. Berlin : Elsevier, 2005
- [MGN Ltd. 2011] MGN LTD.: London 2012 Olympics. (2011)
- [Mikolaschek u. Bozyazi 2005] MIKOLASCHEK ; BOZYAZI: Von TMC zu TPEG – ein Quantensprung für Mobilitätsdienste. In: *Medientage München*. München : ADAC e. V, 2005
- [Mobilitätsdatenmarktplace der Bundesanstalt für Straßenwesen 2012] MOBILITÄTSDATENMARKTPLACE DER BUNDESANSTALT FÜR STRASSENWESEN: *Datenmodell für strategiekonformes Routen Version 01-00-00*. Bergisch Gladbach, 2012
http://www.mdm-portal.de/download/mdm_datenmodell_strategicrouting_01-00-00.zip
- [MOBINET-Partner 2003] MOBINET-PARTNER: Abschlussbericht 2003, 5 Jahre Mobilitätsforschung im Ballungsraum München. In: *Mobilität im Ballungsraum München*. München : Landeshauptstadt München, Kreisverwaltungsreferat, 2003
- [Moore 1959] MOORE, E.: The shortest path through a maze. In: *Proceedings of the International Symposium on the Theory of Switching*. Cambridge (USA) : Harvard University Press, 1959
- [Navteq 2006] NAVTEQ: Schlussbericht Navteq. In: *Forschungsinitiative INVENT - Intelligenter Verkehr und nutzergerechte Technik*, 2006
- [Nicholson 1966] NICHOLSON, T. A. J.: Finding the shortest route between two points in a network. In: *The Computer Journal*, Seite 275-280. Oxford : Oxford University Press, 1966

- [Niedersächsische Landesbehörde für Straßenbau und Verkehr 2010] NIEDERSÄCHSISCHE LANDESBEHÖRDE FÜR STRASSENBAU UND VERKEHR: *Verkehrsmengenkarte Niedersachsen*. Hannover, 2010
- [Open Traffic Systems City Association 2017] OPEN TRAFFIC SYSTEMS CITY ASSOCIATION: *Website der Open Traffic Systems City Association*. Frankfurt, 2017 <http://www.oca-ev.info>
- [Park u. a. 2007] PARK ; BELL ; ET AL.: Learning user preferences of route choice behaviour for adaptive route guidance, Seite 159-166. In: *13th World Congress on Intelligent Transport Systems and Services*. London, 2007
- [Payne 1971] PAYNE, H. J.: *Models of freeway traffic and control*. San Diego : Simulation Councils Inc., 1971
- [Plackett 1975] PLACKETT, R. L.: The analysis of permutations. Series C (Applied Statistics). Newcastle upon Tyne : The Royal Statistical Society, 1975 (Journal of the Royal Statistical Society)
- [Pollesch 2011] POLLESCH, P.: *Intermodale Netzreferenzierung im Kontext eines europäischen Telematikansatzes*. Köln : Straßeninformationsbank Nordrhein-Westfalen, 2011 http://www.nwsib.nrw.de/downloads/nwsib_tage_2011/Intermodale%20Netzreferenzierung.pdf
- [Priogine u. Herman 1971] PRIOGINE, I. ; HERMAN, R.: *Kinetic Theory of Vehicular Traffic*. New York : Elsevier, 1971
- [Pöyry Deutschland GmbH 2015] PÖYRY DEUTSCHLAND GMBH: *Internetpräsenz der Firma Pöyry*. Mannheim, 2015 <http://www.poyry.de/>
- [Reuschel 1950] REUSCHEL, A.: Fahrzeugbewegungen in der Kolonne. In: *Zeitschrift des Österreichischen Ingenieur- und Architektur Vereins*. Wien, 1950
- [Rinke 2015] RINKE, N.: *Graphen und Netze. Skript zur Vorlesung Graphen und Netze*. Hannover : Leibniz Universität Hannover, 2015
- [Rodrigues et al. 2016] RODRIGUES ET AL.: The exchange of traffic management plans in TM 2.0. In: *Proceedings of the 11th ITS European Congress*. Glasgow, 2016
- [Rohde 2006] ROHDE, J.: *Bildung von Gleichgewichtszuständen in Verkehrsnetzen nach Nutzer- oder Systemoptimum*. Hannover : Leibniz Universität Hannover, 2006 <http://www.optiv.de/Fallbsp/04-Umlegung/04-Umlegung/04-Umlegung.pdf>
- [Sandrock u. Riegelhuth 2014] SANDROCK, M. ; RIEGELHUTH, G.: *Verkehrsmanagementzentralen in Kommunen - Eine vergleichende Darstellung*. Wiesbaden : Springer Vieweg Verlag, 2014

- [Schmidt u. Hoffmann 2010] SCHMIDT ; HOFFMANN: Projektschlussbericht ivh. In: *dMotion - Düsseldorf in Motion*. Hannover : Leibniz Universität Hannover, 2010
- [Schubert et al. 2014] SCHUBERT ET AL.: *Verkehrsverflechtungsprognose 2030 - Schlussbericht*. Berlin : Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2014
- [Sheffi 1985] SHEFFI, Y.: *Urban Transportation Networks*. Cambridge (USA) : Massachusetts Institute of Technology, 1985
- [Statista GmbH 2015] STATISTA GMBH: *Anteil der Autos die mit einem Navigationssystem ausgestattet sind im Jahr 2015 in Deutschland*. Hamburg, 2015 <https://www.statista.com/statistics/458176/number-owners-navigation-devices-germany/>
- [Sämman 2011] SÄMANN, R.: *Kürzeste Wegesuche unter dynamischen Nebenbedingungen*. Hannover : Institut für Bauinformatik, Leibniz Universität Hannover, 2011
- [Tanenbaum u. van Steen 2008] TANENBAUM, A. ; STEEN, M. van: *Verteilte Systeme. Prinzipien und Paradigmen*. 2. Auflage. Hallbergmoos : Pearson Studium, 2008
- [TM 2.0 Executive 2018] TM 2.0 EXECUTIVE: *Internetpräsenz der Traffic Management 2.0 Plattform*. 2018 <http://tm20.org/>
- [TomTom International B.V. 2012] TOMTOM INTERNATIONAL B.V.: *OpenLR White Paper Version 1.5*. Amsterdam, 2012 http://www.openlr.org/data/docs/OpenLR-Whitepaper_v1.5.pdf
- [Transport for London 2007] TRANSPORT FOR LONDON: *Traffic Operations in London - Keeping London moving by managing the way people and goods move around the capital's roads*. London : Communications Services, Surface Transport, 2007
- [Transport for London 2017] TRANSPORT FOR LONDON: *T-Charge: Emissions standards and zone*. London, 2017
- [Transportation Association of Canada 2006] TRANSPORTATION ASSOCIATION OF CANADA: *Performance Measures for Road Networks: A Survey of Canadian Use*. Ottawa : Transport Canada, 2006
- [Transportation Research Board of the National Academies of Science, USA 2000] TRANSPORTATION RESEARCH BOARD OF THE NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCE, USA: *HCM 2000, Highway Capacity Manual*. Washington, 2000
- [Traveller Information Services Association 2015] TRAVELLER INFORMATION SERVICES ASSOCIATION: *Internetpräsenz der TISA*. 2015 <http://www.tisa.org/>

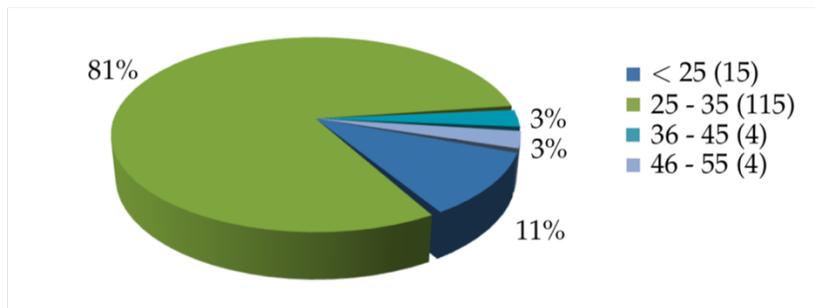
- [TSS - Transport Simulation Systems 2010] TSS - TRANSPORT SIMULATION SYSTEMS: *Microsimulator and Mesosimulator Aimsun 6.1 User's Manual*. Barcelona, 2010
- [Verkehrsinformationsagentur Bayern GmbH 2010] VERKEHRSINFORMATIONSSAGENTUR BAYERN GMBH: *Verkehrslage auf der Internetpräsenz der VIB*. München, 2010 <http://www.bayerninfo.de/>
- [Vrancken et al. 2012] VRANCKEN ET AL.: DVM-Exchange, the Interoperability Standard for Network Management Systems. In: *Proceedings of the 19th ITS World Congress*. Wien, 2012
- [Wardrop 1952] WARDROP, J.: *Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research*. London : Institute of Civil Engineers, 1952
- [Wehner 2008] WEHNER, P.: *Routensuche mit Zwischenzielgebiete – Berechnung optimaler Routen in Straßennetzen*. Saarbrücken : Verlag Dr. Müller, 2008
- [Weiß et al. 2013] WEISS ET AL.: TP5 - Abschlussbericht – Teil A. In: *Sichere Intelligente Mobilität - Testfeld Deutschland*. Sindelfingen, 2013
- [Wiebel 2012] WIEBEL: Strategien für eine effiziente Abwicklung des Straßenverkehrs. In: *Intelligente Verkehrssystem in Bayern*. München : Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern, 2012
- [Wiedemann 1974] WIEDEMANN, R.: Simulation des Straßenverkehrsflusses. In: *Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe*. Karlsruhe, 1974
- [Witten u. Frank 2005] WITTEN, I. ; FRANK, E.: *Data Mining – Practical Machine Learning Tools and Techniques*. Second Edition. Amsterdam : Elsevier Inc., 2005
- [Wolfschmidt 2009] WOLFSCHMIDT, G.: *Sterne weisen den Weg*. Hamburg : Books on Demand GmbH, 2009 (Nuncius Hamburgensis – Beiträge zur Geschichte der Naturwissenschaften, Band 15)
- [Yen 1971] YEN, J.: Finding the K Shortest Loopless Paths in a Network. In: *Management Science Volume 17 Issue 11, Seite 712-716*. Catonsville : The Institute for Operations Research and the Management Sciences, 1971
- [Zlatkova 2012] ZLATKOVA, M.: *Machine Learning Algorithm for Evaluation of Alternative Routes in Urban Areas*. München : Technische Universität München, 2012

Anhang

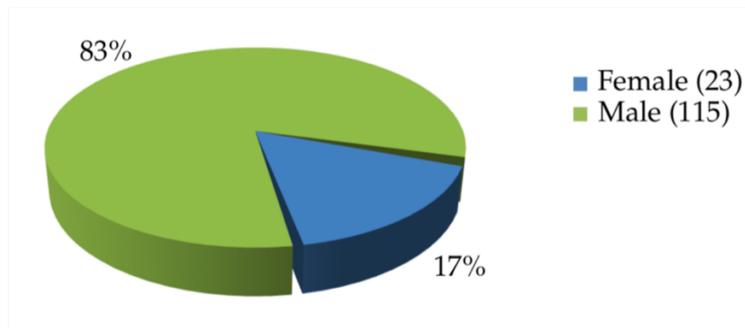
Meta-Daten zur Umfrage

Die Teilnehmer der in Kapitel 5.2.2 durchgeführten Umfrage sind in folgenden Diagrammen dargestellt.

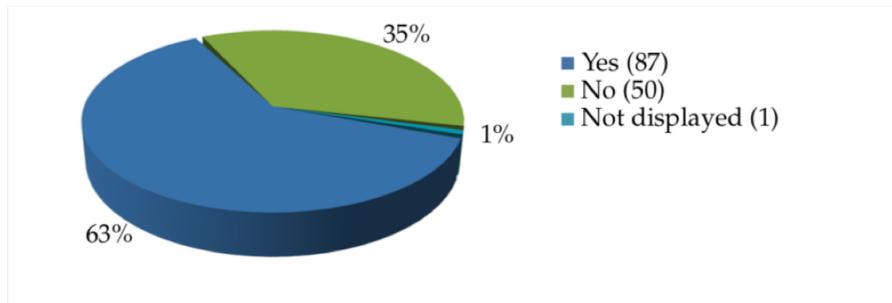
Alter



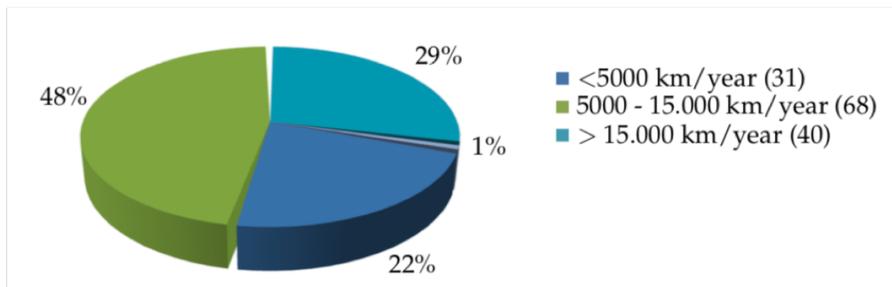
Geschlecht



Im Besitz eines Fahrzeugs



Fahrleistung



Ergänzungen zur OpenLR-Analyse

Folgender Parametersatz wurde bei der in Kapitel 5.6 genannten Analyse untersucht.

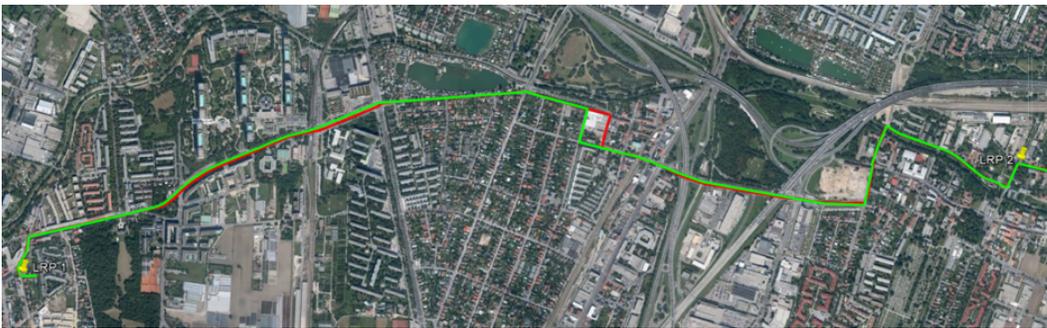
```
<BearingDistance>20</BearingDistance>
<MaxNodeDistance>100</MaxNodeDistance>
<NodeFactor>3</NodeFactor>
<LineFactor>3</LineFactor>
<FRC_Rating>
  <Excellent>100</Excellent>
  <Good>75</Good>
  <Average>50</Average>
  <Poor>0</Poor>
</FRC_Rating>
<FRC_Intervals>
  <Excellent>0</Excellent>
  <Good>1</Good>
  <Average>2</Average>
</FRC_Intervals>
<FOW_Rating>
  <Excellent>100</Excellent>
  <Good>50</Good>
  <Average>50</Average>
  <Poor>25</Poor>
</FOW_Rating>
<Bearing_Rating>
  <Excellent>100</Excellent>
  <Good>50</Good>
  <Average>25</Average>
  <Poor>0</Poor>
</Bearing_Rating>
<Bearing_Intervals>
  <Excellent>6</Excellent>
  <Good>12</Good>
  <Average>18</Average>
</Bearing_Intervals>
<FRC_Variance>2</FRC_Variance>
<MinimumAcceptedRating>700</MinimumAcceptedRating>
<MaxNumberRetries>3</MaxNumberRetries>
<SameLineDegradation>0.10</SameLineDegradation>
<ConnectedRouteIncrease>0.10</ConnectedRouteIncrease>
<DNPVariance>118</DNPVariance>
<maxBearingDiff>90</maxBearingDiff>
<Calc_Affected_Lines>false</Calc_Affected_Lines>
```

Im folgenden werden einige typische Fehler der OpenLR Dekodierung dargestellt.

Fehler aufgrund eines schlecht platzierten LRP.



Fehler aufgrund geringer Distanzunterschiede in den unterschiedlichen Karten.



Fehler aufgrund eines Kartenunterschieds, hier Einbahnstraße.

