

**EINFLUSS DYNAMISCHER NAVIGATION  
AUF DAS VERKEHRSGESCHEHEN  
IN STÄDTISCHEN STRAßENNETZEN**

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

**Doktorin der Ingenieurwissenschaften  
Dr.-Ing.**

**genehmigte Dissertation**

**von**

**Dipl.-Ing. Irina Matschke**

**geboren am 26.01.1976 in Bamberg**

**2007**

Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernhard Friedrich  
Koreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Friedrich  
Tag der Promotion: 13. April 2007

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover und als Doktorandin der Blaupunkt GmbH im Bereich Navigation. Diese Kombination bot mir die wunderbare Gelegenheit, mich sowohl in der wissenschaftlichen Welt bewegen zu dürfen, als auch die Regeln und Anforderungen der Industrie erleben zu dürfen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Bernhard Friedrich für die Unterstützung und die Übernahme des Referats. Darüber hinaus danke ich ihm für sein Vertrauen, seine Zuversicht und die Freiheit und die Ermöglichung eines vielfältigen wissenschaftlichen Austauschs.

Herrn Professor Dr.-Ing. Markus Friedrich danke ich für sein Interesse an der Arbeit und für die Übernahme des Koreferats. Seine kritischen Anmerkungen haben mich stets motiviert und waren für das Gelingen der Arbeit von besonderer Bedeutung.

Herrn Ulrich Kersken danke ich für die Betreuung bei Blaupunkt, bei der er mich nicht nur in Hinblick auf meine Arbeit unterstützt hat, sondern mir auch die Geschäftsanforderungen und Rahmenbedingungen der Industrie verdeutlicht hat. Die Freiräume, die er mir als mein Vorgesetzter geschaffen und eingeräumt hat, haben mir das Arbeiten sehr erleichtert.

Es gab es eine große Anzahl von Personen, die in vielerlei Hinsicht - beruflich wie auch privat – zu Entstehung dieser Arbeit beigetragen haben. Stellvertretend für all jene möchte ich an dieser Stelle meinen Kollegen am Institut und bei Blaupunkt für die Anregungen, die Diskussionen, die Anerkennung, die Unterstützung, die Motivation und die angenehme Atmosphäre danken.

Mein ganz herzlicher Dank gilt meinen Eltern, die mir bewusst gemacht haben, dass der größte Luxus die Freiheit zur geistigen Beschäftigung ist. Ohne ihre Unterstützung, ihr Verständnis und ihr Vertrauen in mich, hätte ich meine Ziele nicht verwirklichen können. Danke!

München, im April 2007

Irina C. Matschke



**Schlagworte:**

Navigation, Routenwahl, mikroskopische Simulation

**Key words:**

Navigation, route choice, microscopic simulation



## Kurzfassung

In den vergangenen Jahren ist die Verbreitung von individuellen Navigationssystemen für den Straßenverkehr stark angestiegen und wurde zu einer beeinflussenden Größe des Verkehrszustands. Navigation verändert die Routenwahl des einzelnen Verkehrsteilnehmers, so dass sich mit zunehmender Penetrationsrate navigierter Verkehrsteilnehmer die Belastungsverteilung und der gesamte Netzzustand verändert. Auf Grund der Abhängigkeiten von Routenwahl, Belastungsverteilung im Netz und daraus wiederum resultierender Entscheidung des einzelnen Verkehrsteilnehmers über seine Route hängt die Wirkung der Information über den Verkehrszustand und darauf aufbauender Zielführung in hohem Maße von ihrem Inhalt und ihrer Art und Aktualität, in der sie bereitgestellt wird, ab.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Analyse des Einflusses von Verkehrszustandsinformation und Zielführung auf die Routenwahl und deren Wirkung auf den Verkehrszustand. Der Fokus liegt auf der Identifizierung netzweiter Zusammenhänge speziell in städtischen Bereichen, da dort die feinteilige Struktur und die Überlagerung unterschiedlicher Einflüsse hohe Anforderungen an Informations- und Leitsysteme stellen. Die Analyse der Wirkungen von Navigation in diesen Gebieten liefert die Basis zur Identifizierung notwendiger Anpassungen der Systeme an die anderen örtlichen und verkehrlichen Randbedingungen, um darauf aufbauend die Richtung für effektive Weiterentwicklungen ableiten zu können.

Die Untersuchungen basieren auf einer modellmäßigen Betrachtung mittels mikroskopischer Simulation, wobei das Straßennetz von Hannover als Beispiel eines typisch städtischen Umfelds abgebildet wurde. Um möglichst realitätsnahe Verhaltensweisen in der Simulation zu erzeugen, wurden die unterschiedlichen Verhaltensweisen und Einflüsse, wie variierende Wahrnehmungen, Empfindungen und Bewertungen von Alternativen und Lernverhalten der Verkehrsteilnehmer, durch differenzierte Kosten- und Routenwahlansätze modelliert.

Um die Wirkung von Navigation abzustecken, wurden Szenarien generiert, die eine Variation der Aktualisierungsrate der Information und der Penetrationsrate der Fahrzeugflotte mit navigierten Verkehrsteilnehmern vornehmen, wobei der Einfluss sowohl bei normalen Verkehrszuständen wie auch bei unvorhergesehenen Störfällen getestet wurde.

Die durchgeführten Simulationsuntersuchungen zeigen den Rahmen auf, in welchem Maße die Zielführung von Verkehrsteilnehmern auf den Netzzustand und die resultierenden Reisezeiten Einfluss nehmen kann. Es zeigt sich, dass sich positive Wirkungen nicht nur für einzelne Verkehrsteilnehmer oder -gruppen erzielen lassen, sondern sich über das Gesamtnetz gesehen

Reisezeitreduzierungen einstellen. Es wird deutlich, dass die Fragestellung der Zielführung nicht unabhängig von dem vorliegenden Störereignis, dessen Dauer und der verfügbaren Erfassungsgenauigkeit betrachtet werden darf bzw. die Erfassung und Datenweitergabe auch daraufhin ausgelegt werden muss.

Für die Navigation in städtischen Bereichen werden hoch aufgelöste und aktuelle Daten in Zeitschritten nicht größer als fünf Minuten benötigt. Unter Voraussetzung dieser feinen zeitlichen Auflösung und einer flächendeckenden Erfassung des aktuellen Verkehrszustands lässt sich eine Gesamtreisezeitreduzierung in der morgendlichen Hauptverkehrszeit von maximal fünf Prozent erzielen.

Die Reisezeitvorteile stellen sich aber vornehmlich bei niedrigen bis mittleren Penetrationsraten von maximal 35 % navigierter Verkehrsteilnehmer ein. Bei höheren Ausstattungsraten setzt ein gegenseitiges Behindern der Fahrzeuge durch das zu gleichmäßig Verhalten ein, so dass die Gesamtreisezeiten wieder ansteigen und bei hohen und sehr hohen Prozentsätzen Navigierter (50 % und mehr) oftmals kein positiver Effekt mehr erzielt werden kann.

Der Penetrationsbereich, in dem maximale Gesamtreisezeitgewinne erzielt werden und der Umkehrbereich, ab dem sich sogar negative Auswirkungen für das Gesamtsystem ergeben, da der Anteil navigierter Fahrer zu groß wird und ein zu identisches Verhalten einsetzt, variiert stark in Abhängigkeit der Navigationsweise.

Die dynamische Navigationsweise, die eine flächendeckende Erfassung des Verkehrszustands voraussetzt, lässt die größten Reisezeitgewinne erzielen und ist bei einem kurzen Aktualisierungsintervall auch noch bei sehr hohen Ausstattungsraten von 75 % in der Lage, mit positiven Auswirkungen für das Gesamtsystem zu wirken.

Die heute gängige statische Navigation auf Basis durchschnittlicher Geschwindigkeitswerte vermag dagegen nicht auf ortsspezifische Gegebenheiten und unvorhergesehene Störungen zu reagieren, weshalb nur bei geringen Penetrationsraten bis etwa 15 % ein Reisezeitvorteil bewirkt werden kann. Größere Ausstattungsraten führen zu einer deutlichen Verschlechterung der Reisezeiten im Vergleich zum Referenzszenario, bei dem kein Fahrzeug navigiert ist, sowohl für den einzelnen Verkehrsteilnehmer wie auch in Hinblick auf das Gesamtsystem.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen auf, dass mit zunehmender Beliebtheit und entsprechend ansteigender Penetrationsrate von Navigationssystemen eine entscheidende Weiterentwicklung der Zielführungssysteme notwendig wird. Dies betrifft zum einen die Datenbasis, die der Navigation zur Verfügung gestellt wird, und zum anderen die Strategie der Routenauswahl des Navigationssystems selbst.

## **Abstract**

In recent years the penetration of individual navigation systems in cars has highly increased and become an important factor influencing traffic state. Navigation system influences the route choice behaviours of individual road users and in turn determines the distribution of traffic load as well as the traffic state of the entire network, especially in cases of growing penetration rate of navigated vehicles. As such, the impact of providing traffic state information and navigation on traffic state is strongly governed by information content, accuracy, and the respective refresh periods.

This thesis conducts an in-depth investigation into the influence of traffic information and navigation on route choice and its impact on traffic state. Focus is also made on identifying network-wide coherence especially in urban areas, since in these areas more complex network structures and the interaction of diverse driving related effects result in great demand on traffic information and management systems. The impact analysis of navigation on urban traffic can provide the basis to identify required system adaptations according to the on-site and the traffic related boundary conditions. The trend for further developments can thus be derived and assured.

The experiments examined on this thesis are based on microscopic vehicle simulation. In order to take realistic urban conditions into consideration, the road network of Hannover is chosen as the investigated network and built in a simulation model in detail. To simulate realistic traffic behaviours different factors, such as varying cognition, perception and evaluation of alternatives and learning mechanism of the individual drivers, were taken into account by introducing different route costs and route choice functions. Several scenarios with varying percentages of navigation-equipped drivers and with different update intervals of new information were examined. Based on that, network coherence was examined under normal traffic conditions as well as under unexpected traffic incidents.

The proposed simulation experiments show the magnitude of influence navigation systems have on traffic state and travel time. The results indicate that it is possible to reduce travel time by introducing navigation system not just for individual drivers but for the whole traffic system. It becomes obvious that selecting the most appropriate route should not be treated independently from interfering events. The corresponding duration and the available accuracy of detection, and the related data input and transmission must be also taken into consideration in accordance to the existence and the seriousness of incidents.

Furthermore, the navigation in urban areas needs highly disaggregated real-time data updates with time intervals no longer than five minutes. In assumption of a 100 % network-wide coverage of the real-time traffic state a maximum of five percent reduction in travel time in the morning peak hours can be achieved. The positive effects on the travel-time saving appear however primarily when the proportion of navigated drivers is not higher than 35 %. When the penetration rate of navigation system exceeds a certain amount, road users' behaviours become too identical with each other and vehicles will constrain each other. The respective travel time thus increase again. In cases of high and very high penetration rates of navigated drivers (50 % and more) a positive effect on time saving could not be achieved anymore.

With the help of simulation tool the range of the penetration rate, that leads to minimal travel time and causes negative effects on the whole system, could be analysed. Results show that travel time has a strong dependency on the navigation mode. Dynamic navigation, that needs a network-wide detection of traffic state, achieves the highest travel time reduction and has positive effects on the entire system. The same result can also be obtained in the cases of very high penetration rate of 75 % navigation-equipped vehicles with short update intervals of new information.

Presently, common static navigation, based on average speeds categorized by road class, cannot take specific local conditions and unexpected traffic incidents into consideration. Therefore, with the use of static navigation mode only a small amount of travel-time saving could be achieved, if only a few drivers (up to 15 %) are navigated. Higher penetration rate causes a significant increase in travel time in comparison to the reference scenario of 0 % navigation-equipped vehicles. Such a result applies to individual drivers as well as to the entire system.

Finally, the results of the simulation studies examined in this thesis also point out that with the increasing popularity and the growing penetration rate of navigation system an essential adaptation of the dynamic route guidance is necessary. Such an adaptation involves the modification of the current traffic-state database, which should be as comprehensive and accurate as possible, and the revision of the route guiding strategy, which takes other drivers' behaviours into account and is in accordance with varying traffic states.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Motivation</b> .....	<b>1</b>
1.1 Hintergrund.....	1
1.2 Problemstellung und Zielsetzung .....	3
<b>2 Methodik</b> .....	<b>5</b>
<b>3 Wirkungspotenziale von Verkehrsinformationen</b> .....	<b>11</b>
3.1 Hintergrund.....	11
3.2 Studien zur Wirkungsermittlung von Straßenverkehrsinformationen .....	11
3.3 Schlussfolgerungen für die Modellbildung.....	15
<b>4 Verkehrstelematik</b> .....	<b>17</b>
4.1 Definition und Kategorisierung von Verkehrstelematik.....	17
4.2 Telematikanwendungen im Straßenverkehr.....	18
4.3 Verkehrsfunk .....	19
4.3.1 Digitaler Verkehrsinformationsdienst – RDS-TMC .....	20
4.3.2 Aufbau von TMC-Meldungen .....	20
4.4 Navigationssysteme .....	22
4.4.1 Grundlagen .....	22
4.4.2 Marktdurchdringung von Navigationsgeräten .....	22
<b>5 Verkehrsmodelle</b> .....	<b>27</b>
5.1 Aufgaben von Verkehrsmodellen .....	27
5.2 Vier-Stufen-Modell.....	27
5.3 Klassifizierung von Verkehrsmodellen .....	28

5.4	Entscheidungsmodelle .....	29
5.5	Netzmodell .....	34
5.6	Routensuche .....	35
5.7	Bestimmung des Routensatzes .....	36
5.8	Verkehrsumlegungsmodelle.....	37
5.9	Modellierung des Verkehrsflusses .....	40
5.10	Mikroskopische Verkehrsflusssimulation .....	42
5.11	Verwendung der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation zur Bestimmung der Wirkungspotenziale von Verkehrsinformationen.....	42
<b>6</b>	<b>Beschreibung der verwendeten Verkehrsflusssimulationssoftware AIMSUN NG.....</b>	<b>43</b>
6.1	Systembeschreibung.....	43
6.1.1	Netzmodell.....	43
6.1.2	Verkehrsnachfrage.....	44
6.1.3	Daten für die Verkehrsregelung und -steuerung.....	44
6.2	Modellierung des Fahrerverhaltens.....	45
6.3	Dynamische Verkehrsumlegung .....	45
6.3.1	„Link“-Kosten .....	46
6.3.2	Routensuche.....	47
6.3.3	Routenwahl.....	47
6.4	Einbindung externer Applikationen .....	48
<b>7</b>	<b>Modellierung des Verkehrsverhaltens .....</b>	<b>49</b>
7.1	Grundannahmen .....	49
7.2	Differenzierung der Verkehrsteilnehmergruppen .....	51
7.3	Satz alternativer Routen.....	51
7.3.1	Differenzierung des Routensatzes.....	51
7.3.2	Beobachtetes Routenwahlverhalten .....	52
7.3.3	Modellmäßige Bestimmung alternativer Routen .....	55
7.4	Motive der Routenwahl .....	58
7.4.1	Faktoren der Routenwahl von Verkehrsteilnehmern im motorisierten Individualverkehr.....	58
7.4.2	Modellierung der Widerstände.....	61
7.5	Modellierung der Wegeentscheidung.....	70
7.5.1	Ausprägung des Entscheidungsmodells.....	71
7.5.2	Generierung des historischen Erfahrungsschatzes .....	80

---

<b>8</b>	<b>Aufbau der Simulationsstudie</b>	<b>99</b>
8.1	Inhalt und Vorgehensweise	99
8.2	Untersuchungsnetz Hannover	99
8.2.1	Abgrenzung und Abbildung des Untersuchungsgebiets	99
8.2.2	Verkehrsnachfrage	102
8.2.3	Modellkalibrierung	104
8.3	Szenarientwicklung	104
8.3.1	Normalfall	106
8.3.2	Störfall	106
<b>9</b>	<b>Untersuchungsergebnisse</b>	<b>111</b>
9.1	Bewertungsgrößen	111
9.2	Untersuchungsergebnisse bezogen auf das Gesamtsystem	112
9.3	Untersuchungsergebnisse einzelner Verkehrsbeziehungen	120
9.3.1	Normale Verkehrsverhältnisse	120
9.3.2	Störfälle	136
9.4	Rückschlüsse für die Anwendung von Navigation im städtischen Bereich	156
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>161</b>
	<b>Literatur</b>	<b>169</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>175</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>183</b>
	<b>Anhang</b>	<b>185</b>
A	Modellierung des Fahrerverhaltens	185
B	Erforderlicher Stichprobenumfang	190
C	Kalibrierung der Simulation	191
D	Meldeverlauf ausgestrahlter TMC-Verkehrsmeldungen	193
E	Untersuchungsergebnisse einzelner Verkehrsbeziehungen	194



# 1 Motivation

## 1.1 Hintergrund

Das Verkehrsgeschehen wird durch eine Vielzahl von Gegebenheiten geprägt, die sich aus den wesentlichen politischen, wirtschaftlichen, sozialen, regionalen und verkehrsstrukturellen Rahmenbedingungen ergeben. Verkehr stellt sich als Überlagerung von Ortsveränderungen einzelner Personen oder Güter dar. Da es meist mehrere Möglichkeiten gibt, die Ortsveränderung zu realisieren, bringt jede Fahrt einen Entscheidungsprozess mit sich. Das kollektive Ergebnis aller individuellen Entscheidungen hat wiederum Bedeutung für die Allgemeinheit, da die Überlagerungen der Ortsveränderungen der einzelnen Personen die Umwelt, in der wir leben, prägen. Verkehrsstauungen sind ein Beispiel dafür, wie die Summe der Reaktionen der Verkehrsteilnehmer die Qualität des Umfelds bestimmen kann.

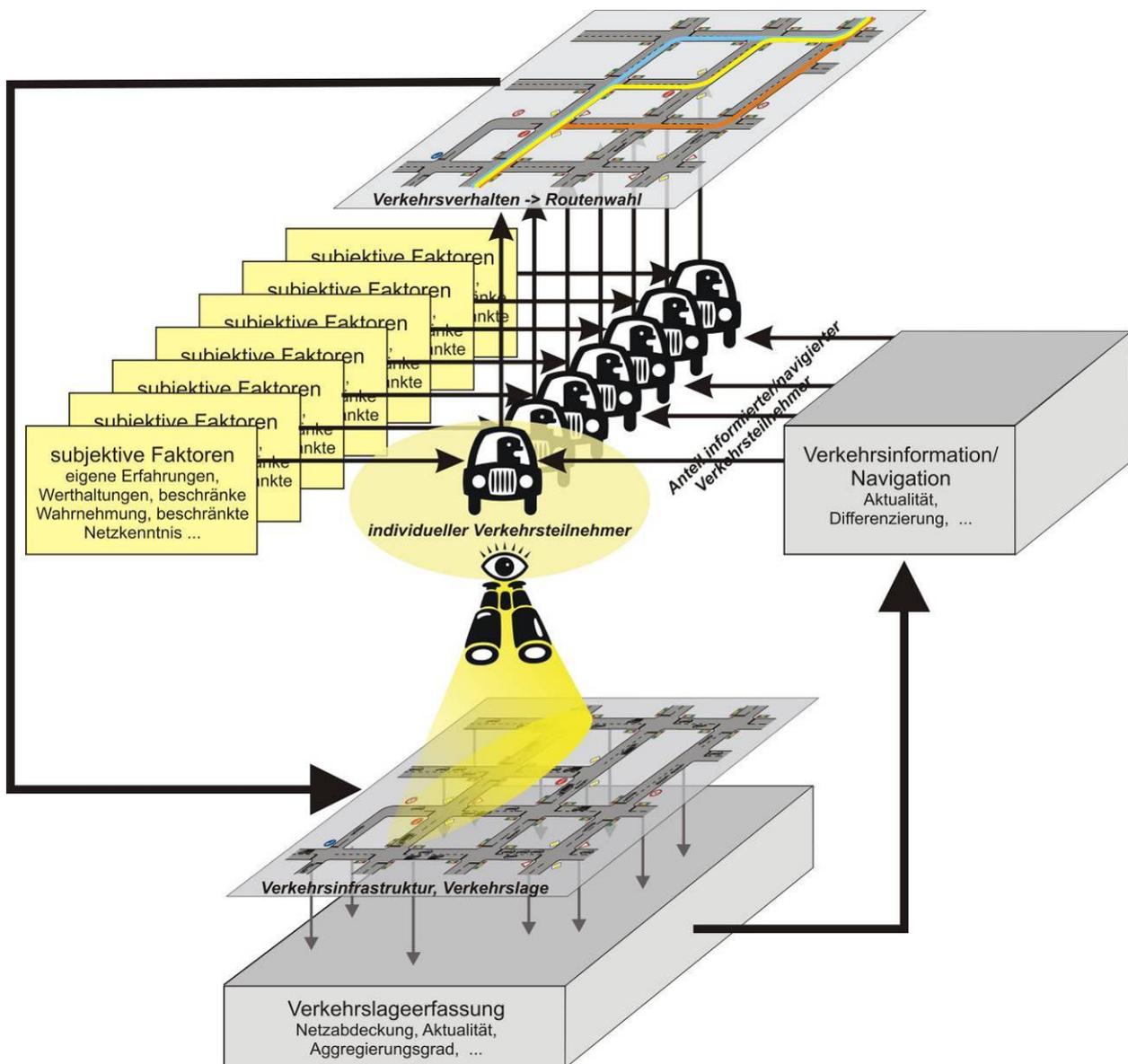
Der Grund von Ortsveränderungen liegt in der Befriedigung der unterschiedlichen individuellen Bedürfnisse, die durch „innere“ Faktoren geprägt sein können, aber auch von den Gegebenheiten der sozialen und natürlichen Umwelt bestimmt werden.

Der Aktivitätenbedarf und die Aktivitätenmuster einer Person sind durch eine Reihe objektiver, aber auch subjektiver Faktoren geprägt. Objektive Einflussfaktoren sind sozio-demografische Merkmale einer Person (z. B. Alter, Geschlecht, Erwerbstätigkeit, Einkommen, Haushaltsgröße, etc.) und räumliche und zeitliche Merkmale des Aktionsraums (z. B. Öffnungs- und Arbeitszeiten, Lage, Preise, etc.) und des Verkehrssystems (z. B. Fahrtdauer, Ausstattung, Komfort, etc.). Mit Hilfe der objektiven Einflussgrößen lässt sich somit der Rahmen, in dem sich das Verkehrsverhalten einer Person abspielt, beschreiben, da vor allem die „Pflichtaktivitäten“ wie beispielsweise Arbeiten, hinsichtlich ihres zeitlichen Entstehens und des Reiseziels relativ gut nachvollziehbar sind.

Subjektive Faktoren sind demgegenüber geprägt von den Gewohnheiten bzw. den sozialen Werthaltungen, wobei gerade die subjektiven Einschätzungen auch von dem jeweiligen Informationsstand der Person über das Verkehrsnetz und über den aktuellen Verkehrszustand abhängen. Dabei hat ein Verkehrsteilnehmer im Allgemeinen eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Auswahl, um an sein gewünschtes Ziel zu gelangen. Allerdings sind ihm wohl meist nicht alle Alternativen parat, weshalb er aus einer Unteranzahl auswählen wird. Somit fällt der Einzelne auf Basis seines mehr oder weniger eingeschränkten Kenntnisstands über das Verkehrsangebot und die Verkehrslage seine Wahl. Entscheidungsgrundlage ist also ein subjektiv ver-

zertes Bild, das, bedingt durch die individuelle Wahrnehmung, durch Transformation der objektiven Situation entsteht. Das Erleben der Situation kann aber einen Lernprozess bewirken, der zu Korrekturen der Wahrnehmung führt und somit eine Veränderung des Verhaltens nach sich zieht.

Die Verkehrsinformation und als erweiterter Dienst die Navigation zielt darauf ab, dem Einzelnen einen Vorteil bei seiner Fahrtabwicklung zu verschaffen. Da der individuelle Verkehrsteilnehmer nicht unabhängig vom Gesamtsystem ist, wirken sich die einzelnen Veränderungen abhängig von der Penetrationsrate, also dem Anteil der Fahrzeuge der gesamten Flotte mit Navigationsgerät, unterschiedlich stark auf die sich einstellende Verkehrslage aus. Diese wird wiederum mit Detektionseinrichtungen erfasst, als aktuelle Verkehrsmeldung in der dynamischen Navigation berücksichtigt und dem Einzelnen weitergegeben. Eine grafische Verdeutlichung der Beeinflussung des Verkehrszustands durch Verkehrsinformation und Navigation in diesem Kreisprozess zeigt Bild 1.1.



**Bild 1.1: Beeinflussung des Verkehrszustands durch Verkehrsinformation/ Navigation**

Um die Komplexität, die sich aus der Vielzahl von individuell geprägten Entscheidungen bedingt, analysieren und als Folge auch Handlungsstrategien ableiten zu können, ist eine Betrachtung notwendig, die einerseits das individuelle Verhalten einzelner Personen bzw. Personengruppen erfasst, andererseits aber auch den Zusammenhang des Verkehrsgeschehens in einem gesamten Verkehrsnetz herstellen kann.

Die Kenntnis der Zusammenhänge und der Auswirkungen des Verkehrs bildet die Voraussetzung, um sinnvoll auf das Verkehrsgeschehen einwirken zu können. Die Maßnahmen zur Beeinflussung lassen sich grundsätzlich in die Bereiche der Verkehrsinformation (z. B. Verkehrsfunk, Parkinformationssysteme), der Verkehrslenkung (z. B. Wechselwegweisung, Navigation) und der Verkehrsregelung (z. B. verkehrssteuernde Maßnahmen wie Lichtsignalanlagen oder Streckenbeeinflussungsanlagen, preispolitische Maßnahmen wie Maut) untergliedern, die jeweils einzeln, aber auch ergänzend eingesetzt werden können.

Preispolitische Maßnahmen zielen dabei vornehmlich auf eine Verringerung, zeitliche oder räumliche Veränderung der Verkehrsnachfrage sowie eine Beeinflussung der Verkehrsmittelwahl ab. Verkehrssteuernde Maßnahmen versuchen hingegen auf den bereits vorhandenen Verkehr stabilisierend, vergleichmäßigend und entzerrend einzuwirken. Demgegenüber können Verkehrsinformationen sowohl auf die Verkehrserzeugung wie auf die einzelnen Stufen des Verkehrsablaufs Einfluss nehmen.

## **1.2 Problemstellung und Zielsetzung**

Um die verkehrliche Wirksamkeit der unterschiedlichen Maßnahmen und somit auch bevorzugter Einsatzstrategien beurteilen und entwickeln zu können, ist eine begrenzte Betrachtung einzelner Streckenzüge nicht mehr ausreichend, da der Wirkungshorizont weiter reichend ist. Netzweite Veränderungen im Verkehrsverhalten drücken sich vor allem in der unterschiedlichen Routenwahl der einzelnen Verkehrsteilnehmer aus, aus der sich wiederum die Belastungsverteilung und der gesamte Netzzustand bestimmen. Auf Grund der Abhängigkeiten von Routenwahl, entsprechender Belastungsverteilung im Netz und daraus wiederum resultierender Entscheidung des einzelnen Verkehrsteilnehmers für eine Route ist die Kenntnis über den aktuellen Verkehrszustand entscheidend für die Funktionsweise und Wirksamkeit verkehrstechnischer Maßnahmen, aber auch bestimmend für das subjektive Verkehrsverhalten des Einzelnen.

Die Kenntnis von Routen und die Entscheidung zur Routenwahl sind Aspekte, die nicht nur den individuellen Verkehrsteilnehmer betreffen. Während der Einzelne daran interessiert ist, seinen eigenen Weg zu optimieren, ist das öffentliche Bestreben auf alle Bewegungen innerhalb eines Verkehrsnetzes ausgerichtet. Entsprechend wird versucht, das Verkehrsverhalten so zu beeinflussen, dass die Wege benutzt werden, die aus einer übergeordneten Systemsicht am sinnvollsten sind.

Im Sinne eines Verkehrsmanagements soll eine effiziente Routenwahl dazu beitragen, das Verkehrssystem zu entlasten. Dazu wurden in den vergangenen Jahren verstärkt verkehrstechnische Maßnahmen eingesetzt, wobei der Einsatz neuer Informations- und Kommunikationstechniken zu breiteren Gestaltungsmöglichkeiten führt. Zudem wird versucht, die Qualität durch Dynamisierung der den Systemen zugrunde liegenden Modelle zu verbessern. Wobei mit „Dynamisierung“ die Einbeziehung oder Erweiterung des Umfangs sowie die Verbesserung der Aktualität der verwendeten Daten in Raum und Zeit verstanden wird.

Die anwachsende Verbreitung kollektiver Systeme und die zunehmende Marktdurchdringung individueller Navigations- und Informationssysteme beeinflusst und verändert das Fahrerverhalten, in diesem Fall die Routenwahl. Eine differenzierte Wirkungsabschätzung ist somit wesentliche Voraussetzung für die Entwicklung effektiver Informations- und Steuerungsstrategien.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die verkehrliche Wirkung von Verkehrszustandsinformation des motorisierten Individualverkehrs unter unterschiedlichen Randbedingungen, wie etwa dem Informationsgrad der Verkehrsteilnehmer über den aktuellen Verkehrszustand, der Aktualität der offerierten Daten und unvorhergesehener Störungen, zu analysieren, ohne dabei speziell auf einzelne Verfahren, die zur Informationsverbreitung eingesetzt werden können, einzugehen. Die mit heute gängigen Methoden erreichbare Informationsqualität wird jedoch erläutert und durch Abbildung momentan üblicher Verkehrsinformationsgüte und möglicher Verfeinerungen bis hin zu idealen Informationszuständen soll das Wirkungspotenzial verdeutlicht werden. Die Analyse der Veränderung des sich einstellenden Verkehrszustands dient der Identifizierung der Bereiche, in denen Verkehrsbeeinflussung durch Information und darauf aufbauender Navigation wirken kann, und soll Anwendungsspielräume und notwendige Entwicklungsrichtungen aufzeigen.

Dabei steht das Verkehrsverhalten speziell im städtischen Bereich im Fokus der Untersuchung. Denn gerade dort sind die Zusammenhänge zwischen offerierter Verkehrsinformation, Routenwahl und sich ergebendem Verkehrszustand kaum geklärt, da sich in zeitlich und räumlich kleinen Schritten eine Vielzahl von Faktoren überlagern, wobei aber gerade im städtischen Bereich eine besonders differenzierte Verkehrsbeeinflussung auf Grund des sensiblen Umfelds anzustreben ist.

## 2 Methodik

Verkehrsinformationsdienste sollen den Verkehrsteilnehmer in seiner Reiseplanung und seinem Entscheidungsprozess hinsichtlich Zielwahl, Abfahrtszeitwahl, Routenwahl, Vermeidung oder Umgehung von Verkehrsstauungen und Navigation unterstützen, um die Effizienz des Verkehrssystems zu erhöhen. Die Wirkung der Information hängt dabei in hohem Maße von ihrem Inhalt und ihrer Art und Aktualität, in der sie bereitgestellt wird, ab.

Der Einfluss von aktueller Verkehrszustandsinformation auf die Routenwahl wurde bislang fast ausschließlich in Bezug auf einzelne Systeme und auf einen lokal stark begrenzten Netzausschnitt untersucht. Die Ausrichtung war dabei meist auf Strecken des übergeordneten Straßennetzes gerichtet, da dies die derzeit vornehmlichen Einsatzbereiche sind.

Verkehrsprobleme treten häufig aber in städtischen Gebieten oder im Übergangsbereich zu städtischen Gebieten auf. Aufgrund der feinteiligeren Struktur und der Überlagerung unterschiedlicher Einflüsse gestaltet sich die Anwendung der Informations- und Leitsysteme in diesen Bereichen immer noch als schwierig. Eine Anpassung der Systeme an die anderen örtlichen und auch verkehrlichen Randbedingungen verlangt daher eine Analyse der Wirkung von Verkehrsinformationen in komplexeren städtischen Netzen, um darauf aufbauend die Richtung für effektive Weiterentwicklungen ableiten zu können.

Die Untersuchung des Routenwahlverhaltens bei unterschiedlichen Einflussgrößen und Randbedingungen ist empirisch nicht bzw. nur mit sehr großem Aufwand möglich, weshalb sich im Rahmen der vorliegenden Arbeit mit einer modelltechnischen Betrachtung beholfen wird. Es wird das Hilfsmittel der mikroskopischen Simulation verwendet, da damit Verhaltensweisen differenziert abgebildet und auch in ihren dynamischen Ausprägungen untersucht werden können. Um den Bezug und die Übertragung zwischen Modell und Realität herzustellen, wird ein bestehendes städtisches Netz ausgewählt und mit seinen dort vorliegenden Randbedingungen in der Simulation abgebildet.

Zur Identifizierung der Verkehrsbeeinflussung durch Information bzw. Navigation bedarf es zunächst einer möglichst realitätsgetreuen Abbildung der nicht navigierten Fahrer, denen das veränderte Verhalten und seine Wirkungsausprägungen gegenübergestellt werden kann. Dies wird im Rahmen dieser Arbeit durch Modellierung von zwei verschiedenen Verkehrsteilnehmergruppen, den nicht navigierten und den navigierten Fahrern, vollzogen.

Sie unterscheiden sich durch die Art der Information, die ihnen über den Verkehrszustand zur Verfügung steht. Aber nicht nur die Information selbst, sondern auch die Weiterverarbeitung und die unterschiedlichen Verhaltensweisen bei der Entscheidung, wie unterschiedliche Wahrnehmungen, Empfindungen und Bewertungen von Alternativen und das Lernverhalten durch mehrmaliges Befahren, führen zu unterschiedlichem Routenwahlverhalten.

Nicht navigierte Verkehrsteilnehmer treffen ihre Routenentscheidung auf Basis subjektiver Bewertung und begrenzter Kenntnis der aktuellen Verkehrssituation. Die Motive, die dabei bei der Bewertung herangezogen werden, können von Individuum zu Individuum unterschiedlich und verschieden gewichtet sein. Zur modelltechnischen Abbildung der unterschiedlichen Bewertung der einzelnen Netzelemente in der mikroskopischen Simulation werden daher nach Fahrzeugtypen differenziert unterschiedliche Widerstandsfunktionen, die mehrere Einflussfaktoren berücksichtigen, modelliert.

Den nicht navigierten Verkehrsteilnehmern wird unterstellt, dass sie ortskundig sind und daher einen historischen, wenn auch subjektiv geprägten und somit mit Fehleinschätzungen behafteten Erfahrungsschatz besitzen, der ihnen Grundlage zur Routenentscheidung ist. Navigierte Verkehrsteilnehmer erhalten demgegenüber in bestimmten Zeitintervallen exakte Informationen über aktuelle Reisezeiten auf den unterschiedlichen Routen und wählen immer die günstigste Alternative. Sie wechseln auch während der Fahrt ihre Route, wenn ihnen eine andere Alternative als bessere offeriert wird.

Durch Simulation verschiedener Situationen, in denen der Anteil der nicht navigierten gegenüber den navigierten Fahrern stufenweise variiert wird, wird analysiert, ob es bestimmte Bereiche gibt, in denen sich ein Zuwachs informierter Verkehrsteilnehmer besonders positiv auf die Verkehrslage auswirkt, ob sich die Beeinflussung ab einer gewissen Ausstattungsrate abschwächt oder ob sogar negative Einflüsse, etwa einer Stauverlagerung durch den Wechsel der navigierten Fahrzeuge auf die gleiche Alternativroute, erkennbar werden. Die Analyse ist dabei auf das sich einstellende Reisezeitniveau gerichtet, aber auch auf dessen Schwankungsbereich, so dass Rückschlüsse auf die Stabilität und Vergleichmäßigung des Verkehrsflusses gezogen werden können.

Neben dem Anteil navigierter Verkehrsteilnehmer wirkt sich auch die Art und die Genauigkeit der Information auf den dadurch erzielbaren veränderten Verkehrszustand aus, da auf dynamische Änderungen entsprechend rasch und unter unterschiedlich umfassender Einbeziehung des umliegenden Netzes reagiert werden kann. So kann ein unter bestimmten Bedingungen als bester identifizierter Weg durch die dynamischen Änderungen des Verkehrszustands zu einem darauf folgenden Zeitpunkt nicht mehr die günstigste Alternative darstellen. Werden aber weiterhin veraltete und nicht mehr zutreffende Informationen gegeben, kann dies im ungünstigsten Fall sogar eine Verschlechterung des Verkehrszustands gegenüber dem Zustand, der sich ohne Information einstellen würde, bewirken. Durch Variation des Zeitintervalls, in dem Informationen offeriert werden, werden Erkenntnisse gewonnen, welche zeitliche Sicherheit Informationen haben sollten bzw. welche Aktualisierungsrate bei der Informationsverbreitung angestrebt werden sollte, um eine möglichst positive Wirkung auf den Verkehrszustand erreichen zu können.

Die diesen Simulationsexperimenten unterstellte präzise Navigation setzt aber voraus, dass eine flächendeckende und zeitlich fein differenzierte Erfassung des Verkehrs vorliegt. Dies ist

ein Zustand, der heutzutage nicht vorhanden ist und in dieser Form in Zukunft wohl auch nur schwerlich zu erreichen sein wird. Die Identifizierung dieser Extrempunkte dient aber dem Aufspannen des potenziell möglichen Wirkungshorizonts von Verkehrszustandsinformationen und darauf basierender Navigation bei idealen Datengrundlagen, maximalen Ausrüstungszuständen und striktem Befolgen der Routenvorschläge.

Um den idealisierten Zuständen aber auch heute reale Gegebenheiten detailliert gegenüberstellen zu können, werden Simulationsexperimente durchgeführt, die von den derzeit üblichen Bedingungen ausgehen, nämlich dem Vorliegen statischer Informationen, lediglich in Teilen ergänzt durch aktuelle, dynamische Werte. Statische Navigation bedeutet, dass die Routenbestimmung auf einem Netz stattfindet, dem lediglich Durchschnittswerte von Geschwindigkeiten bzw. Reisezeiten, die unter normalen Verkehrsbedingungen vorliegen und entsprechend der Straßenklasse abgestuft sind, hinterlegt sind.

Es werden auf der einen Seite Szenarien generiert, die den gewöhnlichen Verkehrszustand zur morgendlichen Hauptverkehrszeit nachbilden, demgegenüber aber auch solche, die unvorhergesehene Störfälle, wie etwa die temporäre Blockade eines Fahrstreifens, beinhalten. Durch Analyse der Veränderung der sich einstellenden Verkehrszustände werden die Bereiche identifiziert, in denen Verkehrsbeeinflussung durch Information und darauf aufbauende Navigation bei unterschiedlichen Ereignissen in Abhängigkeit der Ausstattungsdaten und der Aktualisierungsintervalle wirken können. Als Bewertungsgrößen werden hauptsächlich Reisezeiten verwendet. Zudem wird die Aufteilung auf die unterschiedlichen Routen betrachtet, um eventuelle Verlagerungseffekte identifizieren zu können. Bei der Bewertung stehen somit nicht die einzelnen Verkehrsteilnehmer im Fokus der Betrachtung, sondern die Wirkungen auf Fahrzeugkollektive und auf den gesamten Netzzustand.

Anhand des Szenarienvergleichs werden sinnvolle und bevorzugte Anwendungen von Navigation im städtischen Bereich abgeleitet, der Zusammenhang zur benötigten Genauigkeit und Aktualität der Verkehrsdaten hergestellt und noch notwendige Entwicklungsrichtungen aufgezeigt.

Im Einzelnen gliedert sich die Arbeit wie folgt:

In Kapitel 3 werden relevante Forschungsarbeiten aus dem Bereich der Verkehrsbeeinflussung durch Straßenverkehrsinformationen dargestellt. Die unterschiedlichen Ansätze und Versuchsaufbauten werden hinsichtlich ihrer Erkenntnisse analysiert. Noch offene Fragen werden aufgezeigt und darauf aufbauend Schlussfolgerungen für den simulativen Modellansatz dieser Arbeit gezogen.

Die Verkehrstelematik besitzt unterschiedliche Anwendungsfelder und ist stetigen Veränderungen unterworfen. Zur Einordnung der in dieser Arbeit behandelten Fragestellungen in das Gesamtfeld Verkehrstelematik, wird in Kapitel 4 eine Kategorisierung gegeben und die unterschiedlichen Anwendungen im Straßenverkehr kurz aufgezeigt. Die individuelle dynamische Zielführung als Anwendungsbereich der Verkehrstelematik basiert heutzutage auf statischen Daten, die durch einzelne lokale Meldungen über den aktuellen Verkehrszustand ergänzt werden. Dieses Verfahren ermöglicht nur bedingt eine differenzierte Verkehrsinformation. Um bestehende Defizite zu verdeutlichen, wird die historische Entwicklung des Verkehrsfunks und der darauf aufbauenden Navigation aufgezeigt und heute übliche Standards vorgestellt. Als

Basis zur Ableitung notwendiger Entwicklungen werden zur Abschätzung der Bedeutung des Marktes für Navigation vergangene Entwicklungen und Zukunftserwartungen dargestellt.

Die im Rahmen dieser Arbeit vollzogenen Untersuchungen basieren auf einer modellmäßigen Betrachtung mittels mikroskopischer Simulation. Da ein Modell immer eine Abstraktion bedeutet, ist eine richtige und hinreichend genaue Wiedergabe der Wirkungszusammenhänge für die Brauchbarkeit des Modells entscheidend. In Kapitel 5 wird auf einige Grundlagen und die Strukturierung von Verkehrsmodellen eingegangen. Die Ausrichtung ist dabei auf die Modelle gerichtet, die einen entscheidenden Einfluss auf die Herangehensweise und den Aufbau der Untersuchung haben. Da auch die programmspezifische Umsetzung der Modelle den Untersuchungsaufbau mitbestimmt, werden in Kapitel 6 entsprechende Grundzusammenhänge und Eigenarten des in der vorliegenden Arbeit verwendeten Softwarepakets AIMSUN NG erläutert.

Die Modellierung des Verkehrsverhaltens bei unterschiedlichem Kenntnisstand der Verkehrsteilnehmer über das Netz lässt sich nicht nur durch Abbildung der offerierten Informationen in dem Modell beschreiben, sondern verlangt auch eine Betrachtung der unterschiedlichen Verhaltensweisen und Einflüsse bei der Routenwahlentscheidung, wie unterschiedliche Wahrnehmungen, Empfindungen und Bewertungen von Alternativen und Lernverhalten der Verkehrsteilnehmer. All diese Aspekte können für unterschiedliche Verkehrsteilnehmer bzw. Verkehrsteilnehmergruppen verschieden geartet sein, weshalb eine Differenzierung in nicht navigierte und navigierte Verkehrsteilnehmer erfolgt. Die Vorgehensweise, die Annahmen und Umsetzungen bei der Modellierung des Verkehrsverhaltens in der Simulation werden in Kapitel 7 erläutert. Dabei werden die Anzahl und Ausprägungen der Routen, unter denen der einzelne Verkehrsteilnehmer auswählt, aufgezeigt und die einzelnen Motive, die seine Routenwahl prägen, bestimmt. Es erfolgt eine modelltechnische Umsetzung durch Entwurf von nach Fahrzeuggruppen und Fahrzeugtypen differenzierter Kostenfunktionen, die zur Netzbewertung herangezogen werden und demzufolge die Routenwahl bestimmen. Der eigentliche Entscheidungsprozess zu einer Route ist bei den nicht navigierten gegenüber den navigierten Verkehrsteilnehmern anders geartet. Der iterative Prozess, der zur simulationstechnischen Umsetzung der subjektiv geprägten Entscheidung der Nicht-Navigierten auf Basis historischer Kenntnis erfolgt, wird erläutert. Das Schema der Routenwahl der navigierten Verkehrsteilnehmer sieht demgegenüber eine Offerierung des aktuellen mittleren Verkehrszustands vor, der aus der Simulation ausgelesen wird und in bestimmten Aktualisierungsintervallen, im Folgenden auch als Informationsintervall bezeichnet, weitergegeben wird. Die getroffenen Ansätze der Kosten- und Routenmodellierung werden anhand eines kleinen, einfachen Testnetzes dargestellt und die einzelnen Wirkungen und Zusammenhänge aufgezeigt.

In Kapitel 8 wird der Aufbau der Studie am Untersuchungsnetz von Hannover dargestellt, wobei auf die verwendeten Datengrundlagen hinsichtlich der Abgrenzung und Abbildung des Netzes und der hinterlegten Verkehrsnachfrage eingegangen wird. Der Kalibrierungsablauf wird bezüglich verwendeter Gütemaße und erreichter Übereinstimmungen beschrieben. Das Wirkungsspektrum der offerierten Informationen wird anhand unterschiedlicher Szenarien analysiert. Neben der Variation der Aktualisierungsrate und dem Anteil navigierter Verkehrsteilnehmer wird eine Differenzierung in normale Verkehrsverhältnisse und in unvorhergesehene Störfälle vorgenommen.

Die Analysen und Ergebnisse der Simulationsstudie werden in Kapitel 9 dargestellt. Als Bewertungsgrößen werden hauptsächlich Reisezeiten und Verkehrsstärken verwendet. Zudem wird

die Aufteilung auf die unterschiedlichen Routen betrachtet, um Rückschlüsse hinsichtlich eventueller Verdrängungserscheinungen identifizieren zu können. Bei der Bewertung stehen somit nicht die einzelne Verkehrsteilnehmer im Fokus der Betrachtung, sondern die Wirkungen auf Fahrzeugkollektive und auf den gesamten Netzzustand. Anhand des Szenarienvergleichs werden Rückschlüsse für Anwendungsspielräume und notwendige Entwicklungsrichtungen für individuelle dynamische Zielführungsverfahren im städtischen Bereich abgeleitet. Dabei wird der Zusammenhang zur benötigten Genauigkeit und Aktualität der Verkehrsdaten dargestellt.



## **3 Wirkungspotenziale von Verkehrsinformationen**

### **3.1 Hintergrund**

Verkehrsmanagementsysteme haben das Ziel, die Effizienz von Verkehrsnetzen zu erhöhen und Verkehrsstauungen zu reduzieren. Bewirkt werden soll dies durch Informierung von Verkehrsteilnehmern über Verkehrsprobleme, durch Erweiterung der dem Einzelnen bekannten Routenmöglichkeiten und durch Verringerung der Unsicherheiten und Unkenntnisse in den Größen, auf denen der einzelne Verkehrsteilnehmer seine Entscheidung gründet. Dies soll dazu führen, überlastete Abschnitte im Netz zu meiden und dadurch eine gleichmäßigere Verteilung des Verkehrs über die vorhandene Infrastruktur, aber auch eine Entzerrung in zeitlicher Hinsicht zu bewirken.

Der Einsatz von Informations- und Kommunikationstechniken im Verkehrsbereich, auch Verkehrstelematik genannt, ist eng mit dem Fortschritt in der Elektrotechnik und der Informatik verbunden. Die Anfänge der Verkehrstelematik liegen in den achtziger Jahren. Mit der Verbesserung der technischen Grundlagen stiegen die Funktionalitäten der entwickelten Systeme und deren Qualität an und haben seitdem rasante Fortschritte gemacht. Auch wenn die Euphorie, gänzlich durch Telematik den Ausbaubedarf für die Infrastruktur kompensieren und Verkehrsprobleme lösen zu können, gewichen und Ernüchterung eingetreten ist, sind Telematikanwendungen heute nicht mehr wegzudenken.

### **3.2 Studien zur Wirkungsermittlung von Straßenverkehrsinformationen**

Die Anwendung neuer Technologien im Bereich der Verkehrstelematik wurde in den vergangenen Jahren stark vorangetrieben. In diversen Forschungs- und Entwicklungsprogrammen wurden weltweit Telematikanwendungen entwickelt und erprobt. Neben der Entwicklung neuer Verfahren wurden Untersuchungen zu den erwarteten Wirkungspotenzialen durchgeführt, wobei die Bewertung der neuen Technologien häufig unvollständig ist und sich nur auf qualitative Aussagen beschränkt [Zackor & Keller, 1999b].

Einige Untersuchungen konnten jedoch zeigen, dass durch Straßenverkehrsinformationen grundsätzlich ein Potenzial zur stärkeren Beeinflussung des Verkehrsverhaltens vorhanden ist und Reduzierungen der Reisezeit, der Staubildung und des Unfallgeschehens erreicht werden können [Abdel-Aty et al., 1997, Conquest et al., 1993, Hu & Mahmassani, 1997]. Im Rahmen der Projekte Munich COMFORT und EUROTRIANGLE/ CORE konnte bei Feldversuchen nach-

gewiesen werden, dass bei etwa 30 % der durchgeführten Fahrten, bei denen fahrtrelevante Meldungen empfangen wurden, eine veränderte Routenwahl bewirkt wurde und somit ein hohes Potenzial zur stärkeren Beeinflussung des Verkehrsverhaltens besteht. Der erreichbare Nutzen hängt dabei wesentlich vom Ausmaß der betreffenden Störung und den verfügbaren alternativen Netzkapazitäten ab. [Prognos AG & Keller, 2001]

Im Rahmen des Forschungsprojekts PROMETHEUS wurde das Wirkungspotenzial von Straßenverkehrsinformationen in Form von Reisezeitreduzierungen ausgedrückt. Hierbei wurde eine Abnahme um 0,8 % ermittelt, wenn 10 % bis 20 % der Fahrzeuge mit dem digitalen Verkehrsinformationsdienst RDS-TMC (Erläuterung siehe Kapitel 4.3.1) ausgestattet sind. Bei Versorgung aller Fahrzeuge erhöhte sich die Abnahme auf 3,5 %. [Zackor et al., 1993]

Im Projekt BEVEI [Robert Bosch GmbH, 1995] wurden ebenfalls die Wirkungen von RDS-TMC basierten Informationsmeldungen untersucht, allerdings mit mesoskopischen Simulationsrechnungen von Autobahnabschnitten. Hierbei konnte, wenn 60 % der Fahrzeuge mit RDS-TMC ausgestattet waren, eine Reisezeitreduzierung für alle Verkehrsteilnehmer um bis zu 9 % und eine Verringerung der Stauverweilzeit auf einem Autobahn-Netzabschnitt in der Hauptverkehrszeit um bis zu 19 % bestimmt werden (bezogen auf den Vergleichsfall ohne TMC).

Eine Abschätzung der erreichbaren Reisezeitersparnisse bei einer vollständigen Ausrüstung aller Fahrzeuge mit Verkehrsinformationen wurde von Zackor und Keller [1999a] gegeben. Sie kamen zu einer Größenordnung von 2 % bis 3 %, die sich durch Umfahrung von Staus realisieren lässt. Dadurch werden hochbelastete und staugefährdete Streckenabschnitte entlastet und vorhandene Kapazitätsreserven im Netz genutzt. Sind jedoch keine Kapazitätsreserven (Alternativroute mit Verkehrsbelastung unterhalb der Kapazität) vorhanden, kann auch bei Vorhandensein hochwertiger Verkehrsinformationen in allen Fahrzeugen keine Verbesserung erreicht werden.

Eine Abschätzung der Auswirkungen von Echtzeitinformationen auf das Verkehrsgeschehen in einem überlasteten Korridor wurde von Mahmassani und Jayakrishnan [1991] durchgeführt. An einem hypothetischen Netz, bestehend aus drei gleichgearteten Parallelstrecken, die in gleichmäßigen Abständen durch vier Querverbindungen miteinander verbunden sind, wurde Verkehr mesoskopisch simuliert. Dabei wurde der Anteil der mit Verkehrsinformationen versorgten Verkehrsteilnehmer in Stufen variiert und die Bereitschaft zu einer Routenveränderung mittels eines Schwellwerts des prozentualen Reisezeitgewinns verändert. Erst ab einem bestimmten Anteil informierter Teilnehmer, der entsprechend der verschiedenen Einstellungen zwischen 25 % bis 50 % lag, konnten systemweite Verbesserungen identifiziert werden. Als Informations- bzw. Wechselstrategie stellte sich heraus, dass die größten Reisezeitgewinne für den Einzelnen wie auch für das Gesamtsystem dann erreicht werden, wenn erst bei Vorliegen einer mindestens 20 %-ig schnelleren Route gewechselt wird. Dagegen tritt bei einem niedriger gesetzten Schwellwert ein hektisches Wechseln auf und die informierten Fahrer können sogar gegenüber den nicht Informierten im Nachteil sein. Wird der Wert aber zu groß ( $> 50\%$ ) gewählt, werden zu viele Möglichkeiten günstigerer Alternativrouten nicht berücksichtigt. Auch wenn die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf reale Verkehrsnetze aufgrund des kleinen und konstruierten Netzes und dem Fehlen der Fahrzeuginteraktionen nicht unbedingt möglich ist, verdeutlichen die Tests jedoch, dass Informierung nicht automatisch zu einer Verbesserung der Verkehrsverhältnisse führt.

Eine Art erweiterter Verkehrsinformation stellt die dynamische Zielführung dar. Die Verkehrsinformationen werden nicht nur ausgestrahlt und dem Verkehrsteilnehmer die Handlungsentcheidung überlassen, sondern es erfolgt eine Zielführung. Dynamische Zielführungssysteme sollen zu einer besseren Netzeffizienz im Sinne einer gleichmäßigeren Verteilung des Verkehrs beitragen. Die Ausschöpfung des Potenzials hängt auch hier, wie auch bei der reinen Verkehrsinformation, von der Verfügbarkeit sinnvoller Alternativrouten sowie vom Ausmaß der Störung ab. [Prognos AG & Keller, 2001]

Die Akzeptanz, den vorgeschlagenen Routenveränderungen des Zielführungssystems zu folgen, ist dabei recht hoch. Eine zusammenfassende Studie mehrerer europäischer Feldversuche gibt hierzu Werte zwischen 20 % bis 44 % von vorgenommenen Wegeänderungen an. [Prognos AG & Keller, 2001]. Conquest et al. [1993] geben für Pendler an, dass sogar 75 % aufgrund von Informationen entweder ihren Abfahrtszeitpunkt oder ihre Route ändern. Zur Wechselbereitschaft einer Route merken Liu und Mahmassani [1998] an, dass Verkehrsteilnehmer dann eher bereit sind ihren gewählten Weg zu verlassen, wenn dieser eine Verspätung mit sich bringen würde. Somit ist also die Reisezeit das entscheidende Kriterium. Polydoropoulou et al. [1996] kamen zu dem Schluss, dass vor allem für Fahrten von der Wohnstätte zur Arbeit eine Trägheit zum Routenwechsel vorliegt und hierbei somit starkes habituelles Verhalten vorhanden ist. Es besteht demnach ein Unterschied, ob es sich um Fahrten zur Arbeit, um Fahrten zu Gelegenheits- und Freizeitaktivitäten oder um Fahrten in unbekanntem Gebieten handelt. Für Verkehrsteilnehmer, die mit dem Netz nicht vertraut sind, wurde eine große Unwilligkeit des Routenwechsels herausgefunden. Die mit den unterschiedlichen Routenalternativen Vertrauten weisen zwar ein großes habituelles Verhalten auf, können aber durch Offerierung akkurater und quantifizierender Informationen zu Routenwechseln bewegt werden [Abdel-Aty & Abdalla, 2004, Khattak et al., 1996, Kim & Vandebona, 2002].

Durch Beeinflussung eines Teils der Fahrzeugflotte kommt es zu Netzentlastungen, wovon auch nicht ausgestattete Fahrzeuge profitieren können. Kühne et al. [1998] merken allerdings an, dass ein hinsichtlich der verkehrlichen Wirkungen optimaler Ausstattungsgrad deutlich unter 100 % liegt. Die gleichmäßigere Auslastung des Netzes kann nämlich nur durch Umleitung von Teilströmen erreicht werden, die bereits bei einer Teilausstattung erzielt werden kann. Als Größenordnung von Reisezeitersparnissen bei Vollausstattung mit Zielführungssystemen wurden auf Basis der Untersuchungen des bereits zuvor schon genannten PROMETHEUS-Projekts Werte zwischen 1 % bis 4 % geschätzt [Zackor et al., 1993]. Gegenüber der Behauptung, dass mit hohen Ausstattungsgraden wieder eine Verschlechterung der verkehrlichen Wirkungen verbunden ist, setzt Hall [1996] entgegen, dass dies kein zwangsläufiger Zusammenhang ist, sondern eine Frage der Qualität der Informationen. Insbesondere dann, wenn den Fahrern nicht nur aktuelle Reisezeitinformationen gegeben werden, sondern akkurate Prognosen zukünftiger Reisezeiten auf den Routen offeriert werden, kann eine Verbesserung auch bei hohen Ausstattungsgraden erreicht werden, was er anhand eines einfachen Warteschlangenmodells erläutert hat.

Das Potenzial möglicher Reisezeitgewinne durch individuelle Zielführung schätzen Zackor und Keller [1999a] auf der Grundlage verschiedener Untersuchungen netzabhängig auf 5 % bis 15 %. Reiss et al. [1991] kamen auf Basis von Simulationsrechnungen zu ähnlichen Abschätzungen mit Reisezeitersparnissen von 3 % bis zu 30 % und einer Reduzierung von Unfällen und staubedingten Verspätungen von bis zu 80 % für ausgestattete Fahrzeuge. Ebenfalls auf

Simulationsrechnungen des Ballungsraums München basierend, analysierten Bräutigam et al. [2003], dass für die mit einem dynamischen Zielführungssystem ausgestatteten Fahrzeuge ein Reisezeitgewinn von etwa 10 % in der morgendlichen Spitzenstunde erzielt werden kann. Auch für die nicht ausgestatteten Verkehrsteilnehmer konnte ein positiver Effekt auf die mittleren Reisezeiten und Reisegeschwindigkeiten identifiziert werden.

Im Rahmen des Projekts CLEOPATRA wurden Versuchsfahrten in Turin und Simulationsrechnungen in städtischen Netzen durchgeführt. Für die mit einem Zielführungssystem ausgestatteten Fahrzeuge konnte ein Reisezeitersparnis von 10% ermittelt werden, wobei die Befolgsrate der Routenvorschläge bei 22 % lag. Auf dieser Basis wurde für das gesamte städtische Netz von Turin eine Reisezeitersparnis von 500 Stunden pro Tag abgeschätzt, wenn 10 % der Fahrzeuge ausgestattet sind. [Prognos AG & Keller, 2001]

Die Abschätzungen der Wirkungen für das Gesamtnetz sind allerdings vage, da diese von den örtlichen Gegebenheiten, der Verkehrslage, der Qualität der Routenempfehlung und dem Ausstattungsgrad abhängen. Es wird jedoch insgesamt davon ausgegangen, dass sich bei einer Ausstattungsrate von 50 % eine Effizienzsteigerung im Gesamtnetz von 4 % bis 6 % in den kritischen Zeiten erreichen lässt. Der mittlere erreichbare Reisezeitgewinn wird in staugefährdeten Zeiträumen außerorts im Bereich von 5 % und innerorts bei bis zu 10 % gesehen. [Prognos AG & Keller, 2001]

Reisezeitvorteile können nur dann erzielt werden, wenn die zur Verfügung stehende Meldungsqualität den aktuellen Verkehrszustand differenziert wiederzugeben vermag. Untersuchungen von Helling [2006] zeigen aber auf, dass heutige Verkehrsmeldungen auf dem Autobahnnetz in Deutschland die reale Fahrtzeit für das Durchfahren der Behinderung durchschnittlich mit einem Fehler von 65 % abbilden. Für Verbindungen hoher Netzauslastung und –dichte im Rhein-Ruhr- und Rhein-Main-Gebiet, realisiert auf dem Autobahnnetz, wurden mittels Simulationen jährlich maximal mögliche Reisezeitvorteile für die einzelne Fahrt von 5 % bis 15 % bei idealer Zielführung (= Optimalfall dynamischer Navigation mit korrekten Verkehrsmeldungen) abgeschätzt. Aufgrund der mangelhaften Meldequalität wird das Potenzial aber nur zu 40 % ausgeschöpft, so dass sich der Reisezeitgewinn auf 2 % bis 5 % reduziert. [Helling, 2006]

Eng verknüpft mit der Routenwechselstrategie und den Ausstattungsraten ist die Fragestellung, welche Art von Information (historische, über den aktuellen Zustand, Prognose) an die Verkehrsteilnehmer weitergegeben werden sollte und wie häufig sie benachrichtigt werden sollten. Ben-Akiva et al. [1991] verdeutlichten hierzu, dass Informationssysteme auch negative Effekte bewirken können. Zum einen kann eine Informationsüberflutung auftreten, die der Fahrer nicht mehr effizient auszuwerten vermag und seine optimale Route nicht herausfinden kann. Zum anderen können Überreaktionen auftreten, so dass Verkehrsstauungen nur auf andere Alternativen verlagert werden und eine Art Oszillieren eintritt. Dies ist dann der Fall, wenn zu viele Fahrer in gleicher Weise auf aktuelle Verkehrszustände reagieren, ohne das Verhalten der anderen zu berücksichtigen. Daneben können aber auch Stauungen durch Konzentration des Verkehrs auf wenige Route verstärkt oder sogar erst hervorgerufen werden. Wählen nämlich zu viele Fahrer aufgrund von Informationen die unter den aktuellen Bedingungen beste Route, wird die normalerweise vorhandene Aufteilung auf diverse Alternativen stark vermindert, was zu Überlastungen der eigentlich besten Route führen kann. Soll der Einfluss von Verkehrsinformationen modellmäßig abgeschätzt werden, ist daher die Abbildung der Dynamik des Routenentscheidungsprozesses beeinflusst durch unterschiedliche Informationsgaben unumgänglich.

### 3.3 Schlussfolgerungen für die Modellbildung

In den vergangenen Jahren wurde eine Vielzahl von Untersuchungen durchgeführt, die sich mit dem Themenfeld der Wirkungsermittlung von Verkehrsinformationen beschäftigen. Die zuvor gegebenen kurzen Erläuterungen einiger Studien zeigen aber auch, dass sich die Bewertung äußerst schwierig gestaltet, da der Prozess von der Informationsgabe bis zur Routenwahl des Einzelnen von vielerlei Faktoren beeinflusst wird. Neben der Berücksichtigung der Art und der Qualität der Informationen stellt vor allem die Erfassung und Abbildung der Routenentscheidung eine Herausforderung dar, da es ein von Dynamik und Stochastizität geprägter Vorgang ist.

Eine Wirkungsanalyse auf Basis empirischer Untersuchung gestaltet sich daher sehr aufwändig und vermag häufig nicht, die einzelnen Zusammenhänge zu identifizieren, sondern nur Gesamtwirkungen zu erfassen. Abgesehen davon lassen sich Auswirkungen neuer Technologien meist gar nicht beobachten, da sie noch nicht eingeführt sind oder noch nicht im gefragten Umfang angewendet werden. Modelle, die dazu entworfen werden, die noch fehlende Realität abzubilden, stellen immer eine Abstraktion dar und können die Komplexität nicht gänzlich erfassen.

Modellbasierte Untersuchungen der Wirkungsermittlung von Verkehrsinformationen haben sich bisher meist auf kleine Netzausschnitte beschränkt, um dort die einzelnen Vorgänge besser nachvollziehen zu können. Im Fokus standen meist Strecken des übergeordneten Straßennetzes, da sie häufig Einführungsgebiete von Informationssystemen sind und klarer abgrenzbare Routenmöglichkeiten vorliegen. Auch wurden eher großräumigere Streckenverbindungen, etwa zwischen zwei Städten oder einem Vorort und einer Stadt, untersucht.

Um dem Anliegen der vorliegenden Arbeit - die Wirkung von Navigation in städtischen Netzen zu analysieren – nachgehen zu können, ist eine Erweiterung der Betrachtung auf ein gesamtes Netz notwendig. Um eine möglichst große Realitätsnähe herzustellen, soll dabei kein hypothetisches Netz verwendet werden, sondern die Nachbildung eines typischen Stadtstraßennetzes. Spezielle Verfahren der Informationsverbreitung sollen dabei nicht untersucht werden. Allerdings ist die Fragestellung auf Relevanz für einen Hersteller dynamischer Zielführungssysteme ausgerichtet. Für die Anwendung im übergeordneten Straßennetz kann diesen Geräten aus technischer Sicht bereits eine hohe Funktionsfähigkeit ausgesprochen werden. Für die Weiterentwicklung der Geräte und Anpassung der Rahmenbedingungen (z. B. Bereitstellung notwendiger Verkehrsdaten) auf die komplexen und dynamischen städtischen Verhältnisse, ist eine Identifizierung möglicher Auswirkungen notwendig.

An das Modell, das solch eine Untersuchung ermöglichen soll, werden demnach folgende Anforderungen gestellt und entsprechende Schlussfolgerungen gezogen:

- Die räumlichen und zeitlichen Bewegungsvorgänge der Verkehrsteilnehmer und ihre Interaktionen sollen möglichst detailliert nachgebildet werden. Daher kommt die mikroskopische Simulation zum Einsatz.
- Um Unterschiede zwischen dem Routenwahlverhalten von navigierten und nicht navigierten Verkehrsteilnehmern analysieren zu können, ist zunächst eine möglichst genaue Nachbildung des Verhaltens ohne Information vorzunehmen. Das individuelle Routenwahlverhalten wird durch eine Vielzahl von Faktoren bestimmt, wobei häufig in Modellen allein die Reisezeit berücksichtigt wird. Insofern die bestehenden Modellansätze die gewünschten Differenzierungen nicht abzubilden vermögen, ist eine Erweiterung vorzunehmen.

- Da die Faktoren und entsprechend das Routenwahlverhalten bei unterschiedlichen Verkehrsteilnehmergruppen verschieden geartet sein kann, ist eine Differenzierung vorzunehmen.
- Die Stochastizität, die in den Fehleinschätzungen der Verkehrsteilnehmer begründet liegt, sollte nachgebildet werden. Es ist somit ein Entscheidungsmodell zu wählen, bei dem ein Fehlerterm berücksichtigt wird.
- Nicht informierte Fahrer sind keineswegs unwissend, sondern verfügen über historisches Wissen. Der Lernprozess durch wiederholtes Befahren des Netzes muss sich im gewählten Simulator nachbilden lassen.
- Die Art und Qualität der offerierten Informationen soll in ihrer Auswirkung auf die individuelle Routenführung wiedergegeben werden können. Hinsichtlich der Aktualität und Verfügbarkeit von Verkehrsinformationen sollen heutige Zustände und mögliche zukünftige Veränderungen modellierbar sein, um dadurch Rückschlüsse für notwendige und anzustrebende Entwicklungsrichtungen für die individuelle dynamische Routenführung in städtischen Netzen zu ermöglichen.

## 4 Verkehrstelematik

### 4.1 Definition und Kategorisierung von Verkehrstelematik

Telematik steht für die Verknüpfung von *Tele*kommunikation und *Inform*atik und bezeichnet ein umfassendes technisches System zur Informationsverarbeitung und zum Datenaustausch. Die Verkehrstelematik umfasst den Teilbereich, der sich auf die Erfassung, das Versenden und Empfangen, das Verarbeiten und die Nutzung verkehrsbezogener Daten bezieht. Das Ziel ist die Information und Lenkung des Verkehrs.

Im Einzelnen werden beim Einsatz von Telematik im Verkehrswesen folgende Zielsetzungen verfolgt [Zackor & Keller, 1999a]:

- Effizientere Nutzung der Infrastruktur
- Erhöhung der Qualität des Verkehrsablaufs
- Erhöhung der Verkehrssicherheit
- Verringerung der verkehrsbedingten Umweltbelastungen
- Erleichterung bei der Vorbereitung von Reisen und der Benutzung des Verkehrssystems.

Begrifflich ist zwischen *Telematiksystemen* und *Telematikanwendungen* zu unterscheiden. Mit *Telematiksystemen* ist die Verbindung von Technologien (Hardware) und Verfahren (Software) gemeint und beschreibt somit die Technik, welche die betreffenden Daten sammelt, verarbeitet und verbreitet. Ist eine Differenzierung in Hinblick auf die verkehrlichen Wirkungen gemeint, die aus der Umsetzung der durch Telematiksysteme bereitgestellten Information resultiert, wird von *Telematikanwendungen* gesprochen.

Verkehrstelematik kann sich auf den Personen- wie den Güterverkehr beziehen und für die Verkehrsträger Straße, Schiene, Binnenwasserweg und Luftverkehr realisiert werden. Die Anwendungsfelder für Telematik im Verkehrssektor sind dabei weit gefächert. Sie reichen vom Verkehrsfunk, Wechselverkehrszeichen und Mautsystemen für den motorisierten Individualverkehr (MIV) über Fahrplan- und –routenoptimierung im öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV), sowie Logistik- und Flottenmanagement im Transportgewerbe bis hin zu Steuerungstechnologien im Schienen-, Schiffs- und Flugverkehr.

Gemessen an der jährlichen Verkehrsleistung des motorisierten Individualverkehr von 872,3 Mrd. Personen-km im Jahr 2003, was einem Anteil an den Verkehrsbereichen des Personenverkehrs von 82,1 % entspricht, und der des Straßengüterverkehrs von 362,9 Mrd. t-km im

Jahr 2003 in Deutschland (entspricht einem Anteil an den Verkehrsbereichen des Güterverkehrs von 70,3 %) [Bundesministerium für Verkehr, 2004], stellt die Straße den wichtigsten Verkehrsträger dar. Aufgrund der starken Stochastizität des Straßenverkehrs – die Verkehrsteilnehmer sind nicht an einen Fahrplan gebunden, treffen eine individuelle Routenwahl und sind somit wenig harmonisiert – bieten sich hier der Verkehrstelematik zahlreiche Einsatzfelder.

Die Schiene stellt mit 71,3 Mrd. Personen-km bzw. 79,8 Mrd. t-km beförderter Güter im Jahr 2003, was einem Anteil von 6,7 % an der Personenverkehrsleistung bzw. 15,5 % an der Güterverkehrsleistung entspricht [Bundesministerium für Verkehr, 2004], den zweitwichtigsten Verkehrsträger dar. Neben dem Einsatz von Verkehrsinformationssystemen, die die Kunden über das Geschehen im Verkehrsnetz unterrichten und somit einen wichtigen Bestandteil zur Attraktivitätssteigerung dieser Verkehrssysteme gegenüber dem motorisierten Individualverkehr leisten, wird Telematik im Schienenverkehr vor allem auch zur Sicherung des Betriebsablaufs und zur betriebswirtschaftlichen Effizienzsteigerung eingesetzt. Leit- und Sicherungstechnik, Infrastrukturmanagement, Flottenmanagement und Unfall- und Störungsmanagement sind Anwendungen, in denen Telematik unterstützend bei der Betriebsdurchführung eingesetzt wird.

Telematikanwendungen im Öffentlichen Personennahverkehr werden eingesetzt, um die Verkehrsteilnehmer des ÖPNV mittels kollektiver oder individueller Systeme zu informieren, durch Tarif- und Zahlungsverbünde betreiberübergreifend Fahrscheine anzubieten, um mit Betriebsleitsystemen Priorisierungsstrategien und Anschlusssicherungen durchzuführen, aber auch um Störfälle vermeiden, erkennen und Gegenmaßnahmen einleiten zu können.

In der Binnenschifffahrt wie auch dem Seeverkehr findet Telematik ähnliche Anwendungen wie im Straßenverkehr, wobei hier die Einsatzbereiche der Nautik, der Positionsbestimmung und der Logistik ein größeres Gewicht haben.

Telematik im Luftverkehr ist gleichzusetzen mit der Flugsicherungstechnologie, die eine flächendeckende Radarüberwachung und -führung des zivilen Luftverkehrs beinhaltet, und somit ein bereits schon lange existierendes und nicht mehr wegzudenkendes Anwendungsfeld darstellt.

Da in der vorliegenden Arbeit die Telematikanwendungen im Straßenverkehr im Vordergrund stehen, wird im Folgenden eine differenzierte Einteilung vorgenommen.

## **4.2 Telematikanwendungen im Straßenverkehr**

In Anlehnung an Zackor und Groke [2003] lassen sich die derzeit in Betrieb befindlichen Telematikanwendungen im Straßenverkehr hinsichtlich der unterschiedlichen Maßnahmenbereiche folgendermaßen klassifizieren:

1. Kollektive dynamische Verkehrsleit- und Informationssysteme, Linien- und Netzsteuerung, Verkehrsbeobachtung
2. Individuelle dynamische Zielführung, Verkehrsinformationen und Fahrtenplanung
3. Automatische Gebührenerhebung, Road Pricing
4. Fahrerassistenzsysteme, Automatisches Fahren, Fahrzeugüberwachung
5. Pannen-, Störungs- und Notfallmanagement
6. Flottenmanagement/ Logistik

Kollektive Verkehrsleit- und Informationsdienste richten sich an die Gesamtheit der Verkehrsteilnehmer, wobei alle Nutzer die gleichen Informationen zur Verfügung gestellt bekommen. Als eine Maßnahme sei hier der Verkehrsfunk genannt, wobei unter diese Klasse beispielsweise auch verkehrsabhängige Lichtsignalsteuerungen, (kollektive) Parkleitsysteme oder Geschwindigkeitsbeschränkungen fallen. Sie werden zur Durchsetzung genereller verkehrlicher Optimierungs- und Leitstrategien eingesetzt und meist von öffentlicher Hand betrieben.

Bei individuellen Zielführung-, Informations- und Fahrtenplanungssystemen stehen dagegen die Fahrtwünsche des einzelnen Nutzers im Fokus der Betrachtung. Die Dienste werden meist privatwirtschaftlich betrieben, wobei die Führung und Beeinflussung die Optimierung des individuellen Nutzens anstrebt und somit nicht zwangsläufig auch zum (kollektiven) Systemoptimum führt. Es werden Routenempfehlungen zu einem vorgegebenen Ziel unter Berücksichtigung aktueller Verkehrsinformationen und der aktuellen Fahrzeugposition geliefert. Die Informationen können dabei sowohl vor einer geplanten Fahrt (pre-trip) als auch während einer Fahrt (on-trip) gegeben werden.

Durch Erhebung von Straßenbenutzungsgebühren bzw. durch Parkraumbewirtschaftung wird eine Internalisierung externer Kosten angestrebt. Differenzierte Gebührenstrukturen sollen dabei eine gleichmäßigere Auslastung der Infrastruktur und einen Abbau von Spitzenbelastungen bewirken. Verkehrstelematik bietet hier den Vorteil, ohne direkten Eingriff in den Verkehrsablauf die Gebühren zu erheben.

Die Entwicklung und Verbesserung von Fahrerassistenzsystemen nimmt mittlerweile einen sehr hohen Stellenwert in der Automobilindustrie ein. Sie sollen den Fahrzeugführer bei der Durchführung von Fahraufgaben unterstützen und entlasten und somit zu einer Erhöhung der Verkehrssicherheit und des Fahrkomforts führen. Fahrerassistenzsysteme zielen dabei entweder auf eine Unterstützung bei der Planung der Fahrtroute und der Zielführung (= Navigationssysteme) ab oder sie liefern Beiträge zur Wahl und zur Regelung der Führungsgrößen (z. B. Sollgeschwindigkeit, Sicherheitsabstand), bei denen häufig auch Umfeldbedingungen in die Empfehlung einbezogen werden. Verstärkt halten aber auch Systeme zur Fahrzeugstabilisierung Einzug, die das Fahrzeug in Situationen stabilisieren können, die unter fahrdynamischer Hinsicht als kritisch zu bewerten sind (z. B. Anti-Blockier-System – ABS).

Systeme, die nicht wie die Fahrerassistenzsysteme im Vorfeld zur Vermeidung von kritischen Situationen eingesetzt werden, sondern erst nach Eintritt des Ereignisses Maßnahmen einleiten, sind mit dem Bereich des Pannen-, Störungs- und Notfallmanagement gemeint.

Telematikanwendungen im Bereich des Flottenmanagements und der Logistik dienen im Wesentlichen der dynamischen Fahrten- und Frachtdisposition sowie der Sendungsverfolgung und werden von privaten und öffentlichen Dienstleistern, die einen Fuhrpark unterhalten, eingesetzt. Das Ziel ist eine Minimierung von Leerfahrten und Standzeiten sowie eine Verbesserung des Betriebsablaufs an den Schnittstellen (z. B. Verladeterminals).

### **4.3 Verkehrsfunk**

Der Verkehrsfunk wurde Anfang der 1970er Jahre eingeführt und informiert Autofahrer über aktuelle Verkehrsstörungen. Er wird über bestimmte Programme des Hörfunks ausgestrahlt, wobei je nach Aktualität die Meldungen zu festgelegten Zeiten gesendet oder das laufende Programm situationsrelevant unterbrochen wird. Die übermittelten Informationen können ent-

weder Zustände beschreiben (bspw. Länge eines Staus, aktuelle Reisezeiten) oder in ihrem Charakter empfehlend sein (bspw. zur Wahl einer Route).

Die offerierten Informationen sind als quasi-dynamisch zu bezeichnen, da sie nicht durch ein eigenständiges System erfasst werden, sondern auf Zusammenführung verschiedener Quellen (bspw. Polizei, Verkehrsleitstellen, Automobilclubs, Hinweise einzelner Verkehrsteilnehmer), die fortlaufend aktuelle Zustände ermitteln, basieren. Im Gegensatz zu einem echten dynamischen System ist somit die Gültigkeit der Information zum Zeitpunkt der Abgabe nicht zwangsläufig gewährleistet.

#### **4.3.1 Digitaler Verkehrsinformationsdienst – RDS-TMC**

Um der zum Teil ungenügenden Aktualität der Verkehrsinformationen entgegenzuwirken, fand seit Ende der 1980er Jahre eine Weiterentwicklung in Richtung eines durchgängigen Verkehrsinformationssystems auf Basis von europaweit vereinheitlichten, digital codierten Meldungen statt. Mit Aufbau des digitalen UKW-Verkehrskanals RDS-TMC (Radio Data System – Traffic Message Channel), der 1997 flächendeckend für Deutschland eingeführt wurde, wurde es möglich, umfangreiche Verkehrszustandsinformationen parallel und unabhängig zu einem speziellen gewählten Hörfunkprogramm unhörbar an den Radioempfänger zu übermitteln, der allerdings über eine spezielle RDS-TMC-Funktionalität verfügen muss.

Aus dem TMC-Dienst können auch individuelle, für den einzelnen Verkehrsteilnehmer relevante Verkehrsinformationen herausgefiltert und in einem individuellen Routenplaner verwendet werden. Dabei berücksichtigen die TMC-Empfänger den Standort und die Fahrtrichtung des entsprechenden Verkehrsteilnehmers.

Das Versenden von Verkehrsmeldungen über RDS-TMC bietet für Autobahnen und Bundesstraßen eine ausreichende Genauigkeit. Für eine differenzierte Information in städtischen Bereichen ist es aber nur bedingt einsatzfähig, da es verfahrensbedingte Einschränkungen mit sich bringt. Daher wird das TMC-Meldeverfahren im Folgenden kurz erläutert.

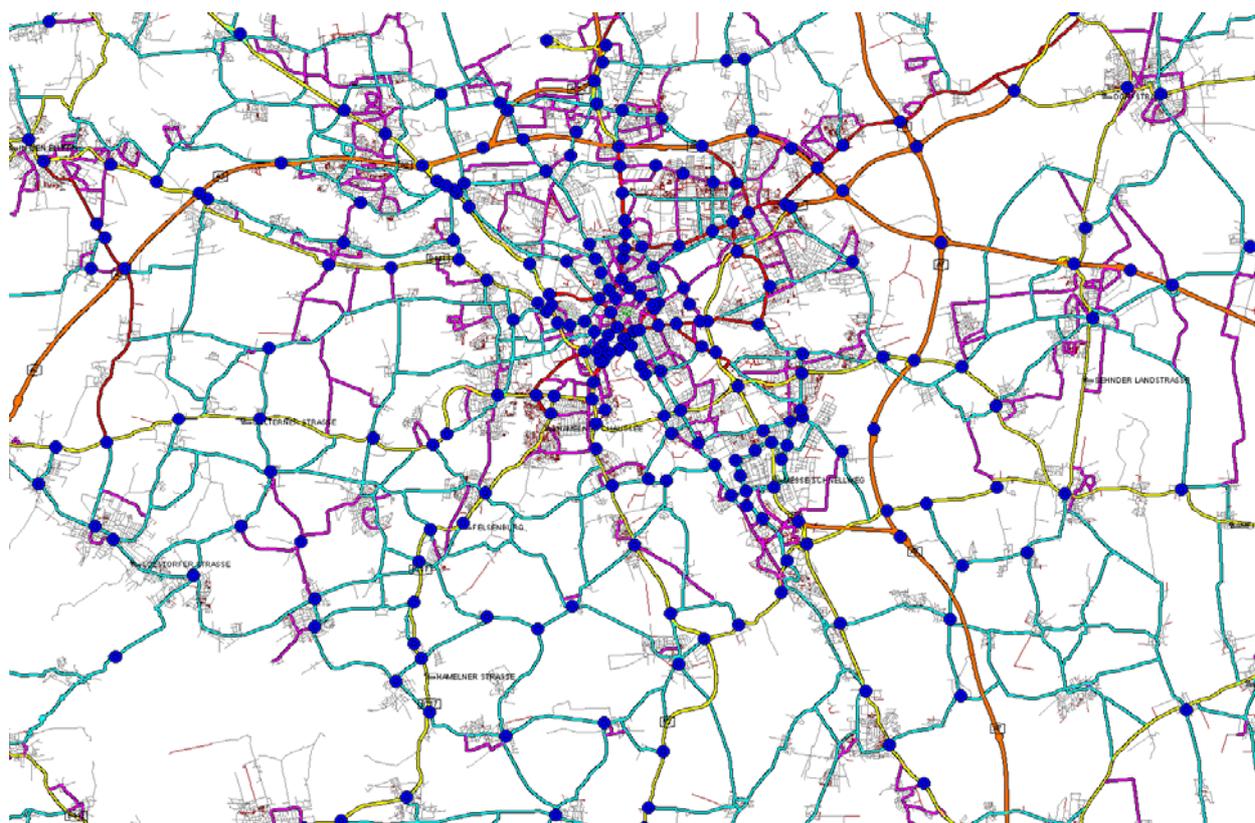
#### **4.3.2 Aufbau von TMC-Meldungen**

Verkehrsstörungen an unterschiedlichen Stellen werden jeweils als einzelne TMC-Meldungen gesendet. Sie bestehen aus einem Ereignis- und einem Lagecode und gegebenenfalls zusätzlich aus einer zeitlichen Gültigkeitsbeschränkung. Die Möglichkeiten unterschiedlicher Inhalte der Ereignisse sind durch Definitionen festgelegt, so dass eine klare Umsetzung möglich ist [*DIN EN ISO 14819-1*, 2005, *DIN EN ISO 14819-2*, 2005].

Die TMC-Ortskodierung ist nicht frei zuordenbar, sondern an bestimmte Lagekennungen (TMC Location Codes) gebunden. Die Festsetzung und Zuordnung der einzelnen Straßenabschnitte zu den Locations wird national gepflegt, in Deutschland durch die Bundesanstalt für Straßenwesen und umfasst hier etwa 30.000 Einträge [*DIN EN ISO 14819-3*, 2004, Bundesanstalt für Straßenwesen - BASt, 2006, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2004]. Ursprünglich war TMC nur für Autobahnen und Bundesstraßen entworfen worden. Mittlerweile wurden viele Location-Codes ergänzt und ermöglichen so, dass Verkehrsmeldungen zum Teil auch in städtischen Bereichen, bisher vor allem in Ballungszentren, abgebildet werden können. Allerdings ist die Abdeckung des städtischen Straßennetzes mit TMC Locations noch stark unterschiedlich,

weshalb hier eine differenzierte Verkehrsinformation bisher nur bedingt möglich ist (siehe Bild 4.1 und Tab. 4.1).

Da aber die Erweiterbarkeit der Location Code-Tabelle auf etwa 65.000 Einträge und auch die Übertragungsbandbreite der Meldungen begrenzt ist und zudem die Pflege und Wartung aufwändig ist, wird an dem von TPEG (Transport Protocol Expert Group) definierten alternativen Verfahren gearbeitet. Hiermit soll eine freie Georeferenzierung ermöglicht werden. Die Informationen sollen dann über DAB (Digital Audio Broadcasting), das in Deutschland bereits fast überall zu empfangen ist und über eine sehr große Übertragungskapazität verfügt, ausgestrahlt werden.



**Bild 4.1:** Lage der TMC-Locations in Hannover (nach TMC-Location-Tabelle Version 5.01 [Bundesanstalt für Straßenwesen - BASt, 2006])

**Tab. 4.1:** TMC-Locations in einigen Großstädten Deutschlands [Blaupunkt GmbH, 2005]

Stadt	Anzahl an TMC Locations Stand LC Version 2.05	Anzahl an TMC Locations Stand LC Version 3.0	Anzahl an TMC Locations Stand LC Version 4.0
Berlin	349	1504	1629
Hannover	149	303	408
München	180	401	589
Frankfurt	135	474	485
Stuttgart	75	132	150

## 4.4 Navigationssysteme

### 4.4.1 Grundlagen

Unter Navigation wird die Wegbestimmung von einem Ort zu einem Zielort verstanden. Sie setzt sich aus den drei Teilaufgaben

- der Ortung, also der geografischen Positionsbestimmung,
- der Wegbestimmung bis zum Zielort und
- dem Führen zum Ziel

zusammen.

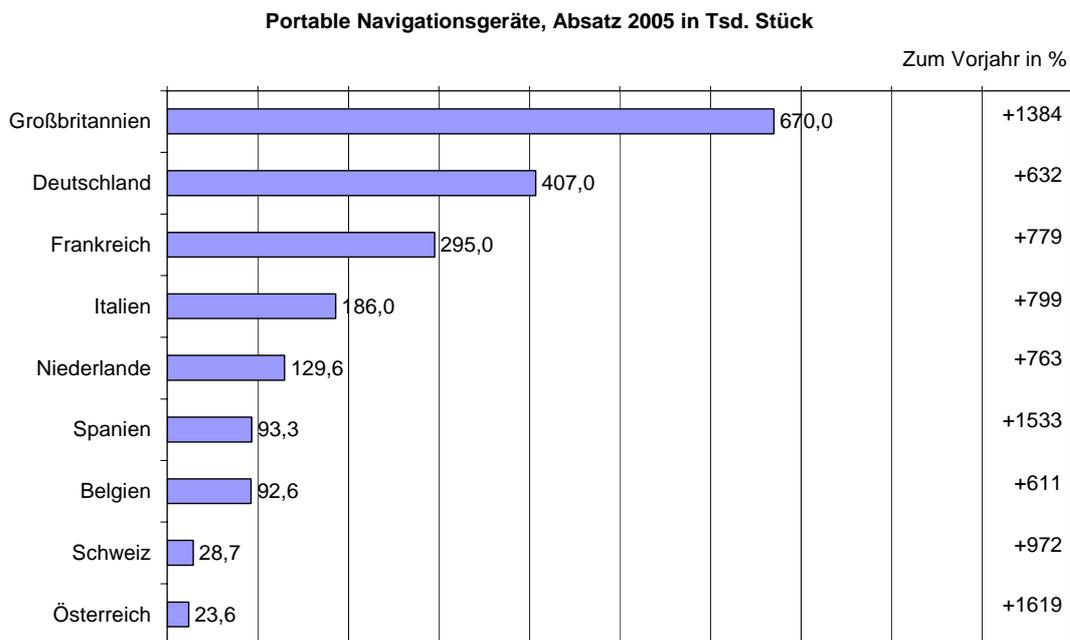
Zur Ortung werden mehrere Sender und eine Empfangseinheit benötigt, die die Signale der Sender auf ihre Laufzeitverschiebung hin untersucht und auf Basis dieser Daten die Position berechnen kann. Strahlen die Sender Radiowellen aus, so spricht man von Funknavigation, wobei zwischen terrestrischer und Satellitennavigation unterschieden wird. Heute beruhen die meisten Systeme auf dem US-amerikanischen GPS (Global Positioning System) Satellitennavigationssystem. Als davon unabhängiges System wurde von der Europäischen Union (EU) und der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) mit Beteiligung von China und Indien das rein für zivile Zwecke konzipierte Satellitennavigationssystem Galileo ins Leben gerufen.

Durch Übertragung der Positionsdaten in eine digitale Karte kann eine Wegebestimmung auf dem zur Verfügung stehenden Verkehrsnetz zum gewünschten Ziel erfolgen. Durch Darstellung der Umgebung kann eine Zielführung berechnet werden, die keine Luftlinienverbindung, sondern einen Weg, der mittels des so genannten Routings bestimmt wurde, auf der zur Verfügung stehenden Infrastruktur zwischen der Ausgangsposition und dem Ziel angibt.

Die Ursprünge der Satellitennavigationssysteme liegen im militärischen Flugverkehr und wurden zu Beginn des Zweiten Weltkriegs als Navigationserleichterung für Kampfflugzeuge entwickelt. Bald darauf wurde der Einsatz auch auf die Schifffahrt ausgeweitet. Erst wesentlich später fanden Navigationssysteme Einzug in den Straßenverkehr und als Handgeräte für die Positionsbestimmung für Fuß- bzw. Radfahrer. Das erste Auto-Navigationssystem brachte Honda in Kooperation mit Alpine Electronics 1981 auf den Markt. Das erste serienmäßige fahrzeugautonome Navigationssystem wurde 1989 von Blaupunkt vorgestellt (Modell: Travel/Pilot IDS). 1992 wurde dieses System mit einem GPS-Empfänger ausgerüstet, so dass die Ortungsansprüche für den Einsatz im Straßenverkehr erfüllt waren. Fahrzeugnavigationssysteme, die per Sprachausgabe und einfacher symbolischer Anzeige der Fahrhinweise arbeiten, sind in Deutschland seit Ende 1994 auf dem Markt. [Beckmann et al., 2001, Freiesleben, 1976, Kayton, 1990]

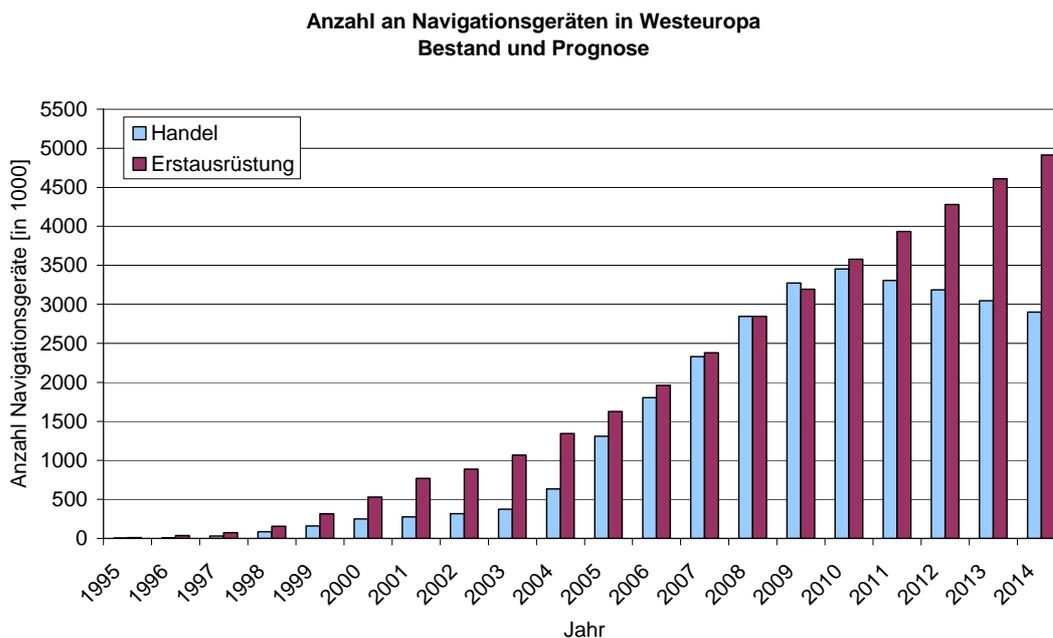
### 4.4.2 Marktdurchdringung von Navigationsgeräten

In den vergangenen Jahren haben sich Navigationssysteme in den verschiedensten Anwendungsbereichen zu einer festen Größe entwickelt. Sowohl bei der Reisevorbereitung im Internet als auch auf mobilen Endgeräten und insbesondere unterwegs im gewerblichen und privaten Gebrauch kommen Routenplaner und Navigationshilfen mittlerweile immer häufiger zum Einsatz. Dabei haben sich neben den fest eingebauten Endgeräten auf dem Markt auch zunehmend Verkehrsinformationsdienste etabliert, die über einen PTA (Personal Travel Assistant), Handy und/ oder Internet angeboten werden.



**Bild 4.2: Absatz portabler Navigationsgeräte im Jahr 2005 [GfK Marketing Services, 2006]**

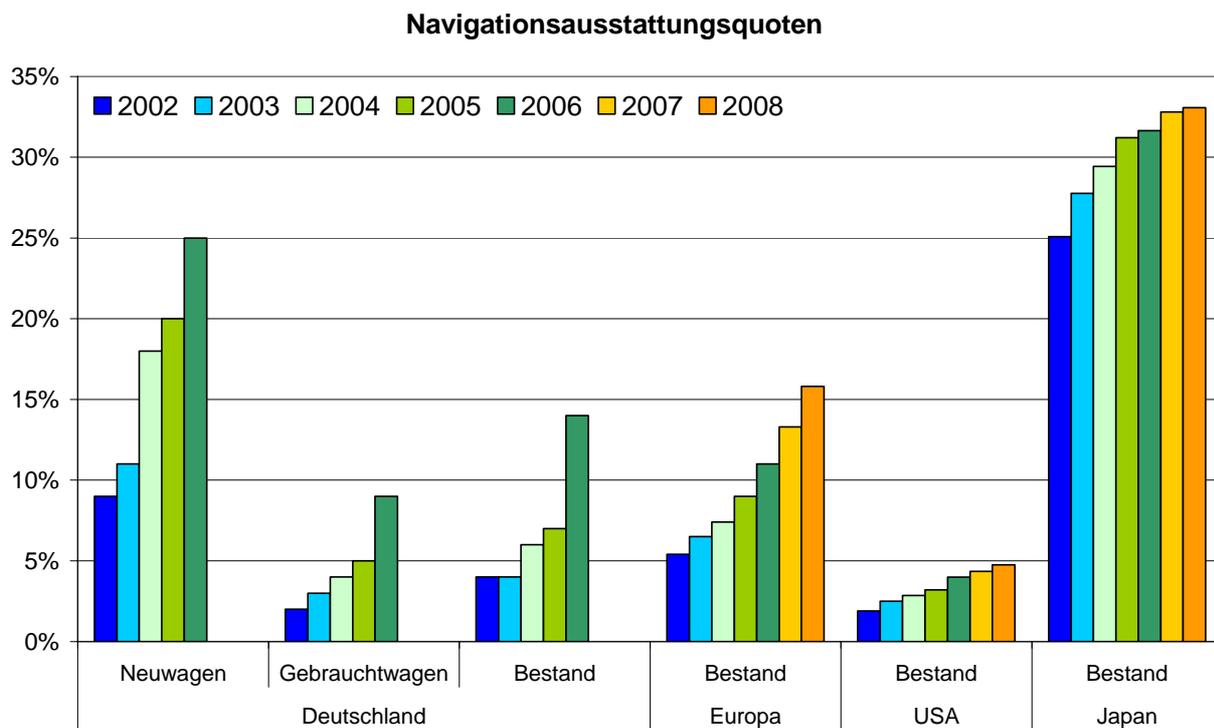
Laut GfK Marketing Services [2006] ist der Umsatz im InCar-Electronics-Bereich (Navigationsgeräte, Autoradios, Lautsprecher, CD-Wechsler, etc.) im Jahr 2005 um 29 % auf 625 Mio. Euro gestiegen. Mit Navigationsgeräten sei dabei allein ein Absatz von mehr als 200 Mio. Euro generiert worden. Dies ist vor allem auf den Boom der portablen Systeme zurückzuführen, die dazu beigetragen haben, aus einem anfänglichen Luxusgut schon fast eine Massenware zu machen (siehe Bild 4.2 und Bild 4.3).



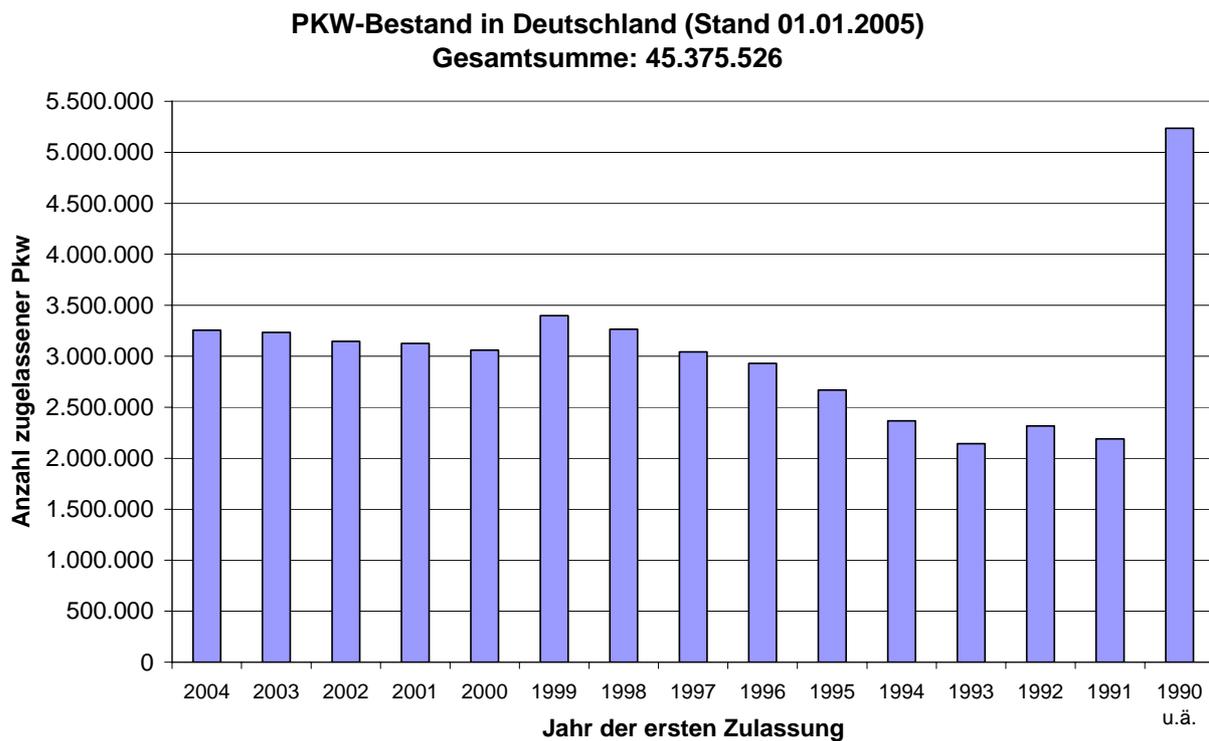
**Bild 4.3: Entwicklung und Prognose verkaufter Navigationsgeräte in Westeuropa von 1995 bis 2014 [Blaupunkt GmbH, 2006]**

Für eine Erstausrüstung werden von den Herstellern bereits für etwa 80 % aller Neufahrzeuge Navigationssysteme als Zusatzausstattung angeboten. In Deutschland wird heute eine Ausstattungsquote zugelassener Fahrzeuge von etwa 14 % erreicht, wobei bereits 25 % aller Neuwagen mit einem Navigationsgerät ausgeliefert werden [Blaupunkt GmbH, 2006]. Betrachtet man den weltweiten Markt, so wird heute die höchste Ausstattungsrate im Vorreiterland Japan mit etwas über 30 % erreicht (siehe Bild 4.4).

Betrachtet man die wachsenden Ausstattungsraten, muss aber berücksichtigt werden, dass der Nutzer, selbst wenn er ein Navigationssystem im Fahrzeug zur Verfügung hat, es nicht immer nutzt. Dies bedeutet, dass der vornehmliche Anwendungsfall bei Fahrten in ortsfremden Gebieten und bei weiträumigeren Fahrten mit großem Anteil des hochrangigen Netzes liegt. Vor allem für die weiteren Aussagen und Rückschlüsse aus dieser Arbeit, die den Fokus auf den städtischen Bereich legt, liegt die Ausstattungsrate aktiv navigierter Fahrzeuge noch deutlich unter den Werten, die zuvor aufgeführt wurden. Genaue Aussagen zur Nutzungsrate in den für den Nutzer bekannten städtischen Gebieten sind nicht vorhanden, sie wird nach eigener Einschätzung aber auf Anteile von unter 5 % geschätzt.



**Bild 4.4:** Entwicklung und Prognose des Anteils zugelassener Fahrzeuge mit Navigationssystem [Blaupunkt GmbH, 2006]



**Bild 4.5:** Pkw-Bestand in Deutschland differenziert nach dem Jahr der ersten Zulassung (Stand 01.01.2005) [Blaupunkt GmbH, 2006]



## **5 Verkehrsmodelle**

### **5.1 Aufgaben von Verkehrsmodellen**

Verkehrsmodelle sind ein Werkzeug für die Modellrechnungen innerhalb der Verkehrsplanung. Mittels der Verkehrsmodelle wird versucht, das Verkehrsgeschehen idealisiert nachzubilden und mit erklärenden und prognostizierenden Größen zu beschreiben. Da ein Modell immer eine Abstraktion bedeutet, ist eine richtige und hinreichend genaue Wiedergabe der Wirkungszusammenhänge für die Brauchbarkeit des Modells entscheidend. Zur Nachbildung der Verhaltensweisen und Entscheidungen der Verkehrsteilnehmer sind somit ausreichende Datengrundlagen, die den Zustand beschreiben, und Formulierungen von Algorithmen notwendig, die die Verknüpfungen dieser Daten bewerkstelligen.

Verkehr setzt sich aus einer Vielzahl von einzelnen Entscheidungen der Verkehrsteilnehmer zusammen. Einige Entscheidungen trifft der Verkehrsteilnehmer eher selten und sie haben langfristige Auswirkungen, wie etwa die Wahl des Wohnorts oder die Wahl zur Anschaffung eines Pkws. Andere Entscheidungen werden häufiger gefällt, wie etwa der Kauf einer Zeitkarte zur Benutzung des Öffentlichen Verkehrs, was mittelfristige Auswirkungen hat. Vor jeder Fahrt stellt sich die Frage, zu welcher Zeit sie starten soll, welches Ziel gewählt wird, welches Verkehrsmittel verwendet und welche Route genutzt wird. Auch spontane Entscheidungen zur Änderung der Route während der Fahrt sind möglich. Die Aufgabe von Verkehrsmodellen besteht darin, das Verkehrsverhalten in seinen vielen Wahldimensionen nachzubilden, wobei aus modelltechnischen Gründen meist versucht wird, die Auswahl auf eine bestimmte Anzahl diskreter Alternativen zu begrenzen.

Um einen Überblick zu verschaffen und den Zusammenhang zu dieser Arbeit herzustellen, wird im Folgenden kurz auf einige Grundlagen und die Strukturierung von Verkehrsmodellen eingegangen. Die Ausrichtung ist dabei auf die Modelle gerichtet, die einen entscheidenden Einfluss auf die Herangehensweise und den Aufbau der Untersuchung haben.

### **5.2 Vier-Stufen-Modell**

Verkehrsplanungsmodelle werden klassisch in die vier Modellgruppen Verkehrserzeugung, Verkehrsverteilung, Verkehrsaufteilung und Verkehrsumlegung eingeteilt, die eine sequenzielle Modellierung des Verkehrs erlauben.

In der ersten Stufe, der Verkehrserzeugung, werden die Anzahl der Wege, die in einer Verkehrszelle beginnen (Quellverkehr) bzw. enden (Zielverkehr), ermittelt. Mittels Verkehrsverteilungsmodellen wird das Verkehrsaufkommen der Verkehrszellen möglichen Zielen zugeordnet. Im nächsten Schritt, der Verkehrsaufteilung, werden die erzeugten Verkehrsverteilungsmatrizen auf die verschiedenen vorhandenen Verkehrsmittel verteilt. Verkehrsumlegungsmodelle ordnen als letzten Schritt die Verkehrsströme, ausgehend von den Verkehrsverteilungsmatrizen, möglichen Wegen zu. Sie bilden also die Wegewahl der Verkehrsteilnehmer im Verkehrsnetz ab. Als Ergebnis der Umlegung resultiert die Verkehrsbelastung des Netzes.

Die ersten Ansätze des Vier-Stufen-Modells basierten auf aggregierten Modellen, bei denen die Verkehrsnachfrage einer Raumeinheit direkt aus den Strukturdaten dieser Raumeinheit abgeleitet wird. Bei disaggregierten Verkehrsplanungsmodellen wird die Verkehrsnachfrage dagegen aufgrund des Verhaltens von Einzelpersonen oder verhaltenshomogener Personengruppen bestimmt. Sie stellen eine Erweiterung der Ansätze dar, da sie nicht mehr von einem gleichen Verhalten aller Verkehrsteilnehmer, unabhängig vom Fahrtzweck und ihrer demografischen und sozialen Differenzierung, ausgehen und führen zu einer verbesserten Möglichkeit der Abbildung.

Verkehrsinformation und Navigation zielt auf die Veränderung der Wege der Verkehrsteilnehmer ab. Der Verkehrsumlegung kommt daher im Rahmen dieser Arbeit eine besondere Bedeutung zu, weshalb auf diese Modellgruppe differenzierter eingegangen wird. Um die Verkehrsnachfrage auf das Netz umzulegen, sind

- ein Routensuchverfahren (siehe Kapitel 5.6 und 5.7), das für jede Quelle-Ziel-Beziehung sinnvolle Routen ermittelt,
- ein Routenwahlmodell (siehe Kapitel 5.8), das die Verkehrsnachfrage der jeweiligen Quelle-Ziel-Beziehung auf die gefundenen Routen aufteilt, und
- ein Verkehrsflussmodell (siehe Kapitel 5.9), das die Bewegungsvorgänge der Verkehrsteilnehmer modelliert,

erforderlich.

### 5.3 Klassifizierung von Verkehrsmodellen

Die einzelnen Modelle lassen sich nach verschiedenen Kriterien klassifizieren. Eine Unterscheidung sieht die Differenzierung in makroskopisch und mikroskopisch vor. Bei der Verkehrsnachfragemodellierung spricht man von mikroskopisch, wenn die Verkehrsnachfrage aus dem Verhalten von Einzelpersonen abgeleitet wird. Als makroskopisch werden die Modelle bezeichnet, wenn Personengruppen betrachtet werden.

Die Klassifizierung in makroskopisch und mikroskopisch wird auch bei der Modellierung des Verkehrsflusses (siehe Kapitel 5.9) verwendet. Werden die Interaktionen zwischen einzelnen Fahrzeugen abgebildet, handelt es sich um ein mikroskopisches Verkehrsflussmodell. Dagegen betrachten makroskopische Modelle nicht die einzelnen Fahrzeuge, sondern die Fahrzeugbelastung oder die Fahrzeugdichte auf einer Strecke.

Gliedert man die Modelle anhand der Behandlung der Zeit, lassen sich statische und dynamische Verfahren unterteilen. Grundannahme der statischen Modellierung ist, dass sich der Systemzustand im Verkehrsnetz während des betrachteten Zeitraums nicht ändert. Die Verkehrsnachfrage und das Verkehrsangebot sind konstant und es findet keine zeitliche Variation wäh-

rend des Betrachtungszeitraums statt, so dass die Verkehrsteilnehmer ihre Zielwahl-, Moduswahl- und Routenwahlentscheidung unter gleich bleibenden Bedingungen treffen und sich ein Gleichgewichtszustand zwischen Verkehrsangebot und –nachfrage einstellt. Aus diesem Grund eignen sich statische Modelle für Betrachtungsräume von einem Tag oder länger, also für die Beantwortung von Fragestellungen, in denen eher die langfristige planerische Bewertung, etwa für die Planung von Infrastrukturmaßnahmen, von Interesse ist. [Cascetta, 2001, Friedrich & Vortisch, 2005]

Bei dynamischen Verfahren werden zusätzlich die zeitlichen Änderungen nachgebildet. Der Betrachtungszeitraum ist entsprechend auf einen oder wenige Tage bis zu einigen Minuten ausgerichtet. Hinsichtlich des Systemzustands lassen sich dynamische Verfahren noch weiter in Modelle mit wiederkehrendem oder mit veränderlichem Systemzustand unterteilen.

Verändert sich der Systemzustand innerhalb des Betrachtungszeitraums, wiederholt sich aber regelmäßig, wie etwa der Verkehrszustand während der Hauptverkehrszeit an einem bestimmten Werktag, so geht man davon aus, dass die Verkehrsteilnehmer unter zeitabhängig wiederkehrenden Bedingungen ihre Entscheidung treffen. Ein derartiges dynamisches Modell lässt sich für die Bewertung von Infrastrukturmaßnahmen und Nachfrageänderungen verwenden, bei denen auch die unterschiedlichen tageszeitlichen Verkehrssituationen berücksichtigt werden sollen.

Wird jedoch davon ausgegangen, dass sich die Veränderungen in der Nachfrage und dem Angebot gegenseitig dynamisch beeinflussen, sich kein Gleichgewichtszustand einstellt und die Verkehrsteilnehmer ihre Entscheidung immer wieder neu auf Basis ihres vergangenen Erfahrungsschatzes in Form eines Lernprozesses treffen, spricht man von dynamischen Verfahren mit veränderlichem Systemzustand. [Cascetta, 2001, Friedrich & Vortisch, 2005]

## 5.4 Entscheidungsmodelle

Verkehrsmodelle haben die Aufgabe, das Verhalten der einzelnen Verkehrsteilnehmer nachzubilden, was sich aus einer Vielzahl von Entscheidungsprozessen zusammensetzt. Möchte ein Verkehrsteilnehmer beispielsweise eine Fahrt zwischen seinem Ausgangspunkt und seinem Ziel realisieren, muss er sich für eine Route entscheiden. Am Beispiel des Routenwahlprozesses werden im Folgenden unterschiedliche Möglichkeiten der Entscheidungsmodellierung aufgezeigt.

Ein Ansatz zur Modellierung des Entscheidungsverhaltens basiert auf der Annahme, dass die Verkehrsteilnehmer jeweils die beste Alternative wählen, eventuell mit zeitabhängiger Differenzierung. Da diese Modellierweise auf einer bestimmten Regel basiert, wird sie auch als regelbasierter Ansatz bezeichnet.

Bei (deterministischen) Gleichgewichtsmodellen (siehe Kapitel 5.8) wird das Entscheidungsverhalten auf die Weise modelliert, dass jeder die Route so wählt, dass der Widerstand (siehe Kapitel 5.5) auf jeder der Alternativen einer Verkehrsbeziehung gleich ist.

Diese Modellieransätze haben zwar ihre Berechtigung, den Verkehrsteilnehmern wird aber ein deterministisches Verhalten unterstellt, was bedeutet, dass alle in der Lage sind, den besten Weg zu wählen, was eine perfekte Netzkenntnis, das Fällen von beständig richtigen Entschei-

dungen und eine identische Verhaltensweise aller Verkehrsteilnehmer voraussetzt (siehe auch Kapitel 5.8).

Diese Annahmen können dadurch aufgelockert werden, dass eine Zufallskomponente bei der Auffassung und der Bewertung durch die Verkehrsteilnehmer berücksichtigt wird, so dass ein stochastisches Verhalten resultiert (siehe auch Kapitel 5.8). Zur Abbildung des Routenwahlprozesses ist dann ein diskretes Entscheidungsmodell notwendig. Diese Modelle basieren auf dem Konzept, dass die Präferenz eines Verkehrsteilnehmers hinsichtlich einer Alternative durch einen zugehörigen subjektiven Nutzen ausgedrückt werden kann. Der Verkehrsteilnehmer wählt die Alternative, die den höchsten Nutzen erzielt, wobei dieser nicht direkt gemessen oder bestimmt werden kann, sondern zum einen von Merkmalen der Alternativen und zum anderen von situativen Merkmalen des Verkehrsteilnehmers bestimmt wird. [Cascetta, 2001, Sheffi, 1985]

Die Entscheidungsmodelle, die von einer Nutzenmaximierung ausgehen, werden ökonometrische Modelle genannt. Ihnen liegen folgende Annahmen zugrunde:

- Die Verkehrsteilnehmer gehören zu einer homogenen Gruppe und verhalten sich rational. Sie wählen die Alternative, die ihren subjektiven Nutzen maximiert.
- Es ist ein Satz möglicher Alternativen und ein Satz von Attributen, die die Alternativen charakterisieren, vorhanden. Ein Verkehrsteilnehmer zeichnet sich durch bestimmte Attribute aus und sieht sich mit einem Satz mehrerer Wahlmöglichkeiten konfrontiert. Dieser Auswahlprozess sei bereits vordefiniert, so dass der Entscheidungsprozess nur noch aus den möglichen Alternativen erfolgt. (siehe Kapitel 5.7)
- Jeder Verkehrsteilnehmer ordnet jeder Alternative bewusst oder unbewusst einen bestimmten subjektiven Nutzen zu. Die Modellierung geht davon aus, dass nicht alle Gründe des Einzelnen zur Wahl einer Alternative bekannt sind. Daher wird der Nutzen durch zwei Komponenten beschrieben:
  - Einem mittleren oder systematischen Nutzen, der in funktionalem Zusammenhang zu den Attributen steht, und
  - einem Fehlerterm, der den unterschiedlichen Informationsstand oder die unterschiedliche Merkmalsgewichtung der Verkehrsteilnehmer auch innerhalb einer Personengruppe widerspiegelt, so dass sie den Nutzen einer Alternative unterschiedlich einschätzen.

Mathematisch lässt sich der Nutzen  $U_k$ , der sich aus der Wahl der Route  $k$  einer Quelle-Ziel-Beziehung  $i$  aus allen möglichen Routen  $K_i$  für einen Verkehrsteilnehmer einer verhaltenshomogenen Personengruppe ergibt, folgendermaßen ausdrücken:

$$U_k = V_k + \varepsilon_k \quad (5-1)$$

mit:

- $V_k$       mittlerer oder systematischer Nutzen von Route  $k$  mit  $k \in K_i$ ;  
 dieser Betrag ist für alle Verkehrsteilnehmer einer Personengruppe gleich.
- $\varepsilon_k$       Fehlerterm, wobei  $E[\varepsilon_k] = 0$  und somit  $E[U_k] = V_k$ .

Der systematische Nutzen  $V_k$  kann sich aus mehreren Komponenten wie etwa der Reisezeit oder Mautkosten zusammensetzen, die meist linear kombiniert werden:

$$V_k = \sum_j \beta_j X_{jk} \quad (5-2)$$

mit:

$X_{jk}$       Attribut der Route  $k$ , wobei es sich aus den Einzelwerten der Kanten  $a$  von Route  $k$  zusammensetzt:  $X_{jk} = \sum_m a_m x_{jm}$

$\beta_j$       Gewichtungparameter des Attributs  $X_j$ .

Da Attribute wie etwa die Reisezeit einen negativen Nutzen für den Verkehrsteilnehmer darstellen, wird der Gewichtungparameter  $\beta_j$  normalerweise mit negativen Werten belegt. Der systematische Nutzen  $V_k$  lässt sich entsprechend als Kosten  $PC_k$  der Route  $k$  folgendermaßen ausdrücken:

$$V_k = -PC_k. \quad (5-3)$$

Der stochastische Nutzenbetrag wird dann mit Hilfe einer Wahrscheinlichkeitsverteilung mit dem Erwartungswert  $E(x)=0$  bestimmt, wobei unterschiedliche Wahrscheinlichkeitsverteilungen verwendet werden können. [Dios Ortúzar & Willumsen, 1997, Sheffi, 1985]

### Box-Cox-Transformation

Gleichung ( 5-2 ) drückt die Parameter in linearer Form aus und enthält meist eine Mischung aus qualitativen und quantitativen Größen (bspw. Sicherheit oder attraktives Umfeld im Vergleich zur Reisezeit oder Weglänge), so dass das Problem entsteht, wie diese beschrieben und kombiniert werden sollten. Wenn theoretische Gründe zur Wahl einer bestimmten Form fehlen, besteht die Möglichkeit, aus vorhandenen Daten eine passende zu bestimmen. Eine Methode dazu, die aus der Ökonomie abgeleitet ist, ist die Box-Cox-Transformation. Mit ihr kann bestimmt werden, welches die am besten geeignete Transformation der positiven Variablen  $x$  ist. Nacheinander wird die Zielgröße mit durchlaufendem Exponent  $\tau$  transformiert bzw. folgendermaßen umgeformt:

$$x^{(\tau)} = \begin{cases} (x^\tau - 1)/\tau, & \text{falls } \tau \neq 0 \\ \log x, & \text{falls } \tau = 0 \end{cases} \quad (5-4)$$

wobei  $\tau$  der unbekannte Parameter ist. Eingesetzt in Gleichung ( 5-2 ) ergibt sich:

$$V_k = \sum_j \beta_j x_{jk}^{(\tau_j)}. \quad (5-5)$$

Mit diesen neuen  $x$ -Werten wird jeweils eine Regression durchgeführt und die Residuen ermittelt. Je kleiner die Residuen und somit die Abweichungen vom Modell zu den Messdaten sind, desto besser ist die gewählte Transformation.

Diese Methode stellt die generalisierte Form einer Gruppe von Funktionen dar, von denen bestimmte Ausführungen häufig Anwendung finden. Setzt man  $\tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_k = 1$ , reduziert sich die Gleichung auf die ursprüngliche lineare Form. Sind alle  $\tau_k = 0$ , erhält man die häufig verwendete log-lineare Form. [Dios Ortúzar & Willumsen, 1997]

Einige Formen ökonometrischer Entscheidungsmodelle werden im Folgenden kurz vorgestellt. Ein detaillierter Überblick und weitere Ausführungen sind in der Literatur zu finden (bspw. [Cascetta, 2001, Dios Ortúzar & Willumsen, 1997, Ramming, 2002, Sheffi, 1985]).

### Probit-Modell

Das Probit-Modell erhält man, wenn der stochastische Nutzenbetrag durch eine Normalverteilung ausgedrückt wird:

$$\varepsilon_k \sim N(0, \sigma_k^2) \quad (5-6)$$

mit:

$$\sigma_k^2 \quad \text{Varianz der stochastischen Nutzenkomponente der Alternative } k.$$

Daraus ergibt sich, dass auch der subjektive Nutzen  $U_k$  normalverteilt ist. Unter der Annahme, dass die Einschätzung des subjektiven Nutzens der Alternativen unabhängig voneinander ist, ist deren Differenz wiederum eine normalverteilte Zufallsgröße (hier für den bimodalen Fall ausgedrückt, wenn nur zwei Alternativen vorliegen):

$$U_1 - U_2 \sim N(\Delta V, \sigma^2) \quad (5-7)$$

mit:

$$\Delta V = V_1 - V_2 \quad \text{Erwartungswert}$$

$$\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 \quad \text{Varianz.}$$

Alternative 1 wird gewählt, wenn  $U_1 > U_2$ . Die Wahrscheinlichkeit dafür ergibt sich zu:

$$P_1 = P(U_1 > U_2) = P(U_1 - U_2 \geq 0) = 1 - P(U_1 - U_2 \leq 0) = 1 - \Phi\left(\frac{\Delta V}{\sigma}\right) \quad (5-8)$$

mit:

$$\Phi(x) \quad \text{Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung.}$$

Gleichung ( 5-8 ) ist allerdings nicht direkt bestimmbar, da der systematische Nutzen nicht unabhängig von  $\sigma$  bestimmt werden kann. Der Nachteil dieses Modells im multinominalen Fall ist, dass es nicht geschlossen analytisch lösbar ist und ein großer Rechenaufwand entsteht. [Cascetta, 2001, Dios Ortúzar & Willumsen, 1997, Steierwald & Künne, 1994]

### Logit-Modell

Das gebräuchlichste Modell ist das Logit-Modell, das anstelle einer Normalverteilung eine Gumbel-Verteilung verwendet und dadurch geschlossen analytisch lösbar wird. Der Ansatz des Multinomialen Logit-Modells lautet:

$$P_k = \frac{e^{\theta V_k}}{\sum_{l \in K_i} e^{\theta V_l}} = \frac{1}{1 + \sum_{l \neq k} e^{\theta(V_l - V_k)}} \quad (5-9)$$

mit:

$\theta$  Skalierungsfaktor, mit dem beeinflusst werden kann, wie stark Änderungen in den Kosten Auswirkungen auf die Auswahlwahrscheinlichkeit haben, wobei  $\theta > 0$ .

Mit Gleichung ( 5-3 ) ergibt sich

$$P_k = \frac{e^{-\theta PC_k}}{\sum_{l \in K_i} e^{-\theta PC_l}} = \frac{1}{1 + \sum_{l \neq k} e^{\theta(PC_k - PC_l)}} \quad (5-10)$$

mit:

$PC_k$  Kosten der Route  $k$ , wobei  $PC_k = \sum_{a \in K} LC_a$ .

Das Logit-Modell kann zu unrealistischen Wahlwahrscheinlichkeiten für Routen führen, die sich in großen Teilen überlappen, da sie als voneinander unabhängig behandelt werden. Um diesem Effekt entgegenzuwirken, wurde von Cascetta et al. [1996a] [1996b] eine Modifizierung zum sogenannten C-Logit-Modell vorgenommen. [Dios Ortúzar & Willumsen, 1997, Sheffi, 1985]

### C-Logit-Modell

Die Wahlwahrscheinlichkeit  $P_k$  einer Alternative  $k$  mit  $k \in K_i$  wird bestimmt durch:

$$P_k = \frac{e^{\theta(V_k - CF_k)}}{\sum_{l \in K_i} e^{\theta(V_l - CF_l)}} \quad (5-11)$$

Der Term  $CF_k$  wird als „commonality factor“ von Route  $k$  bezeichnet und ist direkt proportional zur Überlappung von Route  $k$  mit einer Alternative  $l$ . Von Cascetta et al. [1996a] werden verschiedene Definitionen von  $CF_k$  angegeben:

$$1) \quad CF_k = \beta \cdot \ln \sum_{l \in K_i} \left( \frac{L_{lk}}{\sqrt{L_l L_k}} \right)^\gamma \quad (5-12)$$

$$2) \quad CF_k = \beta \cdot \ln \sum_{a \in \Gamma_k} \left( \frac{l_a}{L_k} N_a \right) \quad (5-13)$$

$$3) \quad CF_k = \beta \cdot \sum_{a \in \Gamma_k} \left( \frac{l_a}{L_k} N_a \right) \quad (5-14)$$

$$4) \quad CF_k = \beta \cdot \ln \left[ 1 + \sum_{l \in K_i \text{ und } l \neq k} \left( \frac{L_{lk}}{\sqrt{L_l L_k}} \right) \left( \frac{L_k - L_{lk}}{L_l - L_{lk}} \right) \right] \quad (5-15)$$

mit:

$L_l$ bzw. $L_k$	Länge der Route $l$ bzw. $k$
$L_{lk}$	Länge des Routenabschnitts, der Route $l$ und $k$ gemein ist
$\Gamma_k$	Kantensatz der Route $k$
$l_a$	Länge der Kante $a$
$N_a = \sum_{l \in K_i} \delta_{al}$	für alle realen Kanten; 1, wenn es sich um eine Verbindung zu einer Quelle-/ einem Ziel handelt
$\delta_{al}$	Parameter, der beschreibt, ob Kante $a$ zu Route $l$ gehört ( $\delta_{al} = 1$ ) oder nicht ( $\delta_{al} = 0$ )
$\beta$	Parameter zur Gewichtung, wie stark die Überlappung gegenüber den Kosten berücksichtigt wird
$\gamma$	Parameter, wobei $\gamma > 0$ .

Drückt man den negativen Nutzen durch Transportkosten aus (siehe Gl. ( 5-11 )), bestimmt sich die Wahlwahrscheinlichkeit  $P_k$  einer Alternative  $k$  mit  $k \in K_i$  zu:

$$P_k = \frac{e^{\theta(-PC_k - CF_k)}}{\sum_{l \neq k} e^{\theta(-PC_l - CF_l)}} = \frac{1}{1 + \sum_{l \neq k} e^{\theta(-PC_l - CF_l - (-PC_k - CF_k))}} = \frac{1}{1 + \sum_{l \neq k} e^{-\theta(PC_l - PC_k + CF_l - CF_k)}} \quad (5-16)$$

mit:

$$PC_k \quad \text{Kosten der Route } k, \text{ wobei } PC_k = \sum_{a \in k} LC_a.$$

Cascetta et al. [1996a] geben allerdings keine Hinweise, welcher Commonality Factor vorzugsweise zu verwenden ist. Die Autoren haben anhand eines kleinen theoretischen Netzes gezeigt, dass bei Verwendung des Commonality Factors der Gleichung ( 5-12 ) größtenteils übereinstimmende Ergebnisse mit den Wahlwahrscheinlichkeiten eines Probit-Modells resultieren. [AIMSUN 5.0, 2005, Dios Ortúzar & Willumsen, 1997, Ramming, 2002, Sheffi, 1985, Steierwald & Künne, 1994]

## 5.5 Netzmodell

Ein Verkehrsnetzmodell umfasst die notwendigen Informationen über die Netzgeometrie und die Bewertung der Netzelemente. Die mathematische Beschreibung erfolgt mit Hilfe der Graphentheorie. Ein mathematischer Graf besteht aus den zwei wesentlichen Elementen Knoten und Kante. Ein Knoten befindet sich an einer Stelle, an der der Verkehrsteilnehmer eine Entscheidungsmöglichkeit hat. In einem Straßennetz kann dies beispielsweise die Entscheidung für Geradeausfahren oder Rechts-/ Linksabbiegen sein. Eine Kante verknüpft die Knoten miteinander und ist als gerichtetes Objekt abgebildet, was bedeutet, dass jede Richtung einer Straße als eigene Kante beschrieben wird. Die Kanten sind mit Attributen behaftet, die ihre Eigenschaften beschreiben. Aus den Attributen lässt sich der Aufwand, der zur Überwindung der Kante vom Verkehrsteilnehmer aufzubringen ist, ermitteln. Er wird auch als Widerstand bezeichnet.

Auf Basis des Widerstands wird eine Bewertung durchgeführt, so dass eine systematische Auswahl von Routen erfolgen kann. Die individuellen Präferenzen, die der einzelne bei seiner

Routenwahl bewusst oder unbewusst einfließen lässt, können dabei vielseitig sein. Die Einflussgrößen können sowohl objektiver wie subjektiver Natur sein und von der Reisezeit, der Weglänge, Straßenbenutzungsgebühren, dem Auslastungsgrad bis hin zur Behinderungsfreiheit der Fahrt reichen. Da die Reisezeit und die Weglänge als die weitaus einflussreichsten Größen eingestuft werden, werden sie häufig als einzige Einflussgrößen berücksichtigt.

Die Verknüpfung der Einflussgrößen erfolgt meist in Form eines additiven Ansatzes, wobei zunächst eine Umrechnung der unterschiedlichen Einheiten (Sekunden, Geldeinheiten, Anzahl Haltevorgänge) in eine allgemein gültige erfolgen muss.

Zu berücksichtigen ist, dass unterschiedliche Verkehrsteilnehmergruppen wie etwa Pkw-Fahrer gegenüber Lkw-Fahrern, aber auch Ortskundige gegenüber in dem Verkehrsnetz Fremden eine andere Bewertung haben können und dies folglich auch in der Widerstandsfunktion abgebildet werden sollte. [Dios Ortúzar & Willumsen, 1997, Friedrich & Schleupen, 2006, Ramming, 2002, Schnabel et al., 1997]

## 5.6 Routensuche

Die Routensuche hat zur Aufgabe, die günstigste Verbindung zwischen zwei Punkten und nächst bester Alternativen zu bestimmen. Die Bestimmung kürzester Wege stellt ein Optimierungsproblem dar, für das eine Reihe von Lösungsverfahren existiert, wobei man mathematisch zwischen Matrixalgorithmen und Baumalgorithmen unterscheidet.

Matrixalgorithmen liefern simultan die kürzesten Wege zwischen allen Quelle-Ziel-Paaren. Sie basieren auf einer Widerstandsmatrix, die alle Netzelemente in Beziehung setzt, wobei der größte Teil zunächst mit „unendlich“ besetzt ist. Nur die Felder der Matrix sind mit endlichen Widerstandswerten besetzt, die eine direkte Verbindung zwischen den beiden entsprechenden Netzelementen kennzeichnen. In einem iterativen Prozess wird die Ausgangsmatrix in die Matrix der Kürzesten-Routen-Widerstände umgewandelt. Aufgrund der Matrixstruktur, die alle Netzelemente in Beziehung setzt, sind sie speicherintensiv und werden in der Verkehrsplanung kaum verwendet.

Baumalgorithmen müssen einmal für jeden Quellknoten angewendet werden, um einen Satz aller kürzesten Routen zu erhalten, weshalb ihre Anwendung in der Verkehrsplanung deutlich effektiver ist. Grundsätzlich lassen sich zwei Basisalgorithmen unterscheiden, der Algorithmus von Moore [1957] und der von Dijkstra [1959].

Beim Algorithmus von Moore werden von dem Startknoten aus die angrenzenden Knoten gesucht und mit dem Wert 1 markiert. In jedem weiteren Schritt  $i$  werden von den zuletzt mit  $(i-1)$  markierten Knoten die benachbarten und noch nicht markierten Knoten mit  $i$  markiert. Der Algorithmus endet, wenn entweder der Endknoten oder aber alle vom Startknoten aus erreichbaren Knoten markiert sind.

Diese Methode lässt sich auch auf die Suche nach dem kürzesten Weg in einem gewichteten Grafen übertragen. Dazu wird die Markierung der Knoten mit Zahlen aus einer einfachen Reihenfolge durch die Markierung mit der Summe aus der Markierung des Knotens, zu dem der Knoten adjazent ist, ersetzt. Diese Markierung wird nur dann durchgeführt, wenn die Summe kleiner ist, als die Markierung, die der Knoten eventuell schon besitzt.

Der Nachteil des Algorithmus von Moore liegt darin, dass es durch die willkürliche Wahl eines Knotens aus der Kandidatenmenge vorkommen kann, dass bereits bearbeitete Knoten mehrmals durch neue Markierungen optimiert werden. Das sich wiederholende Durchlaufen des Grafen kann so zu einer unwirtschaftlichen Rechenzeit führen.

Eine Verbesserung des Routensuchalgorithmus stellt der Dijkstra-Algorithmus dar. Er basiert auf der Aufteilung der Knoten und Kanten in disjunkte Mengen. Die Knotenmenge A beinhaltet alle Knoten, die bereits zum kürzesten Weg gehören. Knotenmenge B umfasst die Kandidaten und auf Menge C entfallen die restlichen Knoten. Die Kantenmengen I, II und III bestehen aus den Kanten, die den Baum bereits bestimmter kürzester Wege bilden, aus den Kanten, von denen als nächstes eine zu den kürzesten Wegen gehören wird, und aus den Restkanten.

Die Initialisierung ordnet alle Knoten der Menge C und alle Kanten der Menge III zu. Nachdem der Startknoten in die Menge A übertragen wurde, wiederholen sich im Algorithmus folgende zwei Schritte:

1. Knoten, die zu dem zuletzt nach A geschriebenen Knoten adjazent sind, kommen nach B, wenn sie vorher in C waren - gleichzeitig kommen die inzidenten Kanten in die Menge II. Bei angrenzenden Knoten, die schon in der Menge B stehen, ersetzt die neue inzidente Kante die alte in II, wenn der Widerstand dadurch verbessert wird.
2. Der Knoten aus B mit dem minimalen Abstand zum Startknoten wird zur Menge A hinzugefügt und ist in der nächsten Iteration Ausgangsknoten. Die inzidente Kante wird zur Menge I mit dem Baum kürzester Wege hinzugefügt. Ist der Endknoten zur Menge A hinzugefügt worden, so kann der Algorithmus beendet werden. Menge B wird als Sequenzliste, die nur die Knoten aufnimmt, die wirklich Kandidat sind, implementiert. So muss das minimale Element nur noch in der kleinstmöglichen Kandidatenliste gesucht werden, was den Gesamtrechenaufwand reduziert. [Dios Ortúzar & Willumsen, 1997, Ramming, 2002, Serwill, 1994, Wermuth, 1994]

## 5.7 Bestimmung des Routensatzes

Routensuchalgorithmen wurden entwickelt, um Routen zwischen einer Quelle-Ziel-Relation zu bestimmen. Die Herausforderung bei der Modellierung von Verkehrsumlegungsmodellen besteht aber auch darin, aus den existierenden Routen diejenigen auszuwählen, die für den einzelnen Verkehrsteilnehmer wirklich von Relevanz sind. Da die Anzahl existierender Routen gewöhnlich hoch ist, der individuelle Routensatz schwierig bzw. nur mit hohem Aufwand zu erfassen ist, ist die Bestimmung der Attraktivität jeder Alternative schwer. Grundsätzlich bestehen folgende Möglichkeiten, mit der Routensatzgröße umzugehen:

- Man betrachtet nur einen Teil der Alternativen, die im Rahmen einer Stichprobe bestimmt wurden. Hierbei besteht allerdings der Nachteil, dass realistische Routen ausgelassen werden.
- Es werden alle Routen zur Auswahl gestellt und man versucht, durch den modelltechnischen Auswahlprozess die Auswahlwahrscheinlichkeit für unrealistische Alternativen gering zu halten. An dieser Vorgehensweise ist negativ zu bewerten, dass es einen hohen rechen-technischen Aufwand bedeutet und dass unrealistische Routen mitberücksichtigt werden, so dass die Wahl zwischen den realistischen nicht immer adäquat abgebildet wird.

Das Problem bei der Bestimmung des Routensatzes besteht darin, dass Alternativen im Modell berücksichtigt werden, die in der Realität nicht gewählt würden oder umgekehrt. Die Beschreibung des Zusammenhangs zwischen dem modelltechnischen Nutzen einer Alternative und der beobachteten Routenwahl ist eine Herausforderung, da das Verhalten innerhalb einer Gruppe aufgrund von persönlichen Präferenzen und unterschiedlichen Wissensständen stark variieren kann. Es besteht die Möglichkeit, eine heuristische oder deterministische Routensatzgenerierung vorzunehmen, die bestimmte Alternativen auswählt und diese mit den Daten einer Erhebung zu überprüfen. Oder der Routensatz wird direkt aus den Befragungsdaten bestimmt. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, einen zufälligen Routensatz zu verwenden, wozu eine Verteilungsfunktion über alle möglichen Routensätze und die Wahlwahrscheinlichkeit jeder Alternative innerhalb eines Satzes definiert sein muss. [Dios Ortúzar & Willumsen, 1997, Ramming, 2002, Sheffi, 1985]

## 5.8 Verkehrsumlegungsmodelle

Verkehrsumlegungsmodelle lassen sich anhand unterschiedlicher Kriterien klassifizieren. Eine Unterscheidungsmöglichkeit ist die Abhängigkeit der Widerstände von der Belastung. Wird angenommen, dass die Kosten unabhängig von der Belastung sind, werden beispielsweise Verkehrsstauungen vernachlässigt, und es resultieren feste Kosten. Diese Verfahren werden als Umlegungen in gering belasteten Netzen (Uncongested Network Assignment) bezeichnet. Verkehrsumlegungen in hoch belasteten Netzen (Congested Network Assignment) liegen eine Abhängigkeit der Widerstände von der Verkehrsbelastung zugrunde.

Eine andere Klassifizierungsmöglichkeit lässt sich anhand des verwendeten Routenwahlmodells vornehmen. Deterministische Modelle gehen davon aus, dass der wahrgenommene Nutzen eines Weges deterministisch ist und alle Verkehrsteilnehmer sich für eine Alternative mit minimalen mittleren Kosten entscheiden. Stochastische Modelle nehmen dagegen an, dass der wahrgenommene Nutzen eines Weges eine Zufallsvariable ist, so dass Schwankungen resultieren. [Cascetta, 2001]

Aus diesen Unterscheidungen ergeben sich folgende Modellformen:

### Bestwegumlegung

Mit den in Kapitel 5.6 aufgeführten Routensuchalgorithmen lässt sich die beste Route zwischen einer Quelle und einem Ziel bestimmen. Wird die gesamte Verkehrsnachfrage dieser Beziehung der Route zugewiesen, spricht man von einer Bestwegumlegung oder Alles-oder-Nichts-Umlegung. Dieser Methode liegen die Annahmen zugrunde, dass alle Verkehrsteilnehmer die gleichen Attribute annehmen, sie in gleicher Weise gewichtet (= deterministisch) und die Widerstände unabhängig von der Verkehrsbelastung sind. Diese Bedingungen treffen wohl eher nur für gering belastete Netze mit wenigen und mit stark unterschiedlichen Kosten behafteten Alternativen zu.

### Stochastische Umlegung im gering belasteten Netz

Bei stochastischen Ansätzen werden die Annahmen in der Hinsicht aufgeweicht, dass zwischen den tatsächlichen Kosten und den wahrgenommenen bzw. gefühlten Kosten unterschieden wird. Dies bedeutet, dass den Verkehrsteilnehmern die wahren Kosten nicht genau bekannt sind und dass die Einschätzungen eines Verkehrsteilnehmers – je nach subjektiver Ortskennt-

nis und Beurteilung der Verkehrssituation sowie nach Wertigkeit des Widerstands – mehr oder weniger von den mittleren Kosten der Verkehrsbeziehung abweichen. Die wahrgenommenen Kosten können zudem für ein und dieselbe Route bei mehreren Verkehrsteilnehmern unterschiedlich groß sein, was mit Hilfe einer Wahrscheinlichkeitsverteilung beschrieben werden kann. Zur Abbildung des Routenwahlprozesses ist dann ein diskretes Entscheidungsmodell (siehe Kapitel 5.4) notwendig.

Wie bei der Bestwegumlegung wird auch bei der stochastischen Umlegung in gering belasteten Netzen davon ausgegangen, dass die Kosten und die Verkehrsbelastung konstant sind und voneinander unabhängig sind. Diese Verfahren sind für die Untersuchung von gering belasteten Netzen geeignet und sind ein Teil der Umlegung in Netzen mit hoher Verkehrsbelastung. [Cascetta, 2001]

### **Deterministisches Nutzergleichgewicht**

Eine Verkehrsbeziehung kann meist durch mehrere Wege realisiert werden. Bei der Frage, wie sich die Verkehrsteilnehmer auf die verschiedenen Routen verteilen, ist keine isolierte Betrachtung einzelner Beziehungen oder Wege möglich, da beispielsweise der zunächst widerstandsärmste Weg überlastet sein kann, wenn alle diesen Weg wählen, so dass einige Verkehrsteilnehmer stattdessen auf eine alternative Route ausweichen. Wie sich die Widerstände in Abhängigkeit der Belastung auf den einzelnen Netzelementen ändern, so ändern sich die Reisezeiten<sup>1</sup> auf den einzelnen Routen in Abhängigkeit der Belastung. Ein Verkehrsteilnehmer wählt vor oder während der Fahrt eine Route oder wechselt auf eine bekannte oder auch für ihn neue Alternative. Der Widerstand einer Route ist aber immer auch abhängig von den Entscheidungen der übrigen Verkehrsteilnehmer. Änderungen der Routenwahl einiger Verkehrsteilnehmer bewirken somit eine Verringerung der Verkehrsbelastung der alten Route und einen Anstieg auf der alternativen, was wiederum die Reisezeit auf der einen verringern und auf der anderen erhöhen wird. Daraus resultiert, dass der Wunsch eines Verkehrsteilnehmers, den alternativen Weg zu wählen, wieder abnimmt und er bestrebt ist, die Route zu wechseln, um seine Reisezeit zu minimieren.

Der Großteil der Verkehrsteilnehmer wird das Netz wiederholt befahren und dadurch einen Erfahrungsschatz über die benötigte Reisezeit aufbauen und zu seiner favorisierten Route mit der für ihn geringsten Reisezeit gelangen. Mit der Zeit wird sich eine konstante Verteilung der Verkehrsnachfrage auf dem Netz ergeben, was man auch als Gleichgewichtszustand des Systems, vergleichbar einem ökonomischen Marktgleichgewicht, bezeichnen kann. Die Grundannahme, dass der Preis für ein Produkt aus der Kombination des Angebots mit der Nachfrage entsteht, wurde auf das Verkehrssystem übertragen. Die Verkehrsnachfrage wird dabei als konstant vorausgesetzt und das Verkehrsnetz bildet mit seinen spezifischen Eigenschaften das Verkehrsangebot, bleibt in seiner Struktur gleich und die zugrunde gelegten Widerstandsfunktionen ändern sich während des gesamten Betrachtungszeitraums nicht.

Dieser ökonomische Ansatz, dass sich durch das Bestreben der Verkehrsteilnehmer, ihre Reisezeiten zu minimieren, eine Gleichgewichtszustand, auch Nutzergleichgewicht genannt, ein-

---

<sup>1</sup> Mit dem Begriff „Reisezeit“ sind hier und im Folgenden generell Widerstände entsprechend Kapitel 5.5 gemeint, die die unterschiedlichen Komponenten verbinden.

stellen wird, wurde erstmals von Wardrop [1952] für das Umlegungsproblem formuliert. Der Ansatz (Erstes Wardrop'sches Prinzip) lautet:

„Die Verkehrsteilnehmer wählen ihre Route so, dass die Fahrtdauer auf alternativen Routen gleich und auf allen anderen Routen höher ist. Somit kann kein Verkehrsteilnehmer seine Fahrtdauer durch die Wahl eines anderen Weges verringern.“

Diese Definition setzt voraus, dass die Verkehrsteilnehmer zu jeder Zeit über vollständige und fehlerfreie Informationen (alle Strecken, alle Routen, alle entsprechenden Kosten) verfügen, beständig richtige Entscheidungen hinsichtlich ihrer Routenwahl treffen und alle Teilnehmer identisch in ihrem Verhalten sind. Aus diesem Grund wird dieser Ansatz auch als deterministisch bezeichnet.

Zur Erzeugung des Gleichgewichtszustands existieren unterschiedliche Methoden. Ein heuristisches Verfahren ist beispielsweise das Sukzessivverfahren, bei dem in mehreren Einzelschritten die Verkehrsnachfrage auf das Netz umgelegt wird. Im ersten Iterationsschritt wird ein vorgegebener Anteil der Fahrten auf die ermittelten widerstandsärmsten Wege umgelegt. Nach Änderung der Widerstände auf Grund der bereits umgelegten Verkehrsbelastungen werden wiederum widerstandsärmste Wege ermittelt und die Umlegung für weitere Teile der Restfahrten wiederholt bis die Verkehrsnachfrage zu 100 % verarbeitet ist. Durch die sukzessive Umlegung der Verkehrsnachfrage auf das zunächst leere und dann allmählich immer stärker belastete Netz wird quasi das „Volllaufen“ eines Verkehrsnetzes nachgebildet. Im einfachsten Fall wird nur ein Iterationsschritt durchgeführt und die gesamte Verkehrsnachfrage einer Relation auf den aktuell widerstandsärmsten Weg umgelegt (= Alles-oder-Nichts-Umlegung). Die heuristischen Verfahren vermögen nicht, einen mathematisch exakten Gleichgewichtszustand zu erzeugen. Mit steigender Anzahl an Inkrementen ergibt sich aber eine Verkehrsbelastung, die immer näher an dem des Gleichgewichtszustands ist.

Im Gegensatz zu dem heuristischen Sukzessivverfahren ist die Methode der konvexen Kombination (Convex Combination Method) ein mathematisches Minimierungsverfahren. Diese Methode, häufig auch als Frank-Wolfe-Algorithmus bezeichnet (nach Frank und Wolfe [1956], die diese Vorgehensweise als erste vorgeschlagen haben), ist iterativ und verwendet eine Zielfunktion mit Nebenbedingungen, die es zu minimieren gilt. Das Verfahren löst das nichtlineare Optimierungsproblem durch Überführung in einen linearen Teil und ein eindimensionales nichtlineares Problem. In einem ersten Schritt wird die Richtung gesucht, in der sich die Zielfunktion verbessert. In einem zweiten Schritt wird in diese Richtung zu einem Minimalpunkt der Zielfunktion gegangen. Bei der Anwendung auf die Verkehrsumlegung wird die Suche nach der Richtung durch eine kürzeste Wege Suche gelöst. Diese Vorgehensweise ermöglicht die Bestimmung des exakten Gleichgewichtszustands, allerdings ist sie instabiler und aufwändiger programmtechnisch umzusetzen als das Sukzessivverfahren. [Dios Ortúzar & Willumsen, 1997, Friedrich & Vortisch, 2005, Ramming, 2002, Sheffi, 1985]

### **Stochastisches Nutzergleichgewicht**

Wie bereits bei der stochastischen Umlegung im gering belasteten Netz aufgeführt, wird davon ausgegangen, dass Fehleinschätzungen der Widerstände durch die Verkehrsteilnehmer möglich sind, so dass Schwankungen resultieren. Bei stochastischen Verfahren ist der Gleichgewichtszustand dann erreicht, wenn kein Verkehrsteilnehmer *glaubt*, dass er seine Reisezeit durch einen Wechsel auf eine alternative Route verbessern kann. [Cascetta, 2001]

## Systemoptimum

Der Wegewahl des Individuums, wie sie im deterministischen und stochastischen Nutzergleichgewicht angenommen wird, steht die Routenbetrachtung aus Systemsicht gegenüber. Ein unter volkswirtschaftlichen Gesichtspunkten optimaler Zustand läge dann vor, wenn die Gesamtreisezeit im Netz minimal ist, was als Systemoptimum bezeichnet wird. Dies bedeutet, dass alle Verkehrsteilnehmer darauf bedacht sind bzw. gezielt daraufhin beeinflusst werden, die Gesamtreisezeit (d. h. die gesamten Reisezeiten aller Verkehrsteilnehmer) anstatt ihrer eigenen zu minimieren. Die Bedingung zur Bildung dieses Gleichgewichtszustands findet sich im Zweiten Wardrop'schen Prinzip [Wardrop, 1952]:

„Jeder Verkehrsteilnehmer wählt seine Route so, dass die Summe aller Fahrzeiten minimal wird.“

Der Modellansatz zur Bildung des Systemoptimums sieht also einen restriktiven Eingriff in das Routenwahlverhalten der Verkehrsteilnehmer vor, was etwa durch Erhebung von Mautgebühren möglich wäre. Er steht also im Widerspruch zum Nutzergleichgewicht, was die Nachbildung des wahrscheinlichsten Routenwahlverhaltens der Verkehrsteilnehmer vorsieht. Der Zustand im Systemoptimum ist nicht stabil, kann aber als Referenzgröße verwendet werden.

Zum Unterschied zwischen Nutzeroptimum und Systemoptimum sei angemerkt, dass beide, wenn alle Überlastungseffekte im Netz ignoriert werden oder die Belastung im Netz sehr gering ist, identische Zustände liefern, da dann die Reisezeiten nicht sensitiv auf zusätzliche Belastung reagieren. Steigt die Belastung der Verkehrsbeziehungen aber an, so weichen die Belastungsbilder des Nutzergleichgewichts und des Systemoptimums immer stärker voneinander ab. [Cascetta, 2001, Dios Ortúzar & Willumsen, 1997, Papageorgiou, 1991, Ramming, 2002, Sheffi, 1985]

## 5.9 Modellierung des Verkehrsflusses

Verkehrsflussmodelle beschäftigen sich mit der räumlich-zeitlichen Abwicklung der Bewegungsvorgänge der Verkehrsteilnehmer. Im einfachsten Fall wird jede Strecke des Netzes unabhängig von ihrer Nachbarstrecke betrachtet. Die Reisezeit wird mit Hilfe von Capacity-Restraint-Funktionen bestimmt, die einen Zusammenhang zwischen der Fahrzeit und der Verkehrsstärke in Abhängigkeit der jeweiligen Betriebsweise und Ausbauart des Netzelements liefern. Mit steigender Verkehrsstärke  $q$  im Verhältnis zur Kapazität  $q_{max}$  erhöht sich die Fahrzeit.

Bei der makroskopischen Modellierung (vgl. [Papageorgiou, 1998]) wird die Bewegung der Gesamtheit der Einzelfahrzeuge als kontinuierliches Fließgeschehen betrachtet und Modelle in Analogien zur Dynamik von Flüssigkeiten oder zur Gaskinetik formuliert. Das kollektive Verhalten mehrerer Fahrzeuge auf einem Streckenabschnitt wird durch die mittlere Verkehrsstärke  $q$ , die mittlere Verkehrsdichte  $k$  und die mittlere Geschwindigkeit  $v$  beschrieben, die als stetige und stetig nach Weg und Zeit differenzierbare Größen angesehen werden und deren Verbindung durch die Kontinuitätsgleichung und den Zusammenhang zwischen Verkehrsstärke  $q$  und Verkehrsdichte  $k$ , der im Fundamentaldiagramm beschrieben ist, ausgedrückt wird. Durch Abbildung der Interaktionen benachbarter Strecken sind makroskopische Verkehrsflussmodelle in der Lage, Rückstauereffekte abzubilden.

Mikroskopische Verkehrsflussmodelle basieren auf der Fahrzeugfolgetheorie, bei der die Bewegungsvorgänge der Verkehrsteilnehmer dynamisch durch einzelne Fahrer-Fahrzeug-Elemente beschrieben werden. Das Fahrzeugfolgemodell legt das Abstandsverhalten der Fahrer bei Kolonnenfahrt und hier im Speziellen die Interaktion zweier aufeinander folgender Fahrzeuge fest. Als Annahme liegt zugrunde, dass der Folgefahrer als Reaktion auf die Aktion des Vorausfahrenden nach Verstreichen einer gewissen Reaktionszeit entsprechend der Geschwindigkeitsdifferenz der beiden Fahrzeuge beschleunigt. Psycho-physische Abstandsmodelle sind darüber hinaus in der Lage, die wahrnehmungsphysiologischen Besonderheiten des menschlichen Auges und individuelle Unterschiede der einzelnen Fahrer zu berücksichtigen (bspw. [Wiedemann, 1974]). Das Überholverhalten wird mit Hilfe des Fahrstreifenwechselmodells abgebildet, das beschreibt, nach welchen Regeln die Fahrzeuge einen Fahrstreifenwechsel durchführen.

Die dargestellten Varianten stellen die beiden Eckpunkte der Verkehrsflussmodellierung dar. Daneben gibt es eine Reihe von Zwischenstufen, die verschiedenartige Kompromisse suchen, meist aus der Motivation heraus, eine schnellere Berechenbarkeit zu erreichen oder die Dynamik des Verkehrsflusses realistischer abzubilden.

Dazu zählen die Zellularautomaten, bei denen die Fahrzeuge und Netzelemente in hohem Maße abstrahiert und räumlich und zeitlich diskret abgebildet werden. Grundidee ist, den Fahrweg in kleine Segmente zu unterteilen, wobei die Größe entsprechend der verallgemeinerten Fahrzeuglänge (= physikalische Fahrzeuglänge plus der Distanz eines Fahrzeugs im Stau zum Vorderfahrzeug) gewählt wird. Das einzelne Segment kann entweder leer oder mit genau einem Fahrzeug besetzt sein. Die Fortbewegung der Fahrzeuge erfolgt nach einfachen Regeln, so dass die Aktualisierung des Zustands parallel erfolgen kann. Eine einfache Formulierung des Zellularautomaten stammt von Nagel und Schreckenberg [1992] und eine sehr ähnliche von Cremer und Ludwig [1986] und Schütt [1991].

Warteschlangenmodelle (z. B. MATSIM [Nagel, 2005]) versuchen, die Vorteile einer mikroskopischen Simulation mit der Geschwindigkeit einer grob diskretisierten makroskopischen Simulation zu verbinden. Dabei wird jedes Netzelement als Warteschlange aufgefasst, in die die Fahrzeuge eingestellt werden. Frühestens nach Ablauf der minimalen Reisezeit von Anfang der Kante bis zu ihrem Ende können sie diese wieder verlassen, wobei die Reihenfolge des Ein- und Ausgangs der einzelnen Fahrzeuge berücksichtigt wird. Die begrenzte Kapazität einer Netzkante wird dadurch abgebildet, dass aufeinander folgende Fahrzeuge nicht zu kurz hintereinander das Netzelement wieder verlassen können und jede Kante auch nur eine bestimmte Anzahl an Fahrzeugen aufnehmen kann. Ist diese Grenze bei der Folgekante erreicht, werden keine Fahrzeuge mehr an diese weitergegeben und ein Rückstau entsteht.

Eine Zwischenstufe nehmen mesoskopische Flussmodelle ein (z. B. [Leonard et al., 1989], [Mahut, 2001]), bei denen zwar einzelne Fahrzeuge und deren Bewegung durch das Verkehrsnetz modelliert werden, die Fahrzeugbewegungen jedoch ohne Berücksichtigung der Interaktion zwischen Einzelfahrzeugen ausschließlich anhand makroskopischer Zusammenhänge beschrieben werden. Das Cell-Transmission Model von Daganzo [1994] [1995] stellt eine Verfeinerung makroskopischer Ansätze dar, indem das Verkehrsnetz in Raster zerlegt wird. [Friedrich, 2002, Friedrich & Vortisch, 2005]

### 5.10 Mikroskopische Verkehrsflusssimulation

Die Simulation ist eine spezielle Technik dynamisch mathematischer Modelle, bei der „offene“ Lösungsansätze formuliert werden, da eine geschlossene mathematische Formulierung nicht möglich ist. Die Lösung von Teilproblemen erfolgt daher durch Iteration. Das Simulationsprogramm besteht aus einer Reihe von Segmenten, die mathematisch relativ einfach beschrieben werden können und die Komplexität erst durch Verknüpfung einer großen Anzahl von Segmenten zustande kommt. Die dazu verwendeten Gleichungen sind im Wesentlichen logische Gleichungen für Bedingungen, bei deren Erfüllung ein Ereignis eintritt. Die Aufeinanderfolge der Ereignisse und die dadurch resultierenden Systemzustände ergeben die Simulation.

Bei der mikroskopischen Verkehrssimulation werden in den einzelnen Iterationsstufen folgende Aufgaben abgearbeitet: Auf der äußersten Ebene erfolgt die Routensuche. In der darunter liegenden wird die Routenwahl modelliert, bei der die Wahlentscheidung von der Routenbelastung und damit wieder von den Reisezeiten abhängt. Die dazu notwendige Kenntnis der Wirkung der Belastung auf die Reisezeit wird durch ein mikroskopisches Verkehrsflussmodell, das die unterste Ebene darstellt, abgebildet. [Friedrich & Vortisch, 2005]

### 5.11 Verwendung der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation zur Bestimmung der Wirkungspotenziale von Verkehrsinformationen

Wie die Ausführungen der vorangegangenen Kapitel zeigen, besteht der entscheidende Unterschied zwischen statischen und dynamischen Umlegungsverfahren in der Behandlung der Zeit und zwischen makroskopischen und mikroskopischen Modellen in der Abbildung des Verkehrsflusses. Die Intention der vorliegenden Arbeit ist es, den Einfluss unterschiedlicher Informationen auf das Verkehrsverhalten des motorisierten Individualverkehrs im städtischen Bereich zu analysieren. Verkehrsinformationen bzw. Navigation beeinflussen den einzelnen Fahrer individuell, weshalb zur simulationsbasierten Untersuchung dieser Fragestellung eine Abbildung der einzelnen Fahrzeuge notwendig ist, wobei auch Änderungen in ihrer Routenwahl noch während ihrer Fahrt modellierbar sein müssen. Um die Wirkungszusammenhänge gerade bei den sich verändernden Verkehrszuständen identifizieren zu können, ist die Abbildung der Dynamik notwendig. Die mikroskopische Verkehrsflusssimulation bietet die Möglichkeit, die Auswirkungen von Verkehrsinformationen differenziert zu untersuchen, weshalb es in dieser Arbeit als Hilfsmittel verwendet wird.

## **6 Beschreibung der verwendeten Verkehrsflusssimulationssoftware AIMSUN NG**

### **6.1 Systembeschreibung**

Die allgemeinen verkehrstechnischen Annahmen und Modellierungen von Verkehrsmodellen wurden in Kapitel 5 erläutert. Im Folgenden werden kurz die programmspezifischen Umsetzungen des in der vorliegenden Arbeit verwendeten Softwarepackets AIMSUN NG (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Not-Urban Networks Next Generation, TSS – Transport Simulations Systems) aufgezeigt, so weit sie einen Einfluss auf die Herangehensweise und Umsetzung der Untersuchung haben und dem Verständnis des Grundzusammenhangs dienen.

Bei dem Softwarepaket AIMSUN NG handelt es sich um eine mikroskopische Verkehrssimulationssoftware, was bedeutet, dass das Verhalten jedes einzelnen Fahrzeugs während seiner gesamten Zeit im Verkehrsnetz modelliert wird. Das Verhalten wird dabei durch Kombination verschiedener Modelle generiert, wobei die einzelnen Elemente (wie bspw. Fahrzeuge, Detektoren, Lichtsignalanlagen, Einspeisungspunkte) ihren Zustand über die Simulationszeit ändern, die in kurze, feste Zeitschritte unterteilt ist.

Ein Simulationsexperiment wird durch eine Vielzahl von Simulationsparametern beschrieben. Dabei lassen sich die für ein Experiment benötigten Daten in die vier Kategorien Netzbeschreibung, Verkehrsnachfragedaten, Daten für die Verkehrsregelung und -steuerung und Daten für den Öffentlichen Verkehr unterteilen. Da in der vorliegenden Untersuchung Öffentlicher Verkehr nicht betrachtet wird, wird darauf im Folgenden nicht weiter eingegangen. [AIMSUN 4.2, 2004] [AIMSUN 5.0, 2005] [AIMSUN NG, 2005]

#### **6.1.1 Netzmodell**

Das Netzmodell, bestehend aus verschiedenen Netzelementen, beschreibt die Verkehrsinfrastruktur. Es wird aus einzelnen, gerichteten Kanten zusammengesetzt, die mittels Knoten bzw. Knotenpunkten verbunden werden. Die Eigenschaften einer Kante, wie beispielsweise die Anzahl der Fahrstreifen, Geschwindigkeitslimits oder ihre Straßenklasse, werden über Attribute zugewiesen.

Da digitale Karten und Lagepläne in AIMSUN NG importiert werden können, besteht die Möglichkeit, das Simulationsnetz maßstabsgetreu und georeferenziert abzubilden.

### 6.1.2 Verkehrsnachfrage

Die Verkehrsnachfrage kann auf unterschiedliche Art in das Netz eingespeist werden. Je nach dem, was untersucht werden soll und wie groß das simulierte Straßennetz ist, sind folgende Arten möglich:

- Abbiegeanteile (in jedem Knotenpunkt erfolgt eine Aufteilung des in einer Zufahrt ankommenden Verkehrs auf die möglichen Abbiegerichtungen),
- explizite Routenvorgaben (Zusammenfassung von Abbiegeentscheidungen für eine Reihe von Knotenpunkten) und
- Quelle-Ziel-Matrizen (Verkehrsnachfrage zwischen einzelnen Ausgangs- und Zielpunkten ohne Zuweisung fester Routen; zur Bestimmung möglicher Wege und Verteilung der Fahrzeuge auf diesen ist ein Routenwahlmodell notwendig).

Entsprechend der gewählten Nachfragemodellierung sind weitere Daten notwendig. Bei der Verwendung von Abbiegeanteilen und auch bei den Routenvorgaben sind die Verkehrsstärken an den Einspeisungspunkten in das Netz und die Abbiegeanteile in allen Knotenpunkten anzugeben. Werden Quelle-Ziel-Matrizen verwendet, sind die einzelnen Quellen und Ziele zu definieren und die Anzahl der Fahrten von jeder Quelle zu jedem Ziel festzulegen. Eine Quelle bzw. ein Ziel kann dabei an mehreren Punkten an das Netz angehängt sein und die Nachfrage somit an unterschiedlichen Stellen eingespeist werden.

Die Nachfrage kann bei allen drei genannten Arten über die Zeit konstant oder veränderlich beschrieben werden. Abbiegeanteile, Routenanteile oder Matrizen sind dann jeweils nur für einzelne Zeitintervalle gültig.

Die unterschiedlichen Fahrzeugtypen, wie beispielsweise Pkw oder Lkw, können über einen entsprechenden Schwerverkehrsanteil oder unterschiedliche Quelle-Ziel Matrizen berücksichtigt werden. Ihre fahrdynamischen Eigenschaften können durch Variation mehrerer Fahrzeugparameter bzw. durch Angabe deren Lage- und Streumaße entsprechender Größen (z. B. Wunschgeschwindigkeit, maximale Beschleunigung, Abstand beim Halten) festgelegt werden. Mehrere Fahrzeugtypen können auch zu einer Fahrzeugklasse gruppiert werden (z. B. Zuordnung der Fahrzeugtypen „Lkw bis 7,5 t“ und „Lkw über 7,5 t“ zur Klasse „Schwerverkehr“), um dieser Klasse Restriktionen zuweisen zu können (z. B. Sperrung einer Straße für den Schwerverkehr).

### 6.1.3 Daten für die Verkehrsregelung und -steuerung

Die verkehrsregelnden und -steuernden Daten werden unterteilt in Daten für Lichtsignalsteuerungen, Informationen zu Vorfahrtsberechtigungen und Daten für Rampenzuflussregelungsanlagen.

Lichtsignalisierten Knotenpunkten werden Angaben zur Lage der Signalgeber, zu den Signalgruppen und zur Dauer und zu den Sequenzen der einzelnen Phasen hinterlegt. Die einzelnen Signalpläne der Knotenpunkte in einem Gebiet können dann zu einem Signalisierungsplan zusammengefasst werden.

In unsignalisierten Knotenpunkten können Vorfahrtsprioritäten festgelegt werden und Vorfahrt-achten- und Stop-Schilder lokalisiert werden, die entsprechendes verkehrsrechtliches Verhalten bewirken.

## 6.2 Modellierung des Fahrerhaltens

Die Bewegung der einzelnen Fahrzeuge durch das Netz wird in kleinen, festgelegten Zeitintervallen, den Simulationsschritten, nachgebildet. Die Planung und die Ausführung der Fahrmanöver werden auf drei, nämlich der strategischen, der taktischen und der operationalen Ebene vollzogen, wobei jede Ebene der darunter liegenden Vorgaben macht.

Auf der obersten, der strategischen Ebene, wählt der Verkehrsteilnehmer eine Route von seinem Ausgangspunkt zu seinem Ziel. Die Planung, die er dabei anstellt, umfasst zeitlich die gesamte Fahrtdauer und räumlich das gesamte ihm zur Verfügung stehende Netz. Wird die Verkehrsnachfrage in Form von Quelle-Ziel-Matrizen eingespeist, kann die Routenwahl zeitabhängig erfolgen.

Die darunter liegende taktische Ebene umfasst einen Zeitraum von mehreren Sekunden bis zu wenigen Minuten und deren räumliche Ausdehnung. Hier wird ermittelt, welchen kurzfristigen Plan ein Fahrer aufgrund erkennbarer oder vorhersehbarer Bedingungen seiner näheren Umgebung verfolgen soll. Dies bezieht sich beispielsweise auf das Einordnen auf den richtigen Fahrstreifen im Vorfeld eines Knotenpunkts oder das Einfädeln auf der Autobahn vom Beschleunigungsfahrstreifen aus.

Die unterste Ebene des operationalen Fahrerhaltens steuert das konkrete Längs- und Querverhalten des Fahrzeugs mit entsprechenden Lenk-, Beschleunigungs- und Bremsvorgaben mit Hilfe von Verhaltensmodellen. In AIMSUN NG wird dazu das Fahrzeugfolgemodell und Fahrstreifenwechselmodell nach Gipps [1981] [1986b] [1986a] verwendet. Der zeitliche Horizont der operationalen Ebene ist sehr klein, in der Größenordnung bis zu etwa einer Sekunde und umfasst die unmittelbare räumliche Umgebung des Fahrzeugs. Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Ebenen und Teilmodelle enthält Anhang A.

## 6.3 Dynamische Verkehrsumlegung

Liegt die Nachfrage in Form von Quelle-Ziel-Matrizen vor, kann mittels der dynamischen Umlegung die notwendige Routenwahl erfolgen. Die Anzahl der Fahrten zwischen jedem Quelle-Ziel-Paar kann dabei zeitlich in unterschiedliche Intervalle und auch für bestimmte Fahrzeugtypen aufgeteilt sein. Einem Simulationslauf können mehrere Matrizen (z. B. Pkw, Lkw) hinterlegt werden, wobei sich der zu einem Zeitpunkt erzeugte Verkehr aus den Fahrzeugen aller Matrizen, deren Intervall diesen Zeitpunkt einschließt, zusammensetzt.

Einem Fahrzeug wird bei seiner Einspeisung ins Netz eine bestimmte der möglichen Routen zu seinem Ziel zugeordnet und verfolgt diese auch bis zum Ziel. Ein als geführt definiertes Fahrzeug kann auch noch weitere Male unterwegs seine Route ändern, sofern von seinem aktuellen Standort aus eine bessere Route zu seinem Ziel besteht (Re-Routing).

Die unterschiedlichen bei der Umlegung betrachteten Routen können entweder durch den Nutzer festgelegt, als Ergebnis eines anderen (auch makroskopischen) Verkehrsplanungsmo-

dells übernommen oder durch einen Suchalgorithmus (Bestwegsuche oder Bestimmung k-bester-Wege) bestimmt werden.

### 6.3.1 ‚Link‘-Kosten

Die Suche und Bewertung der einzelnen Wege basiert auf Kosten, die mit jedem einzelnen Netzelement verbunden sind. Die Abbildung der einzelnen Elemente in AIMSUN NG erfolgt dabei in der für die Routensuche notwendigen Knoten-Kanten-Darstellung. Das Netz wird aber nicht in Streckenkanten und Abbiegekanten unterteilt, sondern in ‚Links‘<sup>2</sup>, die jeweils zwei Knoten verbinden. Dies bedeutet, dass jede Streckenkante in AIMSUN NG in so viele Links unterteilt wird, wie diese Kante abgehende Abbiegekanten hat. Diese Vorgehensweise bewirkt, dass die Abbiegevorgänge mit ihren Auswirkungen auf die davor befindliche Strecke (z. B. beim Linksabbiegen unter Beachtung des Gegenverkehrs im Vergleich zum Geradeausfahren) eine hohe Berücksichtigung finden und durch spezielle Zuordnung von Linkkosten differenziert bewertet werden können. [Torday & Dumont, 2003].

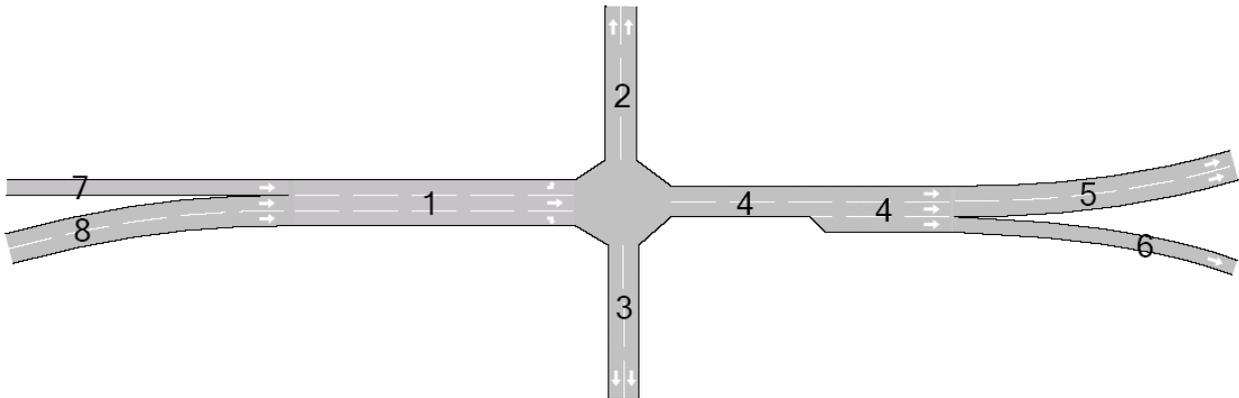


Bild 6.1: Beispiel einer Netzdarstellung in AIMSUN NG

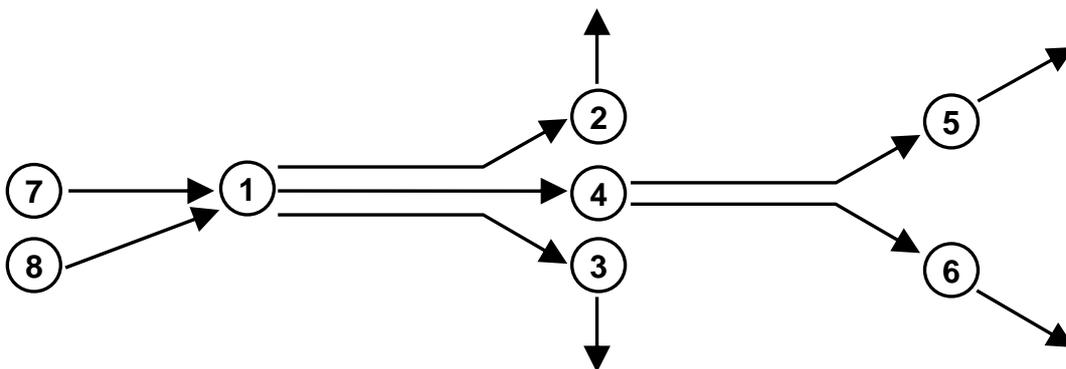


Bild 6.2: Darstellung des entsprechenden Netzes bei der Routenberechnung [AIMSUN 5.0, 2005]

<sup>2</sup> Aus Gründen der Eindeutigkeit wird daher im Folgenden der englische Begriff ‚Link‘ verwendet und nicht der deutsche Ausdruck ‚Kante‘.

Jedem Link werden entsprechende Kosten zugeordnet. Dabei wird unterschieden, ob bereits Werte vorliegen, die aus der Simulation heraus gemessen wurden (z. B. Reisezeiten simulierter Fahrzeuge auf diesem Link) oder ob weiterhin der Initialisierungswert (z. B. Linklänge dividiert durch die Geschwindigkeit bei freien Verkehrsverhältnissen) verwendet wird.

Die Zuordnung einer Kostenfunktion bzw. einer Initialisierungskostenfunktion kann für jeden Link variabel erfolgen. Dabei können standardmäßig vordefinierte Funktionen oder auch vom Nutzer selbst definierte verwendet werden. Da die Assoziierung mit bestimmten Kosten nicht für jede Nutzergruppe gleich geartet sein muss, kann in den Funktionen auch eine Differenzierung nach unterschiedlichen Fahrzeugtypen vorgenommen werden.

Werden bei der Berechnung der Linkkosten nur die Daten berücksichtigt, die sich im momentanen Simulationslauf ergeben und somit durch den aktuellen zufälligen Verkehrszustand hervorgerufen sind, wird ein Verhalten der Verkehrsteilnehmer simuliert, als würden diese über keine historischen Informationen (z. B. typische Staustellen und -zeiten) verfügen.

Durch wiederholtes Durchlaufen eines Szenarios mit unterschiedlichen Zufallsbedingungen ist es jedoch möglich, einen entsprechenden Erfahrungsschatz zu schaffen und somit ein Lernverhalten der Verkehrsteilnehmer abzubilden. Dazu werden neben den aktuellen Kosten auch die Kosten aus den vorausgegangenen Simulationsläufen berücksichtigt und als historische Kosten den Links zugeordnet. Somit kann die Bewertung einer Route auf Basis von historischen Kosten bzw. einer Mischung aus historischen und aktuellen Kosten vollzogen werden.

### 6.3.2 Routensuche

In definierten Zeitintervallen wird jeweils eine erneute Berechnung kürzester Wege durchgeführt. Die Wegesuch in AIMSUN NG basiert auf dem Algorithmus von Dijkstra [1959] und liefert für jedes Ziel einen Kürzest-Weg-Baum. Durch diese Struktur liegt der kürzeste Weg beginnend von jedem Link zum Ziel vor. In einem zusätzlichen Schritt werden in jedem Routenwahlintervall neue kürzeste Wege identifiziert und den Alternativen des entsprechenden Baums hinzugefügt. [AIMSUN NG, 2005]

Da die Anzahl möglicher Routen einer Beziehung vor allem in großen Netzen hoch sein kann, erfolgt in AIMSUN NG eine Beschränkung auf eine frei definierbare Anzahl je Beziehung, um einen Rechenzeit- und Performancegewinn zu erzielen.

### 6.3.3 Routenwahl

Mit einem Routenwahlmodell wird der Entscheidungsprozess eines Fahrers modelliert, welche Route er aus der Menge der Alternativen wählen soll. Dafür wird zu jeder der möglichen Alternativrouten zwischen einer Quelle und einem Ziel eine Auswahlwahrscheinlichkeit bestimmt. Der Entscheidungsprozess des Fahrers für einen dieser Wege erfolgt dann zufallsgesteuert unter Beachtung der entsprechenden Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Wege.

Auf Basis der Kostenbewertungen des vorausgegangenen Intervalls wird der günstigste Weg einer Quelle-Ziel-Beziehung gesucht. Die Kosten einer Route ergeben sich aus der Summe der Kosten der Links, aus der sich diese Route zusammensetzt, wobei die notwendigen Kenngrößen aus der Simulation abgegriffen werden.

Es werden aber nicht zwangsläufig alle Fahrzeuge im folgenden Intervall auf den günstigsten Weg geschickt, sondern auch andere Alternativen genutzt. Die Aufteilung auf mehrere der bekannten Routen erfolgt durch das Routenwahlmodell.

In AIMSUN NG besteht die Möglichkeit, zwischen folgenden Modellen zu wählen:

- Bestweg, hinsichtlich kürzester Distanz
- Bestweg, hinsichtlich kürzester Reisezeiten
- Binomiales Modell

Im Entscheidungsprozess werden keine Kosten berücksichtigt, sondern nur der Zeitpunkt, an dem die Route bestimmt wurde. Es wird eine  $(k-1, p)$ -Binomialverteilung verwendet, um die Auswahlwahrscheinlichkeit einer Route zu bestimmen:  $k$  ist die Anzahl der Wege,  $p$  die Wahlwahrscheinlichkeit.

- Proportionales Modell

Die Wahlwahrscheinlichkeit  $P_k$  einer Alternative  $k$  mit  $k \in K_i$ , das für alle möglichen Routen einer Quelle-Ziel-Beziehung  $i$  steht, bestimmt sich zu:

$$P_k = \frac{CP_k^{-\alpha}}{\sum_{l \in K_i} CP_l^{-\alpha}} \quad (6-1)$$

mit:

$CP_i$  Kosten der Route  $i$ .

- Multinomiales Logit-Modell (eine detaillierte Beschreibung enthält Kapitel 5.4)
- C-Logit-Modell (eine detaillierte Beschreibung enthält Kapitel 5.4)
- Benutzerdefiniertes Modell

AIMSUN NG bietet neben den genannten implementierten Modellen die Möglichkeit, eigene Routenwahlmodelle zu definieren, wobei hier auch unterschiedliches Verhalten für die verschiedenen Fahrzeugtypen modelliert werden kann.

## 6.4 Einbindung externer Applikationen

Um nicht nur den normalen Verkehrsablauf bzw. bereits standardmäßig eingesetzte Verfahren abbilden und bewerten zu können, sondern auch neu entwickelte Telematikanwendungen testen zu können, besteht in AIMSUN NG die Möglichkeit, externe Applikationen mit dem Simulator kommunizieren zu lassen. Über das AIMSUN API Modul können während der Simulation interne Daten ausgelesen und dem externen Programm zur Verfügung gestellt werden. Ebenso können dem Simulator Aktionsvorgaben zurückgegeben werden, die er dann in den nächsten Simulationsschritten berücksichtigt.

Das AIMSUN API Modul ist zwischen den Simulator und die externe Applikation gebunden, so dass hier der Kommunikationsprozess in beide Richtungen mit den Modellen bewerkstelligt wird. Die Interaktion zwischen AIMSUN NG und dem AIMSUN API Modul wird durch eine Reihe von Funktionen gestaltet, die es dem AIMSUN API Modul ermöglichen, Informationen aus dem Simulationsmodell abzugreifen und durch Rückgaben auch den Simulationszustand zu modifizieren. Die Funktionen sind in 20 Gruppen entsprechend des jeweiligen Systemteils, auf die sie Einfluss nehmen, gegliedert (z. B. Lichtsignalpläne, Detektoren, Störstellengenerierung, historische Kosten). [AIMSUN API, 2005]

## 7 Modellierung des Verkehrsverhaltens

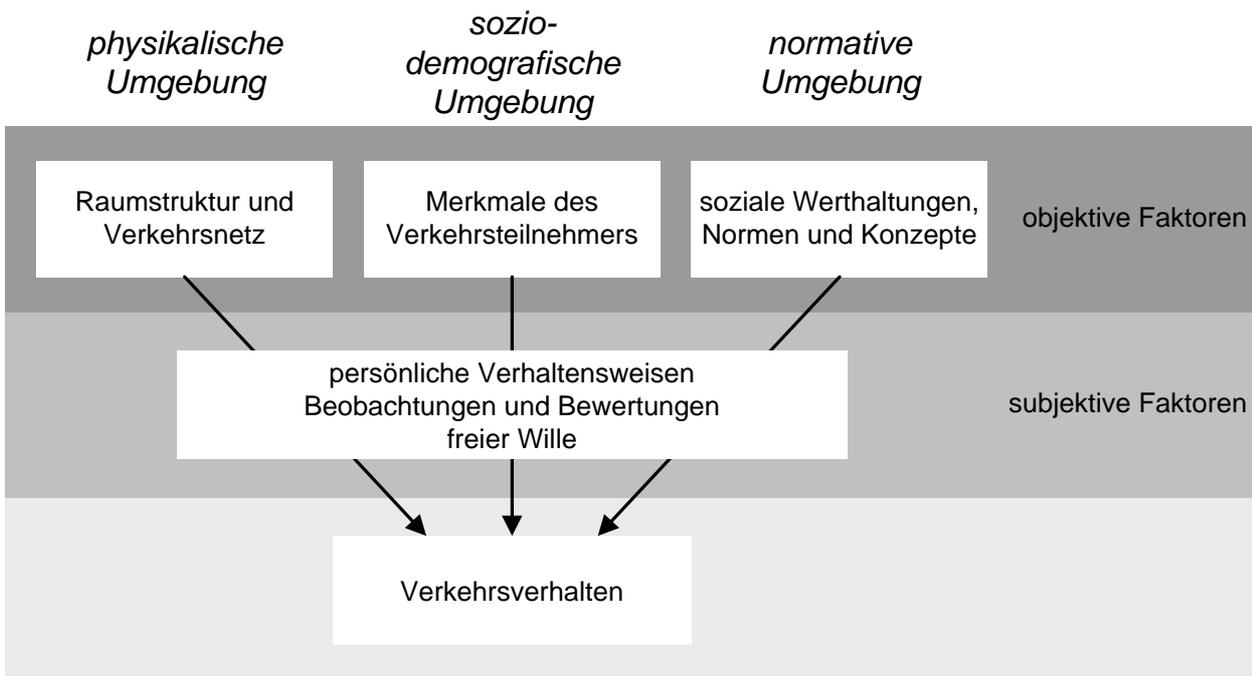
### 7.1 Grundannahmen

Der Fokus der Arbeit liegt darauf, den Einfluss unterschiedlicher Informationen auf das Verkehrsverhalten des motorisierten Individualverkehrs im städtischen Bereich zu analysieren und einen Zusammenhang zwischen Reisezeiten und Informationsgraden der Verkehrsteilnehmer zu identifizieren. Dies verlangt, dass das in der Realität vorhandene Verhalten und seine Ausprägungen in modellmäßige Formulierungen übertragen werden und im Weiteren auf die spezifischen Eigenarten der mikroskopischen Simulation angepasst werden.

Das Routenwahlverhalten lässt sich nicht nur durch Charakterisierung offerierter Informationen beschreiben, sondern verlangt auch eine Betrachtung der unterschiedlichen Verhaltensweisen und Einflüsse bei der Entscheidung, wie unterschiedliche Wahrnehmungen, Empfindungen und Bewertungen von Alternativen und Lernverhalten der Verkehrsteilnehmer. Die unterschiedlichen objektiven und subjektiven Faktoren des Routenwahlverhaltens sind zu berücksichtigen und es ist zudem zu klären, aus welcher Bandbreite von Wegen die Fahrer überhaupt auswählen.

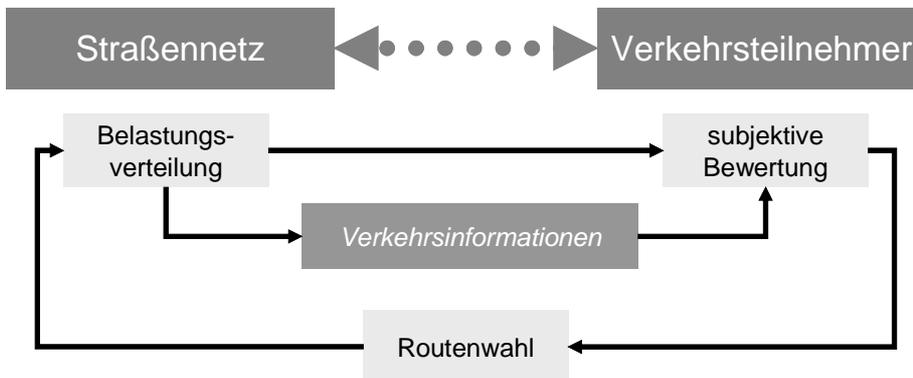
Ein Verkehrsteilnehmer entscheidet nach seinem „freien Willen“, der von objektiven Zuständen seiner Umwelt und der eigenen Überzeugung geprägt ist. Nach Bovy und Stern [1990] ist das Verkehrsverhalten durch vier Gruppen von subjektiven wie objektiven Faktoren geprägt (siehe auch Bild 7.1):

- Die physikalische Umgebung, wie etwa die Infrastruktur, die die Fahrmöglichkeiten und deren Charakteristik bestimmt.
- Die sozio-demografischen Merkmale wie Alter, Geschlecht, Erwerbstätigkeit, Einkommen, Haushaltsgröße, etc.
- Die normativen Einflüsse, die Normen, Werthaltungen und Konzepte der Gesellschaft und insbesondere des direkten Umfelds des Verkehrsteilnehmers beinhaltet.
- Die persönlichen Merkmale, die den persönlichen Entscheidungsprozess, also die subjektive Bewertung der zuvor genannten objektiven Faktoren bestimmen.



**Bild 7.1:** Klassifizierung von Einflussfaktoren auf das individuelle Verkehrsverhalten (nach Bovy und Stern [1990])

Die Routenwahl ist ein rückgekoppelter Prozess zwischen dem Verkehrszustand und der subjektiven Bewertung der Verkehrsteilnehmer, die durch Verkehrsinformationen verändert werden kann und dadurch wiederum Einfluss auf die sich einstellende Belastungsverteilung nimmt (siehe Bild 7.2).



**Bild 7.2:** Beeinflussung des Routenwahlprozesses durch Verkehrsinformationen

Neben dem eigentlichen Entscheidungsprozess zu einer Route müssen daher auch das Auswahlpektrum an Routen, unter denen der einzelnen Verkehrsteilnehmer nach Anzahl und Ausprägung auswählt, und die einzelnen Motive, die seine Routenwahl bestimmen, berücksichtigt werden. All diese Aspekte können für unterschiedliche Verkehrsteilnehmer bzw. Verkehrsteilnehmergruppen verschieden geartet sein, weshalb eine Differenzierung notwendig ist.

## 7.2 Differenzierung der Verkehrsteilnehmergruppen

Zur Untersuchung der Beeinflussung des Fahrerentscheidungsprozesses bei der Routenwahl durch unterschiedlichen Kenntnisstand über den Netzzustand wird in der vorliegenden Untersuchung eine Differenzierung in folgende zwei Gruppen von Verkehrsteilnehmern vorgenommen:

- Nicht navigierte Verkehrsteilnehmer und
- navigierte Verkehrsteilnehmer.

Die Fahrer beider Gruppen unterscheiden sich durch die Art der Information, die ihnen über den Verkehrszustand zur Verfügung steht. Den nicht navigierten Verkehrsteilnehmern wird unterstellt, dass sie mit dem Verkehrsnetz vertraut sind und über einen historischen Erfahrungsschatz verfügen. Es handelt sich demnach um ortskundige Fahrer, die das Netz bereits wiederholt befahren haben.

Die navigierten Verkehrsteilnehmer erhalten demgegenüber in bestimmten Zeitintervallen exakte Informationen über aktuelle Reisezeiten auf den unterschiedlichen Routen und wählen die reisezeitgünstigste Alternative.

Nicht nur in der Klassifizierung der Information, sondern auch im Zeitpunkt der Routenwahl unterscheiden sich die beiden Gruppen. Die nicht navigierten Verkehrsteilnehmer gründen ihre Routenentscheidung auf ihrem subjektiven Erfahrungsschatz und entscheiden sich vor Reiseantritt für eine Route. Die navigierten Fahrer bekommen dagegen in bestimmten Aktualisierungsintervallen neue Information über den Netzzustand offeriert und ändern auch noch während ihrer Fahrt ihre Route, wenn sich eine günstigere Alternative aufzeigt.

Navigation von Verkehrsteilnehmern bedeutet, dass Informationen über das Netz vorliegen müssen, die aber in ihrer Qualität verschieden geartet sein können. Daher wird eine Unterteilung in statisch und dynamisch Navigierte vorgenommen. Im statischen Fall sind keine aktuellen Informationen über das Verkehrsnetz vorhanden. Die Fahrer bekommen zwar Reisezeiten im gesamten Netz offeriert, dabei handelt es sich aber nur um Durchschnittswerte, die unter normalen Verkehrsbedingungen vorliegen und entsprechend der Straßenklasse abgestuft sind. Dynamisch Navigierte enthalten dagegen aktuell erfasste Reisezeitinformationen, die allerdings entsprechend des vorliegenden Aktualisierungsintervalls unterschiedlich stark aggregiert sind und somit ein verschieden rasches Reagieren auf veränderte Verkehrsverhältnisse ermöglichen.

In den beiden Verkehrsteilnehmergruppen sind jeweils unterschiedliche Fahrzeugtypen (z. B. Pkw, Lkw) enthalten, die sich in ihren spezifischen fahrzeug- und fahrdynamischen Eigenschaften unterscheiden.

## 7.3 Satz alternativer Routen

### 7.3.1 Differenzierung des Routensatzes

Die Infrastruktur bietet gerade für den motorisierten Individualverkehr meist eine Vielzahl von Routenmöglichkeiten an, die sich auch mehr oder weniger stark überlappen können (siehe auch Kapitel 6.3.2). Dabei sind dem Fahrer im Allgemeinen nicht alle Alternativen bekannt. Entsprechend lässt sich folgende Differenzierung des Routensatzes vornehmen [Bovy & Stern, 1990]:

- existierende Alternativen  
Hiermit sind alle Routen einer Verkehrsrelation in einem bestimmten Verkehrsnetz gemeint, also auch sehr umwegige Alternativen.
- bekannte Alternativen  
Es ist der Teil der existierenden Routen, die dem Verkehrsteilnehmer bekannt sind. Jeder Verkehrsteilnehmer hat nur eine begrenzte Kenntnis, so dass ihm nicht alle existierenden Alternativen bewusst sind.
- mögliche Alternativen  
Es sind die bekannten Routen, die potenziell den individuellen Fahrtansprüchen genügen. Dem Verkehrsteilnehmer mögen mehrere Alternativen bekannt sein, aus individuellen Gründen wird er aber nur einen Teil in seiner Routenwahlentscheidung betrachten. Die möglichen Alternativen stellen somit den Routensatz dar, aus dem die eigentliche Routenwahlentscheidung gefällt wird.
- brauchbare Alternativen  
Die brauchbaren Alternativen stellen eine Untergruppe der möglichen Routen dar. Es kann sein, dass ein Verkehrsteilnehmer grundsätzlich aus seinen möglichen Alternativen auswählt, darunter aber Wege sind, die er beispielsweise nur tagsüber nutzt, weil sie nachts nicht beleuchtet oder zu unsicher sind. Die brauchbaren Alternativen stellen die Auswahl dar, unter denen der Verkehrsteilnehmer seinen Kompromiss bei Vorliegen bestimmter Randbedingungen finden muss.
- genutzte Alternative  
Die Route, die aktuell gewählt wurde.

Für die modellmäßige Umsetzung sind vor allem

- die Anzahl der Alternativen,
- die Zusammensetzung des Satzes alternativer Routen und
- die räumlichen Ausprägungen der Routen (z. B. Überlappungsgrad)

wichtige Kenngrößen.

Die Dichte und Verzweigkeit städtischer Netze führt dazu, dass hier eine besonders große Anzahl von Routen vorhanden ist, selbst dann, wenn man „sinnlose“ (z. B. mit Schleifen, mit rückwärts dem Ziel entgegen gerichteten Abschnitten) herausnimmt (siehe auch Kapitel 5.7). Die dem einzelnen Verkehrsteilnehmer individuell verfügbare Alternativen sind jedoch wesentlich weniger, bedingt durch die beschränkte Wahrnehmung und die Dominanz bestimmter Motive, wie etwa die Reisezeit oder die Weglänge, die dazu führen, dass einige Alternativen sofort herausfallen, da deren positive Eigenschaften (z. B. guter Straßenzustand) den einen negativen Aspekt (z. B. großer Umweg) nicht wettmachen können.

### 7.3.2 Beobachtetes Routenwahlverhalten

Bovy und Stern [1990] haben diesen Filterungseffekt beispielhaft anhand einer Situation im Radverkehr aufgezeigt. Betrachtet wurde das Radverkehrsnetz zwischen dem Bahnhof Delft und einem Hörsaal der Universität Delft in den Niederlanden, das aus etwa 60 Straßenabschnitten und 40 Knotenpunkten besteht und eine räumliche Ausdehnung von ungefähr 800 m x 800 m hat. Auf diesem Netz existieren etwa 1000 Routen zwischen der Bahnstation und dem Hörsaal, wobei nur etwa 40 plausibel sind. Es wurde aber festgestellt, dass jeder

einzelne Radfahrer im Mittel nur vier bis fünf Alternativen berücksichtigt und es nur an die 15 Routen gab, die üblicherweise von allen benutzt wurden.

Eine Studie zur Identifizierung der individuellen Kenntnisse von einzelnen Routen bei Pendlern, die ein Kraftfahrzeug nutzen, um von Gouda nach Delft in den Niederlanden zur Arbeit zu gelangen, wurde von Jansen und Den Adel [1987] (laut Bovy und Stern [1990]) durchgeführt. Die detaillierte Befragung von 50 Probanden ergab, dass dem Einzelnen im Mittel vier von ungefähr 15 verfügbaren Routen bekannt waren, mindestens jedoch immer zwei Alternativen im Bewusstsein waren. Aber lediglich zwei Routen waren allen Teilnehmern bekannt, was verdeutlicht, dass nur zum Teil eine Überlappung des individuellen kognitiven Routensatzes vorlag.

**Tab. 7.1: Ergebnis der Studie von Jansen und Den Adel [1987] hinsichtlich des individuell und kollektiv vorhandenen Routensatzes bei Berufspendlern (laut Bovy und Stern [1990])**

	individuell	kollektiv
Anzahl existierender Routen	15	15
Anzahl bekannter Routen	minimal	2
	im Mittel	4
	maximal	6
Anzahl von Routen, die jedem bekannt waren	-	2
Anzahl von Routen, die niemandem bekannt waren	-	1
Anzahl genutzter Routen	minimal	1
	im Mittel	2
	maximal	6
Anzahl von Routen, die nahezu von jedem genutzt wurden	-	2
Anzahl von Routen, die nahezu von niemand genutzt wurden	-	1
Anzahl im Mittel genutzter Routen	1	3

Zu ähnlichen Ergebnissen kam auch Benshoof [1970], der 1300 Fahrer des motorisierten Individualverkehrs in Newcastle in Großbritannien befragte und herausfand, dass den meisten nur zwei (36,5 % der Befragten) bis drei Routen (38 %) und nur sehr wenigen mehr (bis zu neun) als verfügbar bewusst waren.

Auch der Lerneffekt durch wiederholtes Befahren unterschiedlicher Alternativen, durch den man annehmen könnte, dass sich mit zunehmender Vertrautheit auch die Anzahl der Routen, die jemand nutzt, verringert, trifft laut Stern und Leiser [1988] nur bis zu einem gewissen Grad zu. Nach ihren Untersuchungen führt die steigende Netzkenntnis nur in der Anfangszeit zu einer Verringerung der Anzahl des Routensatzes, wird langfristig im Mittel gleich bleiben und um etwa vier Alternativen schwanken.

Die Untersuchungen zeigen auch auf, dass die Fahrer in den Teilen des Netzes über gute Kenntnisse verfügen, die sich in direkter Umgebung ihrer Wohnstätte befinden oder Orte sind, an denen sie häufig Aktivitäten ausüben und ihnen daher vertraut sind. Im Umfeld häufig besuchter Gebiete werden daher auch eher untergeordnete Straßen benutzt, entlang der Verbindung zweier bekannter Zonen eher höherrangige Strecken.

Die Identifizierung verfügbarer Alternativen und die Bestimmung eines Routensatzes sind also grundlegende Probleme, denen bei Beschäftigung mit dem Routenwahlverhalten nachgegangen werden muss, bisher allerdings in relativ wenigen Untersuchungen analysiert worden sind.

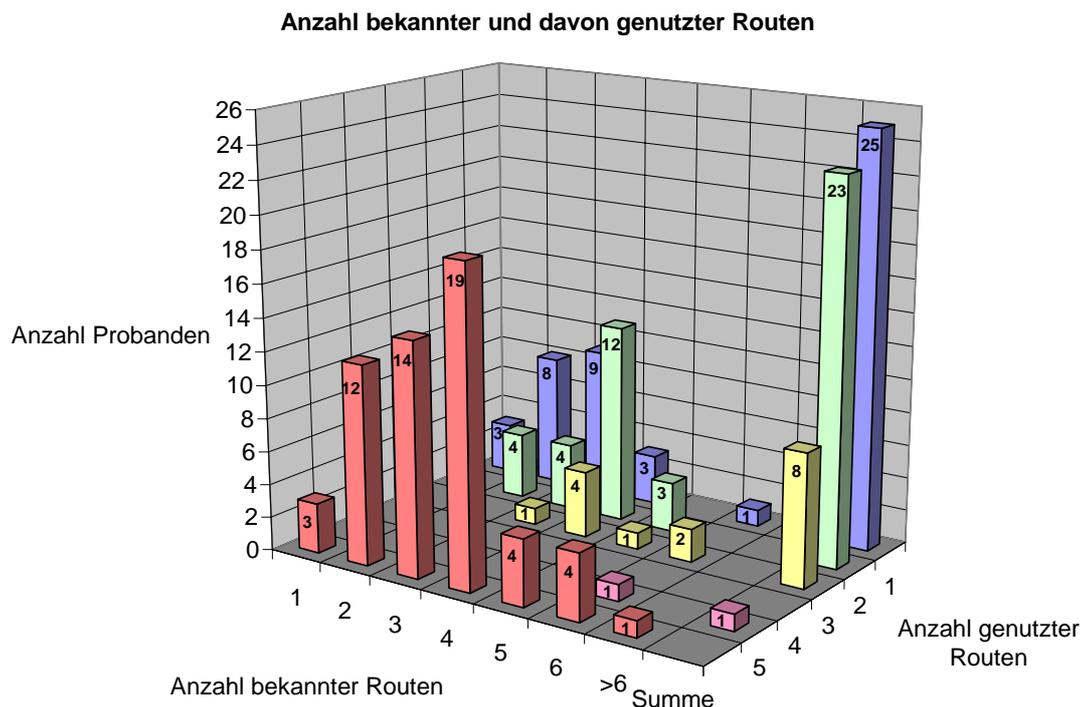
Ergänzend zu den zuvor aufgeführten Analysen wurde eine eigene Befragung durchgeführt [Borgmann, 2006], die vor allem die Anwendbarkeit der Ergebnisse der Literatur auf die eigene Simulationsstudie absichern soll. Da in der vorliegenden Arbeit das Verkehrsverhalten im städtischen Bereich und hier als spezielles Anwendungsbeispiel Hannover dienen soll, wurden Interviews in diesem Raum durchgeführt. Die Beschäftigung mit den Fragen des Routensatzes ist nur einer von mehreren Bestandteilen der vorliegenden Arbeit, bei der der Schwerpunkt auf dem Einfluss unterschiedlicher Informationen auf das Verkehrsverhalten liegt, so dass nur ein begrenzter Aufwand für die Befragungsstudie aufgewendet werden konnte. Aus diesem Grund ist eine Allgemeingültigkeit und statistisch abgesicherte Aussage auf dieser Basis nicht möglich, zur Untermauerung der Literaturaussagen und als Lieferant von Anhaltswerten werden die ermittelten Ergebnisse jedoch als ausreichend angesehen.

Die Simulationsstudie beschränkt sich auf die Abbildung der morgendlichen Hauptverkehrszeit, die vorwiegend durch Berufsverkehr geprägt ist. Daher wurden Befragungen speziell zur Routenwahl der Verkehrsteilnehmer von ihrer Wohnstätte zu ihrem Arbeitsplatz durchgeführt. Insgesamt wurden 57 Personen befragt, wobei die Auswahl der Probanden nicht durch Vorabziehung einer repräsentativen Stichprobe erfolgt ist. Auf Grund der Kenntnis der sich bei der Rekrutierung ergebenden Schwierigkeiten bei ähnlichen Untersuchungen [Wermuth et al., 2004], wurde die persönliche Ansprache als Rekrutierungsverfahren gewählt, um in dem begrenzten Untersuchungsrahmen eine möglichst große Anzahl von Probanden zu gewinnen.

Die Teilnehmer der empirischen Untersuchung sind im Stadtgebiet von Hannover wohnhaft und leben fast ausschließlich seit mehreren Jahren in Hannover, so dass ihre Ortskenntnis als gut bis sehr gut eingestuft werden kann und die mittlere jährliche Pkw-Fahrleistung von 8000 - 15000 km/a eine Einstufung als Gelegenheits- bis Vielfahrer zulässt.

Im Rahmen des Interviews wurden die Teilnehmer nach den ihnen bekannten Routenmöglichkeiten von ihrer Wohnstätte zu ihrer Arbeitstätte befragt. Weiterhin sollten sie die Alternativen, die sie nutzen, in einer Straßenkarte einzeichnen und Abschätzungen angeben, in wie viel Prozent der Fahrten sie die jeweiligen Wege wählen. Die Auswertung ergab, dass dem Großteil der Befragten zwei (21,1 % der Teilnehmer) bis vier Alternativen (33,3 %) bekannt sind und nur wenigen mehr. Die Anzahl der genutzten Alternativen beschränkt sich aber bis auf eine Ausnahme auf drei, wobei 43,9 % der Teilnehmer auf eine Route fixiert sind und 40,4 % aus zwei Alternativen wählen. Allerdings ist die Entscheidung unter diesen nicht gleich verteilt, sondern es wird laut eigenen Einschätzungen der Teilnehmer im Mittel in mehr als 90 % ihrer Fahrten die bevorzugte Alternative gewählt.

Die differenzierten Ergebnisse der Befragung hinsichtlich der Anzahl der bekannten Routen und den dazugehörigen Angaben der Befragten, wie groß daraus jeweils der genutzte Routensatz ist, sind in Bild 7.3 dargestellt.



**Bild 7.3: Anzahl bekannter und genutzter Routen der 57 Befragten**

Da die Teilnehmer der Befragung so ausgewählt wurden, dass ihre Arbeitsstätten etwa am gleichen Ort des Stadtgebiets liegen (Universität, Lage nordwestlich des Zentrums), konnten neben der Anzahl der Routen auch ihr Verlauf analysiert werden. Gruppirt nach einzelnen Sektoren des Ausgangspunkts der Fahrt im Stadtgebiet konnten so Unterschiede zwischen den einzelnen individuellen Routensätzen der Befragten aufgedeckt werden, wobei in Großteilen eine Überlappung der individuellen Routensätze festzustellen ist. Die einzelnen Richtungen betrachtend ergab sich ein kollektiver Routensatz, der etwa bei fünf bis acht unterschiedlichen Wegen lag (die unterschiedlichen Anfangsstreckenabschnitte der einzelnen Befragten nicht mit berücksichtigend). Die Ergebnisse zum individuellen und kollektiven Routensatz decken sich sehr gut mit den Erkenntnissen aus der Literatur, was als Bestätigung der Übertragbarkeit auf die vorliegende Simulationsstudie gewertet wird.

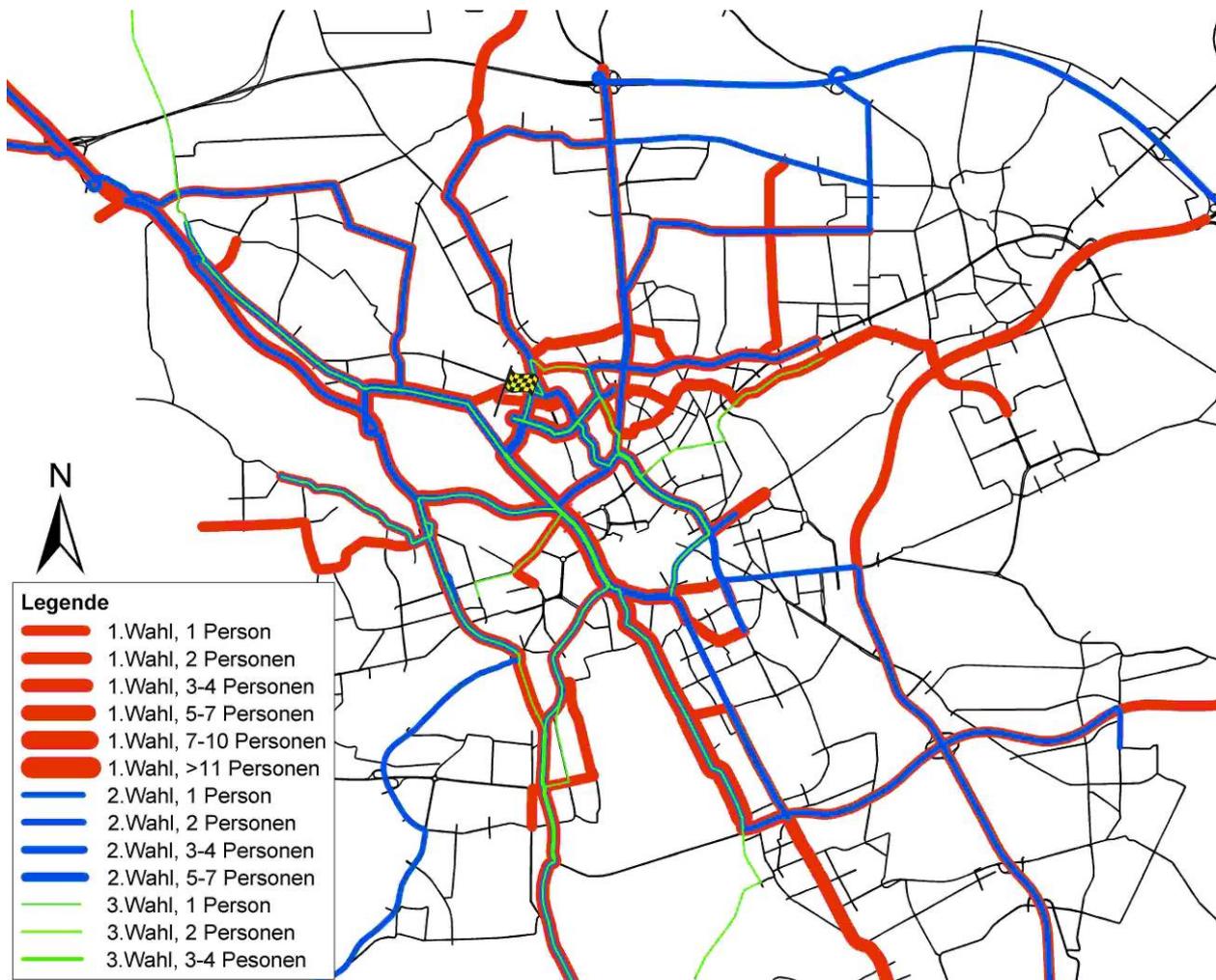
### 7.3.3 Modellmäßige Bestimmung alternativer Routen

Wie die Ausführungen zuvor gezeigt haben, ist eine Bestimmung des individuellen Routensatzes schwierig, weshalb vereinfachend davon ausgegangen wird, dass er hinreichend genau durch ein kollektives Routenspektrum, aus dem alle Verkehrsteilnehmer auswählen, abgebildet werden kann.

Die modellmäßige Bestimmung des Satzes alternativer Routen beruht auf einer Kürzest-Weg-Suche. Bei dem verwendeten Simulationstool AIMSUN NG wird eine Variation des Dijkstra-Algorithmus [Dijkstra, 1959] verwendet, der als Ergebnis für jedes Ziel einen Kürzesten-Wege-Baum aufspannt (siehe Kapitel 5.6). Die für die Simulationsstudie vorgenommen Einstellungen sehen dabei so aus, dass im Ausgangsschritt zu jeder Quelle-Ziel-Beziehung der kürzeste Weg auf dem noch unbelasteten Netz unter Verwendung der Initialisierungskosten (siehe Kapitel 5.5

und 7.4.2) als Netzbewertungsgrößen identifiziert wird. Entlang dieser Route werden im eingestellten Routenwahlintervall entsprechende Anteile der Verkehrsnachfrage bewegt und neue mittlere Reisezeiten und andere statistische Größen, die in die Kostenberechnung mit eingehen, direkt aus der Simulation abgegriffen. Unter Verwendung dieser Werte erfolgt eine Neubewertung und Neuberechnung kürzester Wege. Die Nachfrage wird dann anhand des gewählten Entscheidungsmodells aufgeteilt.

Es wird so lange in jedem Schritt nach neuen Wegen gesucht, bis eine frei einstellbare Maximalanzahl erreicht wird. Um nicht unnötig viele Routenmöglichkeiten in jedem Routensuchintervall der Simulation bestimmen zu müssen, wurde ein Vergleich zwischen den in der Simulation gefundenen Routen einzelner Quelle-Ziel-Relationen und den Angaben genutzter Routen der Befragung durchgeführt. Die Angaben der Probanden zu ihren befahrenen Routen in Richtung des Ziels Universität sind in Bild 7.4 dargestellt. Die Strecke, die die Befragten als bevorzugte Route angegeben haben („1.Wahl“), sind dabei in roter Farbe, die zweithäufigsten („2.Wahl“) in blauer und die dritthäufigsten („3.Wahl“) in grüner Farbe eingezeichnet. Die Strichstärke verdeutlicht die Anzahl übereinstimmender Routenabschnitte mehrerer Befragter. Zum Vergleich mit dem Modell sind beispielhaft von einigen Anbindungspunkten die gefundenen Routen der Simulation dargestellt (siehe Bild 7.5, Bild 7.6, Bild 7.7).



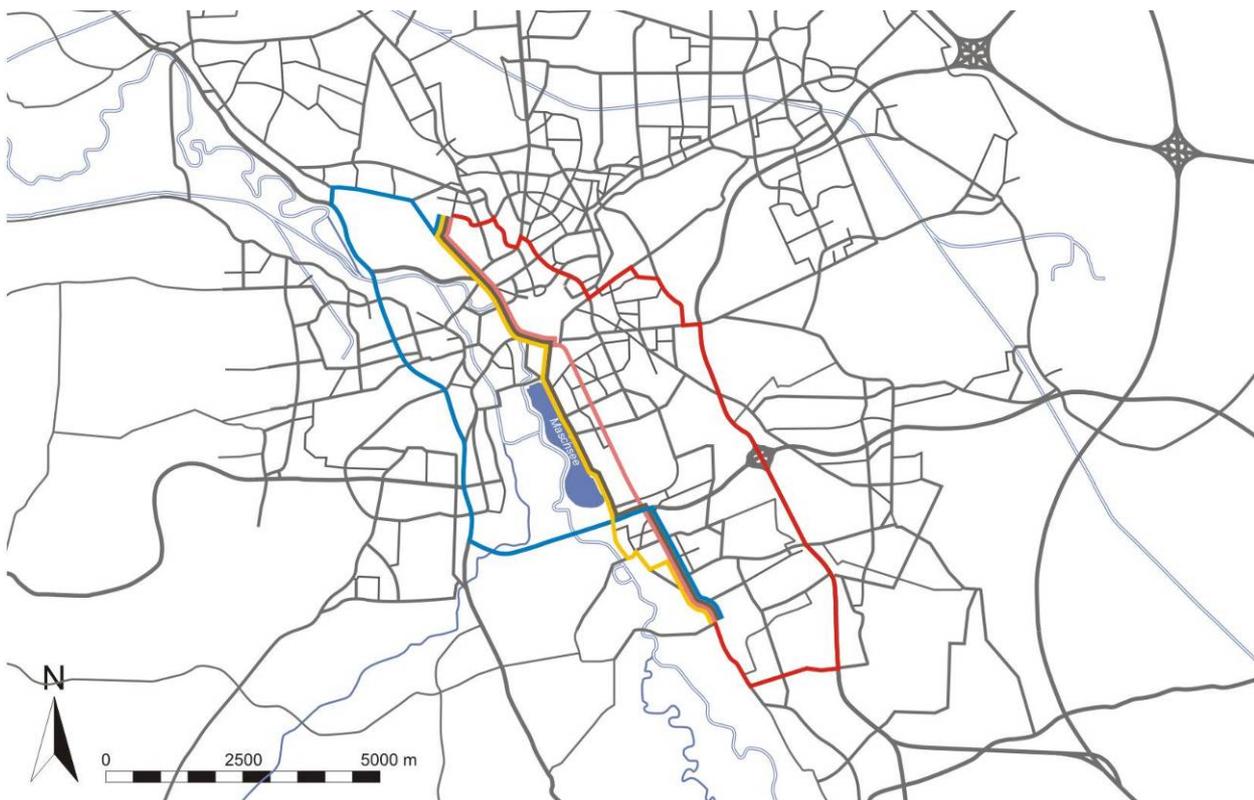
**Bild 7.4: Befahrene Routen der Probanden**



**Bild 7.5:** Routenalternativen der Simulation, Startpunkt Podbielskistraße/ Walderseestraße in Höhe Raffaelstraße Richtung Ziel Universität



**Bild 7.6:** Routenalternativen der Simulation, Startpunkt Stresemannallee/ Altenbekener Damm Richtung Ziel Universität



**Bild 7.7: Routenalternativen der Simulation, Startpunkt Hildesheimer Straße/ Wirkenburger Straße (L389) Richtung Ziel Universität**

Aufgrund der unterschiedlichen Startpunkte der Probanden kann kein exakter Vergleich erfolgen. Es zeigt sich jedoch, dass die Routen der Simulation mit denen der Befragung gut übereinstimmen und das Spektrum gefundener Routen in der Simulation der Breite der individuellen Angaben entspricht. Um den rechentechnischen Aufwand der Simulation zu begrenzen, wurde die maximale Anzahl von Alternativen, die von jedem Ausgangspunkt zu den Zielen in jedem Routensuchintervall bestimmt wird, auf die auch in den dargestellten Beispielen verwendete Anzahl von acht begrenzt.

## 7.4 Motive der Routenwahl

### 7.4.1 Faktoren der Routenwahl von Verkehrsteilnehmern im motorisierten Individualverkehr

Die Bewertung der einzelnen Routen ist durch unterschiedliche Motive geprägt. Die Faktoren können von Individuum zu Individuum unterschiedlich und verschieden gewichtet sein, da sie vom subjektiven Wahrnehmungs- und Informationsprozess geprägt sind. Es müssen nicht notwendiger Weise bewusste Vorgänge vorliegen, sondern es kann sich auch um gewohnheitsmäßiges (habituelles) und spontanes (impulsives) Verhalten handeln [Bussiek, 1998].

Die Wahl einer Route wird also von einer Vielzahl von Einflussgrößen bestimmt. Nach Bovy und Stern [1990] lassen sich diese grob in folgende Kategorien gliedern:

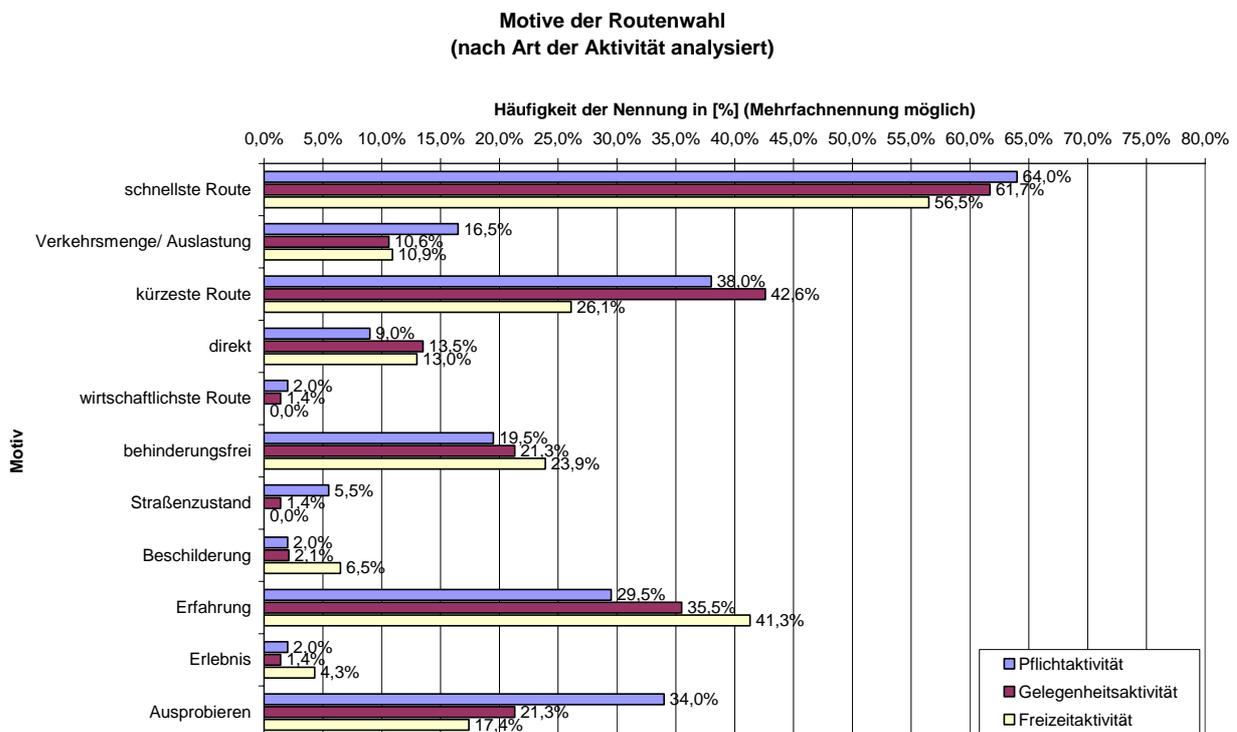
- Routencharakteristik,
- Faktoren des Verkehrszustands auf der Route/ dem Netz und
- Umfeldfaktoren.

Unter die erste Kategorie fallen Faktoren wie Straßenklasse, Straßenbreite, Anzahl der Fahrstreifen, Kurvigkeit, Beschaffenheit des Straßenoberbaus, mautpflichtige Strecken oder Anzahl von Knotenpunkten entlang der Route. Einflussgrößen des Verkehrszustands lassen sich durch unterschiedliche Kenngrößen beschreiben, etwa durch die Reisezeit, die Wartezeit an Knotenpunkten oder die Anzahl von Haltevorgängen. Das Umfeld kann durch eine besonders attraktive Landschaft, Orte bevorzugter Aktivitäten entlang der Route, die Art der Bebauung und andere ästhetische Merkmale Einfluss auf die Routenwahl haben.

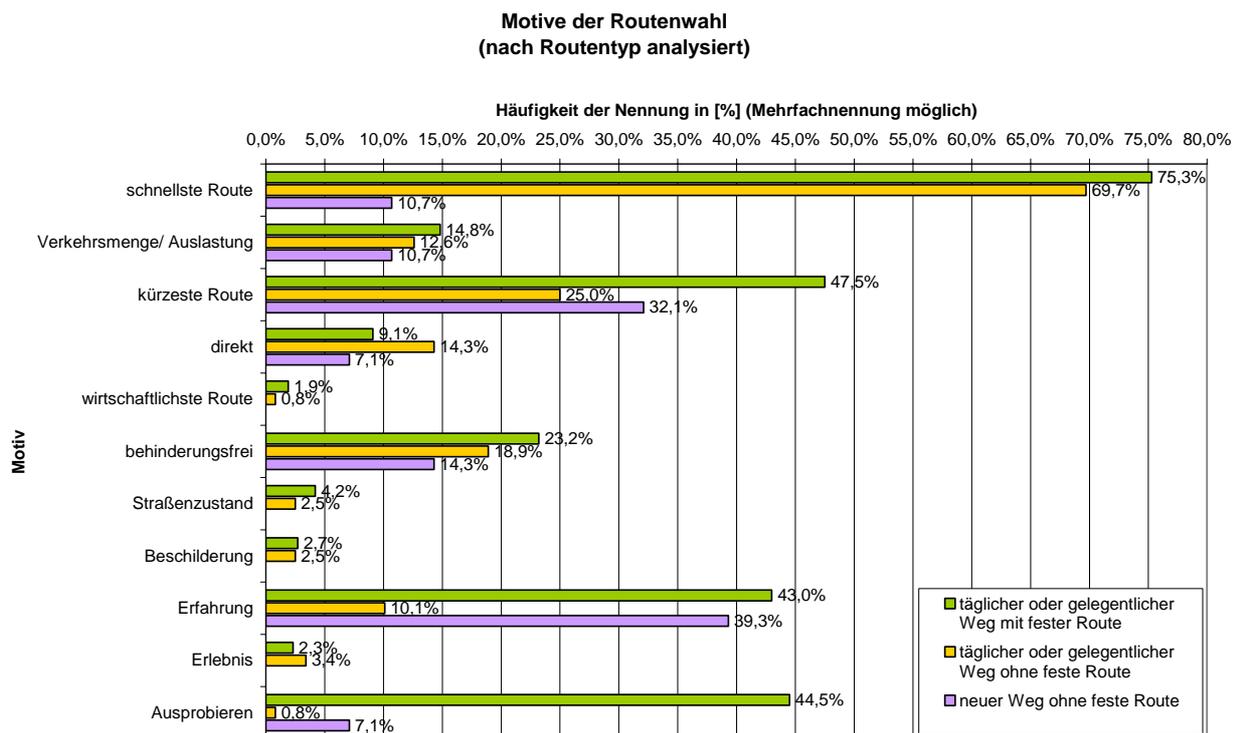
Als das einflussreichste Kriterium wird generell die Reisezeit angesehen (siehe [Wermuth et al., 2004], [Stern & Leiser, 1988], [Braun & Wermuth, 1973]). In Abhängigkeit der Untersuchungs- und Befragungsaufbauten der unterschiedlichen Studien wurden diverse weitere Faktoren erfasst. Von Wermuth et al. [2004] wurden beispielsweise eine Differenzierung der Motive betreffend der Zeit (schnellste Route, Verkehrsmenge/ Auslastung), des Weges/ der Entfernung (kürzeste Route, direkt), der Kosten (wirtschaftlichste Route, behinderungsfrei, Straßenzustand, Beschilderung) und „weicher“ Faktoren (Erfahrung, Erlebnis, Ausprobieren) vorgenommen.

Die Auswertung ergab, dass als entscheidendes Motiv für die Routenwahl bei 64 % aller Fahrten mit einer Pflichtaktivität (Arbeit, dienstliche Erledigung, Ausbildung), bei 62 % aller Fahrten mit einer Gelegenheitsaktivität (Einkauf, sonstige Erledigung) und bei 57 % aller Fahrten mit einer Freizeitaktivität die Reisezeit angegeben wurde (siehe Bild 7.8).

Unterscheidet man nach dem Routen-Typ, so wurde die Reisezeit bei festgelegten Wegen in ~ 75 % und bei variablen Routen in ~ 71 % der Fälle genannt, bei neuen Wegen aber nur zu ~ 10 %. Daneben wurden aber auch zu großen Anteilen „Reiseweite“ (~ 40 %), „Erfahrung“ (~ 35 – 40 %), „Ausprobieren/ Zufall“ (~ 25 %) und „Behinderungsfreiheit“ (~ 20 %) angegeben (siehe Bild 7.9).



**Bild 7.8:** Befragungsergebnisse einer Untersuchung von Wermuth et al. [2004] zu den Motiven der Routenwahl analysiert nach Art der Aktivität (Mehrfachnennungen möglich)



**Bild 7.9: Befragungsergebnisse einer Untersuchung von Wermuth et al. [2004] zu den Motiven der Routenwahl analysiert nach Routentyp (Mehrfachnennungen möglich)**

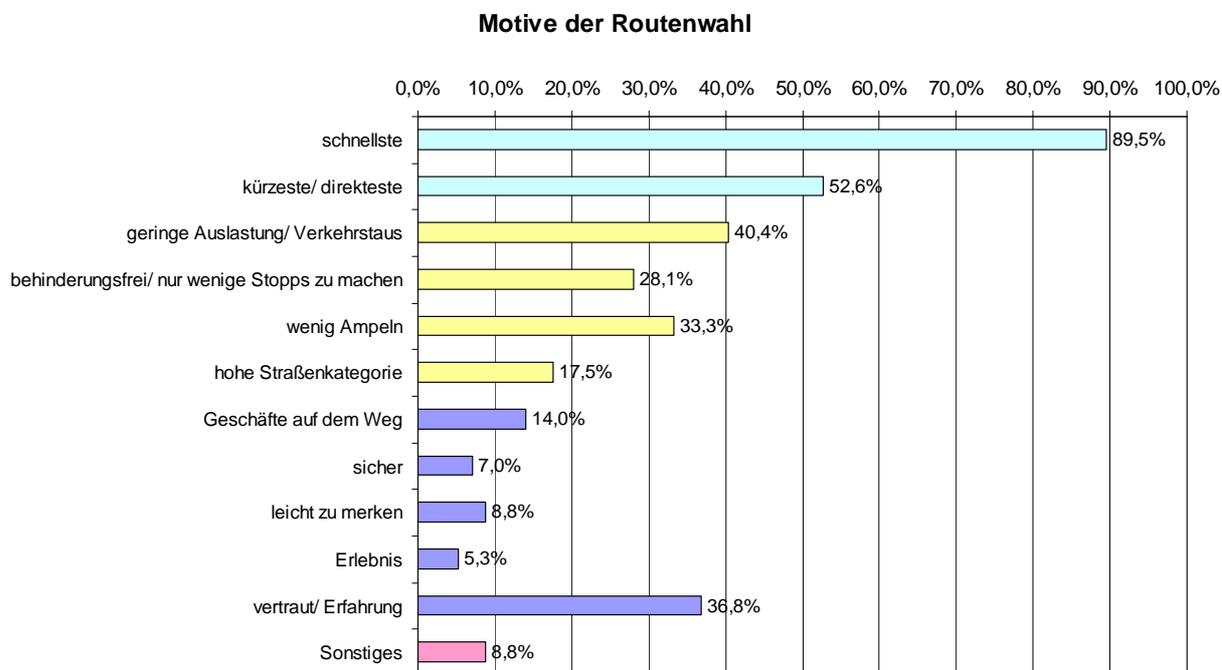
Neben der Reisezeit wurde durchschnittlich ein weiteres Motiv genannt, was sich mit anderen Untersuchungen, etwa der von Benschhoff [1970], deckt. Er stellte bei einer Befragung von 1300 Fahrern fest, dass die maximale Anzahl von Faktoren, die von einem Verkehrsteilnehmer angegeben wurde, sieben war, wobei neun zur Wahl standen. Während 37,0 % der Probanden zwei Kriterien nannten, 30,3 % nur eines und 20,1 % drei.

Die Untersuchung von Wermuth et al. [2004] zeigt auch, dass zwischen den beiden Kriterien „Behinderungsfreiheit“ und „Reisezeit“ eine Korrelation nahe liegt, die Kriterien aber von den Probanden getrennt genannt wurden, so dass von einer subjektiv empfunden, unterschiedlichen Bedeutung beider Faktoren auszugehen ist.

Wie bereits bezüglich des Routensatzes (siehe Kapitel 7.3.2) erläutert, wurde ergänzend zu den zuvor aufgeführten Untersuchungen eine eigene Befragung durchgeführt [Borgmann, 2006], die vor allem die getroffenen Modellierungen der vorliegenden Simulationsstudie basierend auf den Ergebnisse der Literatur absichern soll.

In den Interviews wurden die Teilnehmer auch nach den Motiven, die zur Wahl der Route zwischen ihrer Wohnstätte und ihrer Arbeitsstätte geführt haben, befragt. Den Probanden wurden elf Motive, die bewusst allgemeinverständlich und daher auf Fachbegriffe verzichtend formuliert wurden, zur Auswahl gestellt, wobei eine Mehrfachnennung möglich war. Die Befragten hatten zudem die Möglichkeit, weitere Motive zu nennen, wobei hier „Abwechslung/ Austesten neuer Routen“, „Grüne Welle“, „weniger Behinderung durch Bevorzugung des Öffentlichen Verkehrs“ und „keine Behinderung durch Lieferverkehr oder Müllfahrzeuge“ als Antworten gegeben wurden.

Die Nennhäufigkeiten der einzelnen Motive sind in Bild 7.10 dargestellt, wobei die farbliche Kennzeichnung die Zuordnung zu den unterschiedlichen Motivkategorien (Routencharakteristik, Verkehrszustand, Umfeldfaktoren, Sonstiges; siehe Kapitel 7.4.1) symbolisiert.



**Bild 7.10: Motive der Routenwahl der Befragten (Mehrfachnennungen möglich)**

Vergleicht man die Auswertung mit den Ergebnissen der Untersuchung von Wermuth et al. [2004], ergibt sich auch hier als bedeutendstes Kriterium der Faktor „schnellste Route“, wobei es mit einem Anteil von 89,5 % gegenüber 75,3 % (bei täglichen oder gelegentlichen Wegen mit fester Route) bzw. 64,0 % (bei Pflichtaktivitäten) noch gewichtiger ausfällt. Die Motive, die den Verkehrszustand berücksichtigen, liegen etwa in der gleichen Größenordnung von 20 – 30 %. Lediglich das Motiv „geringe Auslastung“ wird bei der eigenen Befragung mit 40,4 % gegenüber 14,8 % bzw. 16,5 % deutlich häufiger genannt, was aber auch dadurch bewirkt sein kann, dass die Differenzierung und Beschreibung der Motive, die den Verkehrszustand charakterisieren, etwas unterschiedlich gewählt wurden.

Motive der Routenwahl können aber nicht nur durch den Fahrtzweck oder den Routen-Typ geprägt sein, sondern auch vom Fahrzeugtyp abhängen. So können Faktoren von Lkw-Fahrern anders geartet sein als die von privaten Pkw-Fahrern. Lkws werden aufgrund ihrer Größe und geringeren Wendigkeit versuchen, eher höherrangige Straßen zu befahren als Pkw. Eine Untersuchung von Motiven von Lkw-Fahrern in Österreich hat nach Zibuschka [1981] (laut Boyv und Stern [1990]) beispielsweise nach Reisezeit und Weglänge als nächst häufigste Faktoren Straßenbreite, Kurvigkeit, Steigung und dann Wahrscheinlichkeit von Verspätungen ergeben.

#### 7.4.2 Modellierung der Widerstände

Bei der Analyse und der Übertragung der Motive in ein Modell, wird davon ausgegangen, dass der Verkehrsteilnehmer im motorisierten Individualverkehr versucht, sein Ziel innerhalb einer vorgegebenen und für ihn als akzeptabel empfundenen Zeit bei gleichzeitig geringen Kosten zu

erreichen. Unter Kosten werden dabei die Kosten der Reisezeit, monetäre Kosten und psychologische Kosten verstanden [Ben-Akiva et al., 1991] (siehe auch Kapitel 5.5).

Wie die Ausführungen in Kapitel 7.4.1 zeigen, sind zur modellmäßigen Umsetzung der Motive der Routenwahl in Form von Widerständen neben dem Faktor „Reisezeit“ weitere Kriterien zu berücksichtigen. Eine Abbildung aller möglichen Kriterien und der Vielschichtigkeit der Faktoren ist aufgrund der Komplexität sicherlich nicht möglich. In Orientierung an der Fragestellung wird aber versucht, die Ausgestaltung so vorzunehmen, dass vor allem Unterschiede von nicht navigierten Verkehrsteilnehmern gegenüber solchen, die mit Verkehrsinformationen versorgt werden, charakterisiert werden.

#### 7.4.2.1 Widerstände nicht navigierter Verkehrsteilnehmer

Für die nicht navigierten Verkehrsteilnehmer werden auf Basis der in Kapitel 7.4.1 dargelegten Untersuchungen Widerstände modelliert, die neben der Reisezeit noch weitere Komponenten berücksichtigen.

Dabei wird eine Unterscheidung in

- aufwandsbezogene und
- komfortbezogene

Komponentengruppen vorgenommen. Der Gesamtwiderstand wird dann durch additive Verknüpfung der einzelnen Komponenten bestimmt (siehe Gleichung ( 7-11 )).

Die Komponente, die den Aufwand beschreibt, wird bei dem gewählten Ansatz allein in Form von Reisezeit ausgedrückt. Denkbar wäre, auch die Reiseweite mit einzubeziehen. Da sich bei den Untersuchungen von Wermuth et al. [2004] aber gezeigt hat, dass die Reisezeit etwa doppelt so häufig als Kriterium angegeben wird, berücksichtigt die modellierte Kostenfunktion  $LC$  (Link Costs, siehe Kapitel 6.3.1) lediglich die Reisezeit als Komponente  $FLC$  (Factor Link Costs).

$$FLC_{a,VT,\nu}^{TIME} = TT_{a,VT,\nu} \quad [s] \quad (7-1)$$

mit:

$TT_{a,VT,\nu}$  aktuelle Reisezeit auf Link  $a$  für Fahrzeugtyp  $VT$  im Intervall  $\nu$

Hinsichtlich des Komforts werden unterschiedliche Aspekte berücksichtigt. Wie die Befragung von Wermuth et al. [2004] gezeigt hat, werden als weitere wichtige Einflussgrößen in etwa 20 % der Fälle die Behinderungsfreiheit und in etwa 15 % die Verkehrsmenge/ Auslastung angegeben. Beide Kriterien stehen für den Wunsch des Fahrers, möglichst gleichmäßig und ohne Verzögerungen den Weg zurückzulegen. Die Auslastung kann zum einen über die Reisezeit ausgedrückt werden, da mit steigender Verkehrsmenge meist ein Ansteigen der Wartezeiten und Absinken der gefahrenen Geschwindigkeiten einhergeht. Zum anderen bedeuten zähfließender Verkehr oder Stauungen aber auch, dass mehr Anfahr- und Abbremsvorgänge notwendig sind, die der Verkehrsteilnehmer meist als störend empfindet. Dieser Aspekt des Komforts wird in der Kostenfunktion dadurch berücksichtigt, dass die mittlere Anzahl der Halte aller Fahrzeuge auf dem Link berücksichtigt wird. Ein Halt muss dabei nicht nur aufgrund hoher Verkehrsbelastung hervorgerufen werden, sondern kann auch durch Verkehrssteuerungen und –regelungen bewirkt sein. Dies kann beispielsweise durch Rotlicht an einer Lichtsignalanlage

oder auch im untergeordneten Straßennetz an einem Rechts-Vor-Links geregelten Knotenpunkt bedingt sein.

„Behinderungsfrei“ kann somit zum einen das Fahren entlang eines „Schleichwegs“ im untergeordneten Netz bedeuten, bei dem Verkehrsstauungen auf dem höherrangigen Netz umgangen werden. Zum anderen kann es aber auch genau für das Gegenteil stehen, nämlich die Bevorzugung höherrangiger Straßen, da auf diesen aufgrund des besseren Ausbaustandards ein interaktionsfreieres Fahren möglich sein soll. Beides kann durch die gewählte Komfortkomponente  $FLC_{a,VT,v}^{STOPS}$ , die die mittlere Anzahl von Halten berücksichtigt, modelltechnisch in gleicher Weise und ohne den darin enthaltenen widersprüchlichen Aspekt aufgeben zu müssen, wiedergegeben werden.

Um einheitenkonform zu bleiben, werden alle Kostenkomponenten über Anteile der Reisezeit und somit als Zeitwerte in Sekunden ausgedrückt. Die Komfortkomponente  $FLC_{a,VT,v}^{STOPS}$  bestimmt sich zu:

$$FLC_{a,VT,v}^{STOPS} = TT_{a,VT,v} \cdot \varphi_{VT} \cdot \ln(NbStops + 1) \quad [s] \quad (7-2)$$

mit:

$TT_{a,VT,v}$  aktuelle Reisezeit auf Link  $a$  für Fahrzeugtyp  $VT$  im Intervall  $v$

$NbStops$  mittlere Anzahl von Halten auf Link  $a$  im Intervall  $v$

$\varphi_{VT}$  Gewichtungsfaktor zur Berücksichtigung der Behinderungsfreiheit, abhängig vom Fahrzeugtyp  $VT$ .

Der Ansatz berücksichtigt die mittlere Anzahl von Halten über den um eins verschobenen natürlichen Logarithmus, da dadurch folgenden Eigenschaften abgebildet werden können: Kann der Link ohne Stopps durchfahren werden, bedeutet dies keine Komforteinbußen, so dass kein Kostenzuschlag erfolgt. Bei einem einfachen vierarmigen, lichtsignalisierten Knotenpunkt, bei dem angenommen wird, dass die Freigaben über die einzelnen Richtungen gleichmäßig verteilt sind, kann man davon ausgehen, dass sich im Mittel etwa 0,6 Halte bei gleichmäßiger Fahrzeugankunft und bei geringer Verkehrsbelastung ergeben, da der eine Teil ein Grünlicht, der andere Teil ein Rotlicht erleben wird. Bei einem unregelmäßigen Knotenpunkt wird dies etwa bei einem Halt liegen, auch wenn eine geringe Belastung vorhanden ist. Die Gleichmäßigkeit des Fahrens verändert sich somit bereits bei Vorliegen einer geringen Anzahl von Halten, so dass ein relativ feinfühliges Reagieren auf Unterschiede in diesem unteren Bereich (zwischen null bis einem Halt) zu modellieren ist. Ist die Nachfrage aber hoch und treten Verkehrsstauungen auf, kann es bei einem lichtsignalisierten Knotenpunkt beispielsweise vorkommen, dass mehrere Umläufe gewartet werden muss, bis ein Überqueren möglich ist. Es wird angenommen, dass dies in Hinblick auf den Komfort als sehr störend empfunden wird, die Differenzierung aber mit steigender Anzahl an Halten wieder nachlässt (bspw. ob vier, fünf oder sechs Umläufe benötigt werden ist nicht mehr von großem Unterschied, sondern wird nur noch als starke Verkehrsstauung empfunden). Das zunächst steile Ansteigen des Widerstands und die Abflachung auf höherem Niveau kann mit Hilfe der natürlichen Logarithmusfunktion modelliert werden.

Da die einzelnen Kostenkomponenten  $FLC$  in Anteilen der Reisezeit ausgedrückt werden, ist der Einfluss der Behinderungsfreiheit noch zu gewichten. Die Untersuchungen von Wermuth et al. [2004] haben ergeben, dass bei Pflichtaktivitäten das Motiv „schnellste Route“ in 64,0 % und

„behinderungsfrei“ in 19,5 % der Fälle und bei täglichen oder gelegentlichen Wegen mit fester Route in 75,3 % bzw. 23,3 % der Fälle genannt wird. Setzt man diese Häufigkeiten ins Verhältnis, ergibt sich ein Wert von

$$19,5\% / 64,0\% = 0,30 \text{ bzw. } 23,2\% / 75,3\% = 0,31. \quad (7-3)$$

In Anlehnung an die Ergebnisse dieser Untersuchung wird den Fahrzeugtypen (siehe Kapitel 7.2 und 8.2.2) Pkw, Pkw-Wirtschaftsverkehr und Lkw bis und über 7,5 t der Gewichtungsfaktor

$$\varphi_{Pkw} = \varphi_{Pkw\_Wirtschaft} = \varphi_{Lkw\_bis7.5t} = \varphi_{Lkw\_über7.5t} = 0,30. \quad (7-4)$$

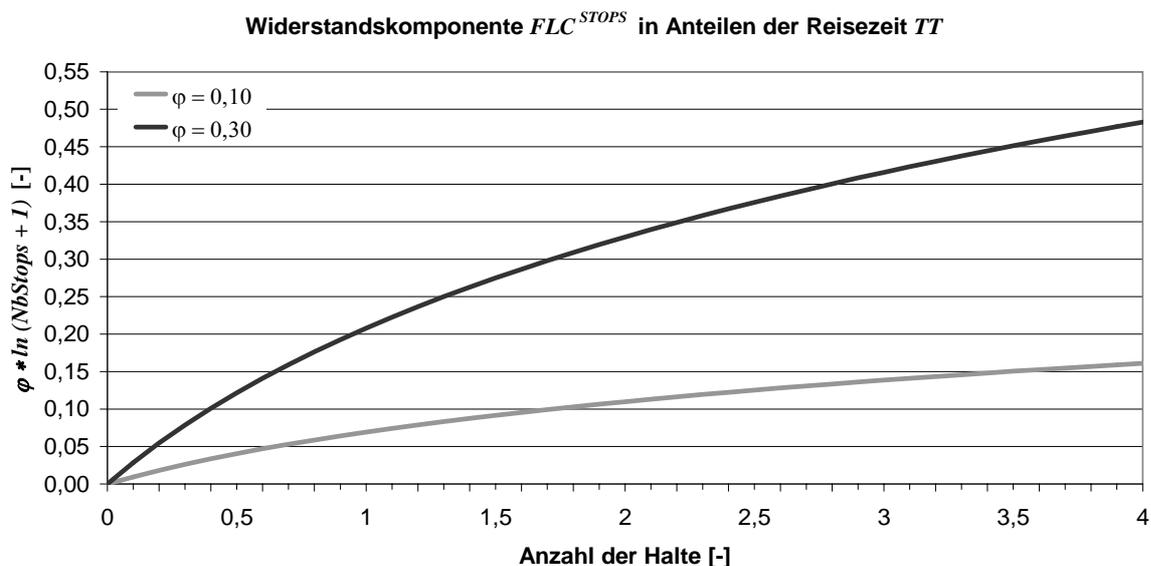
zur Berücksichtigung der Behinderungsfreiheit zugeordnet. Die Befragungen von Wermuth et al. [2004] haben aber auch ergeben, dass bei neuen Wegen die Reisezeit nur eine untergeordnete Rolle spielt und auch die Behinderungsfreiheit weniger gewichtig eingeschätzt wird. Dagegen wird die Route anhand von Attributen wie Lage und Funktion eingeschätzt, weshalb für den Pkw-Fernverkehr die Behinderungsfreiheit weniger bedeutsam eingestuft wird und mit einem Faktor

$$\varphi_{Pkw\_Fern} = 0,10. \quad (7-5)$$

gewichtet wird.

Zwar nicht als echte Bestätigung der gewählten Parameterwerte, aber als Untermauerung der Annahmen kann die Untersuchung von Benschhof [1970] (laut Bovy und Stern [1990]) dienen, in der 1300 Fahrer nach ihren Motiven der Routenwahl befragt worden sind. Hier wurde etwa 430 mal der Grund „schnellste Route“ und etwa 170 mal „weniger Halte notwendig“ genannt, woraus einen Gewichtungsfaktor von  $\varphi = 0,40$  resultieren würde.

Eine Darstellung der Widerstandskomponente  $FLC_{a,VT,v}^{STOPS}$  in Anteilen der Reisezeit abhängig vom Gewichtungsparameter  $\varphi_{VT}$  enthält Bild 7.11.



**Bild 7.11:** Anteile der Reisezeitbeaufschlagung der Widerstandskomponente  $FLC_{a,VT,v}^{STOPS}$  in Abhängigkeit des Gewichtungsfaktors  $\varphi_{VT}$

Als weitere komfortbezogene Komponente wird die Straßenklasse (RT = Road Type) in der Widerstandsbestimmung berücksichtigt. Hierbei liegt die Annahme zugrunde, dass mit steigender Straßenklasse ein gleichmäßigeres Fahren möglich ist und man sich behinderungsfreier fortbewegen kann. Für die einzelnen Fahrzeugtypen (siehe Kapitel 7.2 und 8.2.2) wird angenommen, dass sie sich nicht nur in ihren fahrzeugtechnischen und fahrdynamischen Eigenschaften unterscheiden, sondern es wird mit ihnen auch verschiedene Ortskenntnis und unterschiedliche Bereitschaft zur Wahl des untergeordneten Straßennetzes assoziiert. So wird angenommen, dass beispielsweise ein Lkw aufgrund seiner Größe und geringeren Wendigkeit versuchen wird, eher auf höherrangigen Straßen zu fahren als ein Pkw. Modelliert wird dieses Verhalten durch die Widerstandskomponente  $FLC_{a,VT,\nu}^{RT}$  der Form:

$$FLC_{a,VT,\nu}^{RT} = TT_{a,VT,\nu} \cdot \mu_{VT} \cdot \left( 1 - \frac{Cap_a}{CapNet_{max}} \right) \quad [s] \quad (7-6)$$

mit:

$TT_{a,VT,\nu}$  aktuelle Reisezeit auf Link  $a$  für Fahrzeugtyp  $VT$  im Intervall  $\nu$

$Cap_a$  Kapazität von Link  $a$

$CapNet_{max}$  Maximale Kapazität, die auf einem Link im Netz vorhanden ist

$\mu_{VT}$  Kapazitätsgewichtungsfaktor, abhängig vom Fahrzeugtyp  $VT$ .

Die Kapazitätswerte der einzelnen Strecken sind festsetzbare, statische Werte, die nicht zwangsläufig die tatsächlichen Kapazitäten repräsentieren müssen und keinen Einfluss auf die Simulation haben, sondern als Abstufung der Kategorien untereinander dienen. Da als Vergleichsgröße die maximale im betrachteten Netz vorhandene Kapazität  $CapNet_{max}$  verwendet wird und nicht ein fester Wert, passt sich die Berücksichtigung der Differenziertheit des betrachteten Netzes an. Bei dieser Vorgehensweise muss allerdings beachtet werden, dass bei Erweiterungen des Netzes um Strecken mit höheren Kapazitätswerten als die bisher vorhandenen, das Netz neu zu kalibrieren ist, da sich andere Widerstände für die Routenwahl und als Folge auch andere Aufteilungen ergeben können.

Darüber hinaus bestimmt sich die Kapazität  $Cap_a$  eines Links  $a$  aus der Anzahl der Fahrstreifen auf diesem Link und dem festgesetzten Kapazitätswert pro Fahrstreifen. Dies hat zur Folge, dass auch innerhalb der gleichen Straßenklasse eine feine Differenzierung in der Weise vorgenommen wird, dass mehrstreifige Strecken einen geringeren Widerstand aufweisen als einstreifige und somit die Benutzung höherrangiger Straßen forciert wird.

Die in der vorliegenden Arbeit getroffene Einstufung des Netzes in einzelne Straßenklassen mit entsprechenden Kapazitätswerten wird in Kapitel 8.2.1 näher erläutert (siehe Tab. 8.1).

Wie zuvor bei der Kostenkomponente  $FLC_{a,VT,\nu}^{STOPS}$  ist auch  $FLC_{a,VT,\nu}^{RT}$  im Verhältnis zur Reisezeit zu gewichten. Da sich diese Widerstandskomponente ebenfalls auf das Motiv „Behinderungsfreiheit“ bezieht, ergibt sich unter Heranziehung der Untersuchungen von Wermuth et al. [2004] ein Gewichtungsfaktor

$$\mu_{Pkw} = \mu_{Pkw\_Wirtschaft} = 0,30 \quad , \quad (7-7)$$

wobei dieser nur für den Pkw und den Pkw Wirtschaftsverkehr angenommen wird.

Da nach der Untersuchung von Zibuschka [1981] (laut Bovy und Stern [1990]) bei Lkw-Fahrern das Motiv „Straßenbreite“ (hier als das mit der Straßenklasse vergleichbares Kriterium angenommen) als zweitwichtigstes auf Autobahnen und als drittwichtigstes auf Regionalstraßen angesehen wird, wird die Gewichtung bei Lkws bis 7,5 t zu

$$\mu_{Lkw\_bis7.5t} = 0,40 \tag{7-8}$$

und bei Lkws über 7,5 t sogar zu

$$\mu_{Lkw\_ueber7.5t} = 0,50 \tag{7-9}$$

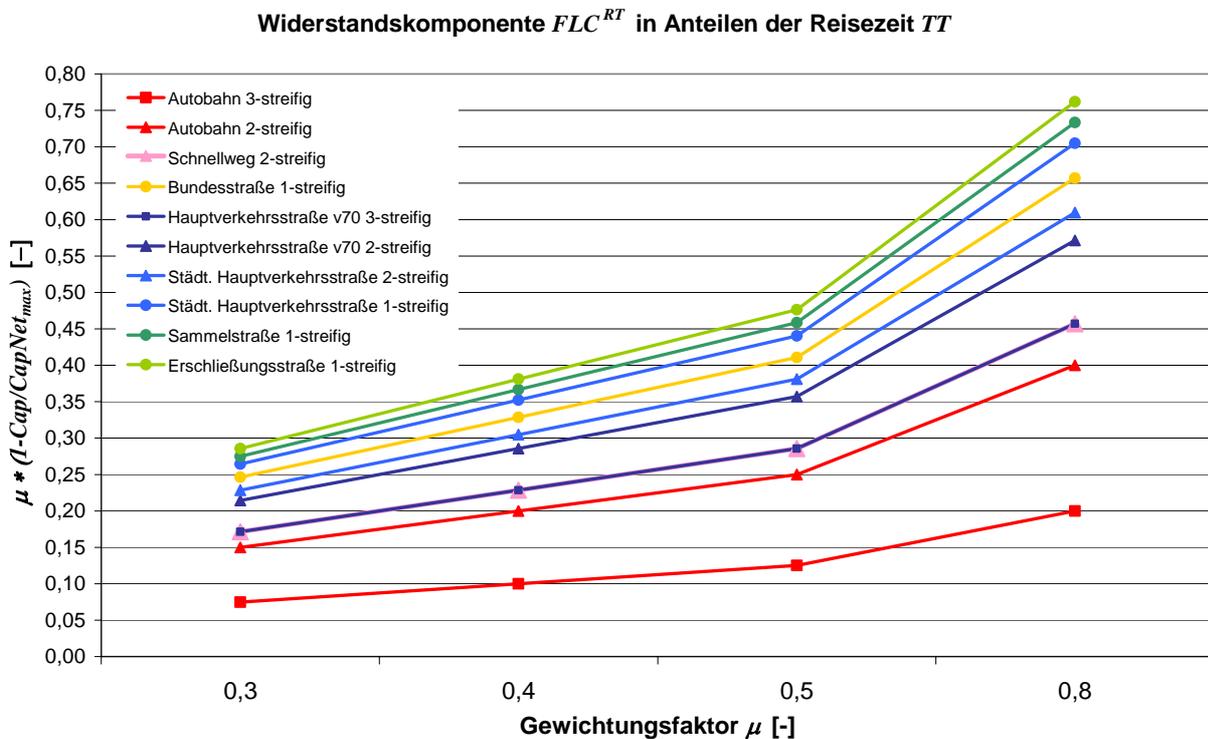
gesetzt.

Für den Fernverkehr wird angenommen, dass er sich auf für ihn unbekanntem Wegen befindet, und daher das Motiv „Reisezeit“ eine bis zu viermal geringe Bedeutung hat [Wermuth et al., 2004]. Daraus abgeleitet wird

$$\mu_{Pkw\_Fern} = 0,80 \tag{7-10}$$

gewählt.

Eine Darstellung der Widerstandskomponente  $FLC_{a,VT,v}^{RT}$  in Anteilen der Reisezeit abhängig vom Gewichtungsparameter  $\mu_{VT}$  und den unterschiedlichen Straßenklassen enthält Bild 7.12. Die Kapazitätswerte bzw. die maximale Kapazität, die auf einem Link im Netz vorhanden ist, wurde dabei entsprechend der Werte, die in der Simulationsstudie verwendet wurden (siehe Tab. 8.1) angenommen.



**Bild 7.12:** Anteile der Reisezeitbeaufschlagung der Widerstandskomponente  $FLC_{a,VT,v}^{RT}$  in Abhängigkeit des Gewichtungsfaktors  $\mu_{VT}$

Die Gegenüberstellung verdeutlicht, dass beispielsweise für Pkw-Fahrer ( $\mu_{Pkw} = 0,30$ ) modelliert wird, dass sie bei eigentlich objektiv gleichen Reisezeiten auf einer einstreifigen Erschließungsstraße ( $FLC_{a,Pkw,v}^{Erschl.1-str.} = TT_{a,Pkw,v} \cdot 0,29$ ) diese mit einem um 6 % höheren Widerstand assoziieren, als wenn sie auf einer zweistreifigen Hauptverkehrsstraße ( $FLC_{a,Pkw,v}^{HVS 2-str.} = TT_{a,Pkw,v} \cdot 0,23$ ) führen. Handelt es sich aber um Pkw-Fahrer des Fernverkehrs ( $\mu_{Pkw\_Fern} = 0,80$ ), vergrößert sich dieser Unterschied auf 15 % ( $FLC_{a,Pkw-Fern,v}^{Erschl.1-str.} = TT_{a,Pkw,v} \cdot 0,76$  gegenüber  $FLC_{a,Pkw,v}^{HVS 2-str.} = TT_{a,Pkw,v} \cdot 0,61$ ).

Setzt man die Widerstandskomponenten zusammen, ergibt sich folgende Widerstandsfunktion:

$$LC_{a,VT,v} = FLC_{a,VT,v}^{TIME} + FLC_{a,VT,v}^{STOPS} + FLC_{a,VT,v}^{RT} =$$

$$= TT_{a,VT,v} \cdot \left[ 1 + \varphi_{VT} \cdot \ln(NbStops + 1) + \mu_{VT} \cdot \left( 1 - \frac{Cap_a}{CapNet_{max}} \right) \right] \quad [s] \quad (7-11)$$

mit:

$TT_{a,VT,v}$  aktuelle Reisezeit auf Link  $a$  für Fahrzeugtyp  $VT$  im Intervall  $v$

$NbStops$  mittlere Anzahl von Halten auf Link  $a$  im Intervall  $v$

$\varphi_{VT}$  Gewichtungsfaktor zur Berücksichtigung der Behinderungsfreiheit, abhängig vom Fahrzeugtyp  $VT$

$Cap_a$  Kapazität von Link  $a$  [Fz/h]

$CapNet_{max}$  Maximal Kapazität, die auf einem Link im Netz vorhanden ist

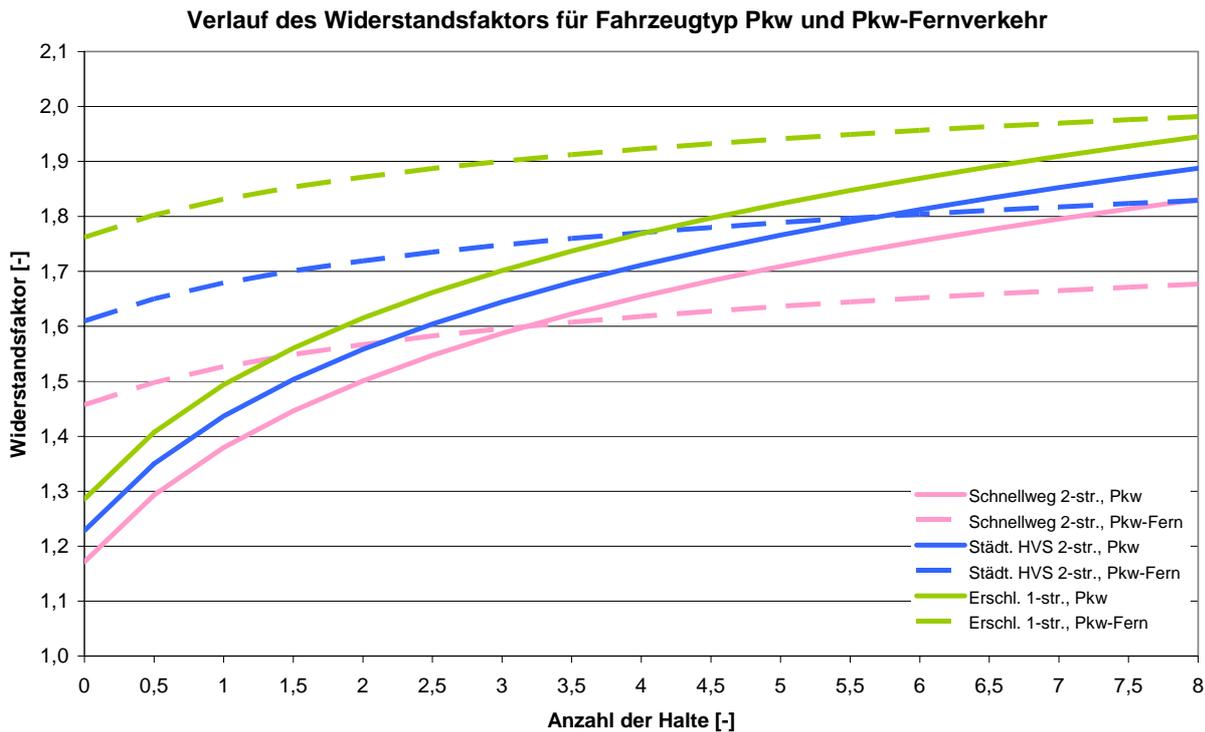
$\mu_{VT}$  Kapazitätsgewichtungsfaktor, abhängig vom Fahrzeugtyp  $VT$ .

Zur Verdeutlichung der unterschiedlichen Ausprägung der Widerstände in Abhängigkeit der Straßenklasse und der Anzahl der Halte sind in Bild 7.13 beispielhaft für die beiden Fahrzeugtypen Pkw und Pkw-Fernverkehr die Verläufe des Widerstandsfaktors

$$\left[ 1 + \varphi_{VT} \cdot \ln(NbStops + 1) + \mu_{VT} \cdot \left( 1 - \frac{Cap_a}{CapNet_{max}} \right) \right]$$

dargestellt.

Der deutlich geringere Versatz der durchgezogenen Linien, also die der Pkw-Widerstände, im Vergleich zu denen des Pkw-Fernverkehrs geben die Modellannahmen wieder, dass die Straßenklasse für diesen Fahrzeugtyp keine so hohe Priorität hat. Der Funktionsverlauf ist so gewählt, dass Pkw deutlich sensitiver auf das Ansteigen der Halte reagieren, was für den Pkw-Fernverkehr als mit nicht so hoher Relevanz angenommen wurde, und die Widerstandskurven daher deutlich flacher verlaufen.



**Bild 7.13: Beispiele für den Verlauf des Widerstandsfaktors in Abhängigkeit des Fahrzeugtyps, der Straßenklasse und der Anzahl der Halte**

Eine Überprüfung des gewählten Ansatzes ist aufgrund der Komplexität sehr schwierig und wäre nur mit sehr hohem Aufwand, der im Rahmen dieser Arbeit nicht geleistet werden kann, greifbar. Um jedoch eine Plausibilitätsprüfung der Modellannahmen durchführen zu können, wurden die in Kapitel 7.4.1 erläuterte eigene Befragung verwendet.

Nimmt man die Befragungsergebnisse (siehe Bild 7.10) und setzt die Anteile der Motive „schnellste Route“ und „behinderungsfrei“ ins Verhältnis, wie es zur Bestimmung des Gewichtungsfaktors  $\varphi_{VT}$  in Gleichung (7-3) bzw.  $\mu_{VT}$  in Gleichung (7-7) erfolgt ist, ergibt sich ein Wert von

$$\frac{28,1\%}{89,5\%} = 0,31. \quad (7-12)$$

Dies entspricht fast genau dem zuvor bestimmten Gewichtungsfaktor  $\varphi_{Pkw} = 0,30$  bzw.  $\mu_{Pkw} = 0,30$ . Auch bei dem Faktor „Erfahrung“ ist mit 36,8 % gegenüber 43,0 % bzw. 29,5 % eine hohe Übereinstimmung zwischen beiden Untersuchungen festzustellen. Die sich ergebende Reihung der Motive nach ihrem Anteil („schnellste/ kürzeste Route“ → „Erfahrung“ → „Behinderungsfreiheit“), kann bei beiden Befragungen als gleich und auch in ihrer Größenausprägung als vergleichbar angesehen werden. Aus diesem Grund wird die Modellierung der Widerstände auf Basis der Befragungsstudien als plausibel angesehen.

#### 7.4.2.2 Widerstände navigierter Verkehrsteilnehmer

Verkehrsinformationssysteme zielen darauf ab, das Verkehrsgeschehen zu verflüssigen und Verkehrsstauungen abzubauen. Darunter sind insbesondere Navigationssysteme darauf be-

dacht, den einzelnen Verkehrsteilnehmer vor allem schneller an sein Ziel zu bringen. Für die Modellierung der Widerstände der navigierten Verkehrsteilnehmer  $LC_{a,\tau}^{dyn\ info}$  wird daher als alleinige die Routenwahl bestimmender Komponente die Reisezeit angenommen. Die Qualität der Information wird als so gut eingeschätzt, dass aktuelle mittlere Reisezeiten über alle Fahrzeugtypen vorhanden sind.

$$LC_{a,\tau}^{dyn\ info} = TT_{a,\tau} = \frac{\sum_i^{N_{veh,a}} TT_{a,i,\tau}}{N_{veh,a}} \quad [s] \quad (7-13)$$

mit:

$TT_{a,\tau}$  mittlere aktuelle Reisezeit [s] auf Link  $a$  im Aktualisierungsintervall  $\tau$

$TT_{a,i,\tau}$  Reisezeit [s] des Fahrzeugs  $i$  auf Link  $a$  im Aktualisierungsintervall  $\tau$

$N_{veh,a}$  Anzahl von Fahrzeugen, die Link  $a$  im Aktualisierungsintervall  $\tau$  verlassen haben.

Die Größe des Aktualisierungsintervalls  $\tau$ , über das die mittlere Reisezeit bestimmt wird, entspricht dem Intervall der Offerierung neuer Informationen (5 min, 15 min, 30 min). ‚Aktuell‘ steht demnach nicht unbedingt für die tatsächlich im Moment auf dem Link erfahrbare Reisezeit, sondern umfasst, entsprechend der Qualität der vorhandener Daten, in unterschiedlich hohem Maße auch bereits etwas veraltete Werte. Es wird also keine Prognose der Reisezeiten angeboten.

Die Annahmen zur Verfügbarkeit, Qualität und Offerierung der Informationen entspricht nicht den heute vorliegenden oder möglichen Bedingungen, baut aber auf den vorhandenen Zuständen auf. Aktuelle Verkehrsinformationen werden heutzutage (in Europa) den dynamischen Navigationssystemen über den digitalen Verkehrsinformationsdienst RDS-TMC (siehe Kapitel 4.3.1 und 4.3.2) zugespielt. Die übermittelten Verkehrsstörungen unterschiedlicher Ausprägung werden an den entsprechenden Streckenabschnitten im Gerät so verarbeitet, dass eine Reisegeschwindigkeitsreduzierung bzw. Reisezeiterhöhung an dieser Stelle bewirkt wird. Die Zuordnung der Information geschieht dabei abschnittsbezogen.

Übertragen auf das Modell kann man sagen, dass ein Link einer TMC-Location entspricht. Da heutige TMC-Locations eher eine räumliche Ausprägung von mehreren Kilometern haben, bedeutet dies, dass im Modell von einer verfeinerten Aufteilung ausgegangen wird, da hier ein Link etwa den Abschnitt zwischen zwei Knotenpunkten darstellt.

Bei der Qualität der Information wird im Modell gegenüber der heutigen Realität ebenfalls von einer Verbesserung ausgegangen. Die Verwendung von mittleren aktuellen Reisezeiten als Widerstand bedeutet, dass aktuelle Verkehrsdaten auf jedem Abschnitt (Link  $\rightarrow$  TMC-Location) ohne Fehler erfasst und übermittelt werden. Verkehrsstörungen werden also nicht mehr in Schweregrade (freier - reger – dichter - stockender Verkehr - Stau) eingeteilt, sondern stufenlos aktuelle Werte übertragen. Diese akkurate Vollerfassung stellt einen Zustand dar, der in näherer Zukunft wohl nicht erreicht wird, soll aber zur Absteckung der Grenzen dienen.

Demgegenüber deckt die Variierung der Aktualisierungsrate der Verkehrsinformationen von Intervalllängen von fünf Minuten bis zu 30 Minuten auch durchaus heutzutage gängige Bereiche

ab. Auch die leichte Informationsveraltung durch Offerierung aktueller und nicht im Moment vorliegender Zustände oder sogar von Prognosen entspricht heutzutage gebräuchlichen Verfahren.

Die zuvor beschriebene Vorgehensweise bei der Modellierung der Widerstände bildet einen Zustand ab, bei dem dynamisch Informationen erfasst und übermittelt werden. Zur Überbrückung der heutzutage vorhandenen Fehlstellen in den Datengrundlagen behelfen sich Navigationssysteme damit, dass statische Geschwindigkeitswerte angenommen werden. Sie sind entsprechend der Straßenklasse festgelegt und repräsentieren einen durchschnittlich unter normalen Verkehrszuständen fahrbaren Wert. Stauungen, aber auch sehr zügiges Vorankommen (z. B. nachts) kann somit nicht berücksichtigt werden.

Um auch diesen Fall, dass keine dynamischen Informationen oder nur auf einem Teil des Netzes (z. B. nur hochrangige Straßen) vorliegen, nachbilden zu können, werden für einige Experimente auch statische Widerstände modelliert.

$$LC_a^{statinfo} = \frac{L_a}{v_{stat,RT}} \quad [s] \quad (7-14)$$

mit:

$L_a$  Länge [m] des Links  $a$

$v_{stat,RT}$  durchschnittlich fahrbare Geschwindigkeit [m/s] auf Straßenklasse  $RT$ , statisch.

Die Einstufung des Netzes in die einzelnen Straßenklassen wird in Kapitel 8.2.1 näher erläutert und zugeordnete Parameter aufgeführt (siehe Tab. 8.1).

## 7.5 Modellierung der Wegeentscheidung

Die Routenwahl stellt einen Entscheidungsprozess dar, der bei häufiger Wiederholung zur Ausbildung eines habituellen Verhaltens führt, das nicht mehr dem Prinzip der kontinuierlichen Nutzenmaximierung als Entscheidungsregel unterliegt. Um das unterschiedliche Verhalten der beiden Verkehrsteilnehmergruppen nicht navigierter und navigierter Fahrzeuge abbilden zu können, wird die Routenwahl differenziert modelliert.

Die Routenwahl der nicht navigierten Verkehrsteilnehmer wird mittels des C-Logit-Ansatzes nach Cascetta [1996a] [1996b] (siehe Kapitel 5.4, Commonality Factor nach Gleichung (5-12)) bestimmt, die dynamisch geführten werden auf den reisezeitgünstigsten Weg geleitet.

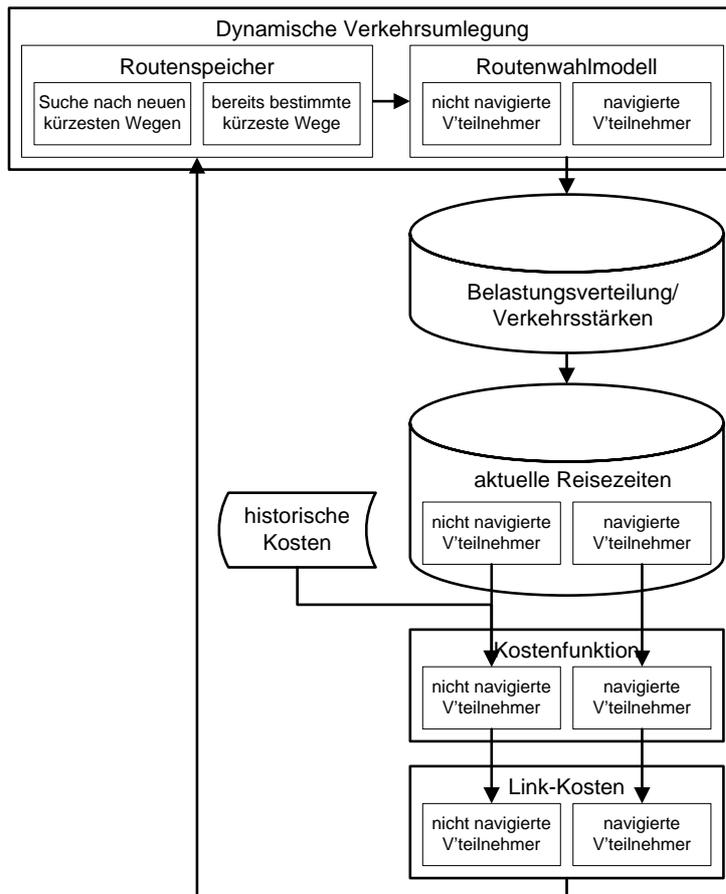


Bild 7.14: Modellschema der Routenwahl und Routenbeeinflussung

## 7.5.1 Ausprägung des Entscheidungsmodells

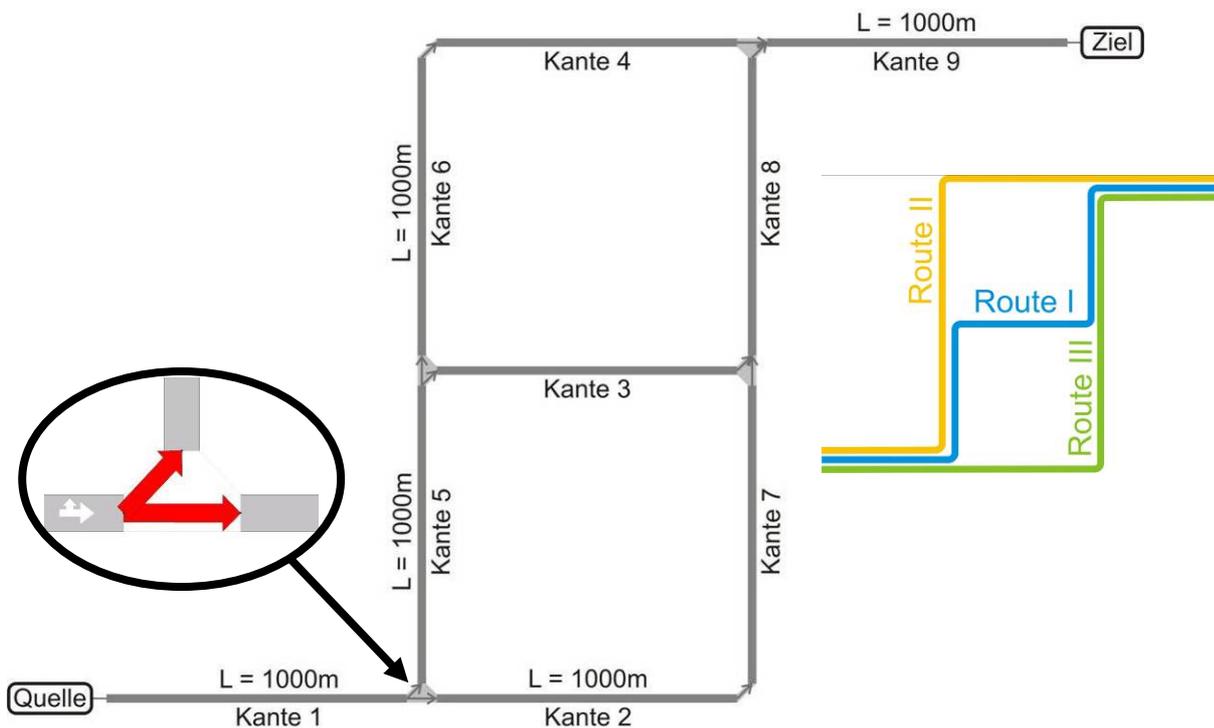
### 7.5.1.1 Anwendung des Entscheidungsmodells auf einem Testnetz

Das Routenwahlverhalten der nicht navigierten Verkehrsteilnehmer wird mit Hilfe eines Entscheidungsmodells (siehe Kapitel 5.4) nachgebildet, das die Auswahlwahrscheinlichkeit  $P_k$  eines Weges  $k$  aus einem bestimmten Routensatz als Funktion seines Nutzens bestimmt.

Um die Sensitivität von Parameteränderungen und des Einflusses der in Kapitel 7.4.2 dargestellten Widerstände aufzuzeigen, sind hier einige Analysen an dem in Bild 7.15 dargestellten Testnetz aufgeführt. Es besteht aus neun Kanten mit einer Länge von je 1000 m. Die Knotenpunkte sind so modelliert, dass die Geradeausverbindungen eine Länge von 10 m haben und zum Abbiegen 7,1 m zurückzulegen sind, wobei alle Verbindungen mit gleicher Geschwindigkeit befahrbar sind.

Somit ergeben sich die drei Routen:

- Route I mit einer Länge von 5028,4 m,
- Route II mit einer Länge von 5034,1 m und
- Route III mit einer Länge von 5034,1 m.



**Bild 7.15: Testnetz und Detailausschnitt eines Knotenpunkts im Testnetz**

Alle Strecken des Netzes sind der gleichen Straßenklasse (Hauptverkehrsstraße mit zulässiger Höchstgeschwindigkeit von  $v = 70$  km/h, siehe Tab. 8.1) zugeordnet und verfügen somit über gleiche Attribute. Das Netz wird mit 2000 Fz/h belastet, was einer Belastung entspricht, die noch unter der Auslastungsgrenze liegt, so dass keine größeren Stauungen entstehen. Der Analysezeitraum umfasst eine Stunde, wobei zur Vorbelastung des Netzes eine weitere Stunde davorgeschaltet wird. Zur Initialisierung der Wegeentscheidung werden die Fahrzeiten des unbelasteten Netzes bei  $v = 70$  km/h verwendet.

Nach Ende der Vorlaufzeit ergeben sich für den Fall, dass in der Wegeentscheidung als Kosten lediglich die Reisezeiten berücksichtigt werden, folgende mittlere Reisezeiten:

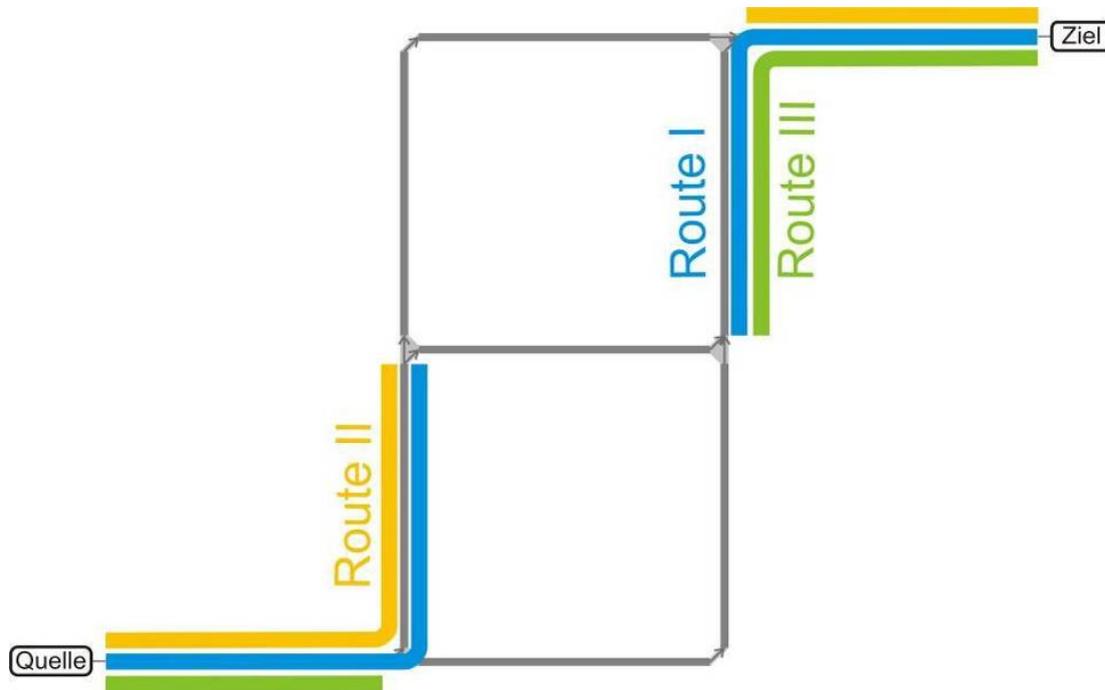
**Tab. 7.2: Mittlere Reisezeiten der drei Routen**

Route	I	II	III
Mittlere Reisezeit in [s]	260,6	260,8	260,9

Die Routen sind praktisch gleich lang, so dass sich bei Verwendung des Logit-Ansatzes (siehe Kapitel 5.4) eine gleichmäßige 33,33 % - 33,33 % - 33,33 %-Aufteilung der Fahrzeuge auf die drei Routen ergeben würde.

Route I ist mit 5028,4 m geringfügig kürzer als die Routen II und III und weist daher in diesem störungsfreien Fall auch eine minimal geringere Reisezeit auf. Dieser Unterschied wird für den Fall, dass Fahrzeuge navigiert werden, bedeutend. In der Simulation erfolgt die Auswahl des Weges, auf den die Navigierten geführt werden, ausschließlich auf Basis der kürzesten Reisezeit. Dabei wird der Abstand zwischen den Reisezeiten auf den Alternativen nicht berücksichtigt, so dass alle Navigierten auf Route I geschickt würden.

Die Überlappung von Route I mit anderen Routen ist stärker als jeweils die der beiden anderen (siehe Bild 7.16). Da dies im C-Logit-Ansatz berücksichtigt wird, ergibt sich eine größere Routenwahlwahrscheinlichkeit für Route II bzw. III gegenüber Route I.



**Bild 7.16:** Überlappung der Routen

Die Überlappungsmatrix, ausgedrückt als Reisezeit in Stunden, bestimmt sich zu:

**Tab. 7.3:** Überlappungsmatrix (Reisezeit in [h])

Route	I	II	III
I	0,072	0,043	0,044
II	0,043	0,072	0,029
III	0,044	0,029	0,072

Mit einem Gewichtungsfaktor  $\beta = 0,15$  und mit  $\gamma = 1,0$  berechnen sich die Überlappungsfaktoren  $CF_k$  (siehe Gl. (5-12)) zu:

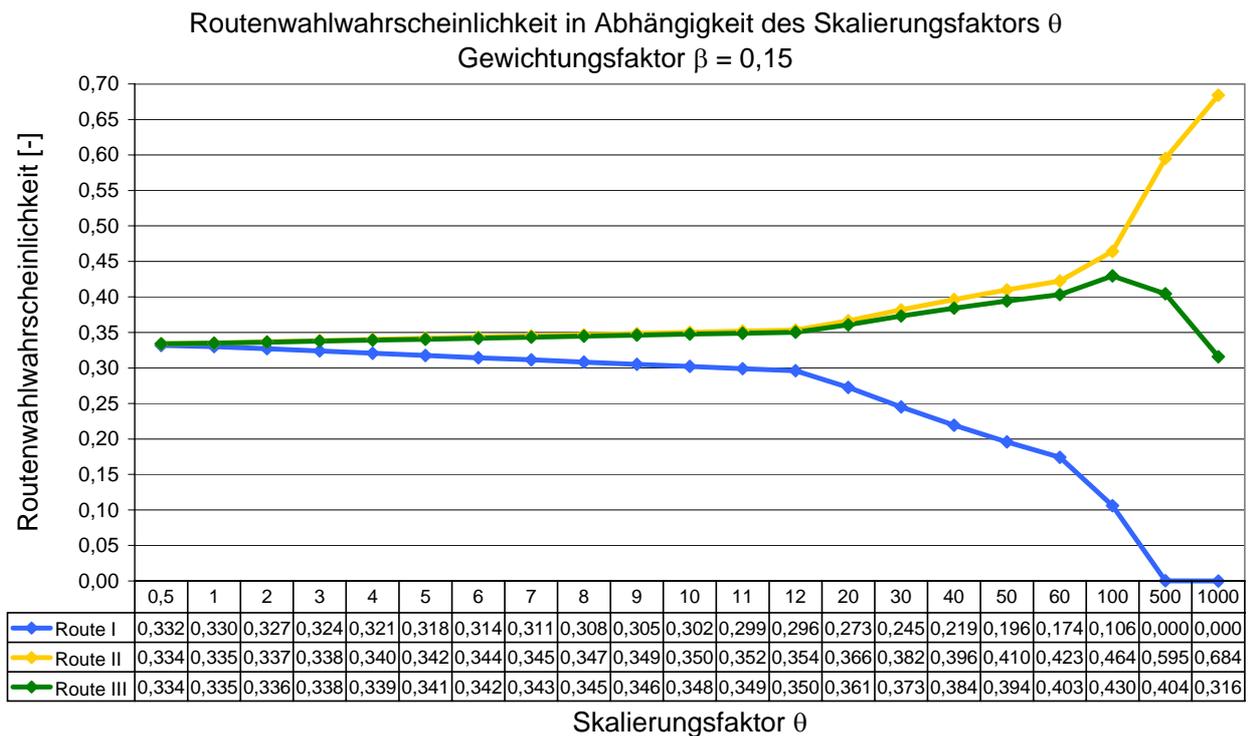
$$\begin{aligned}
 CF_I &= 0,15 \cdot \ln \left( \left( \frac{L_{I-I}}{\sqrt{L_I L_I}} \right)^{1,0} + \left( \frac{L_{I-II}}{\sqrt{L_I L_{II}}} \right)^{1,0} + \left( \frac{L_{I-III}}{\sqrt{L_I L_{III}}} \right)^{1,0} \right) = \\
 &= 0,15 \cdot \ln \left( \frac{0,072}{\sqrt{0,072 \cdot 0,072}} + \frac{0,043}{\sqrt{0,072 \cdot 0,072}} + \frac{0,044}{\sqrt{0,072 \cdot 0,072}} \right) = \\
 &= 0,15 \cdot \ln (2,208) = 0,119
 \end{aligned}$$

bzw.  $CF_{II} = 0,104$  und  $CF_{III} = 0,105$ .

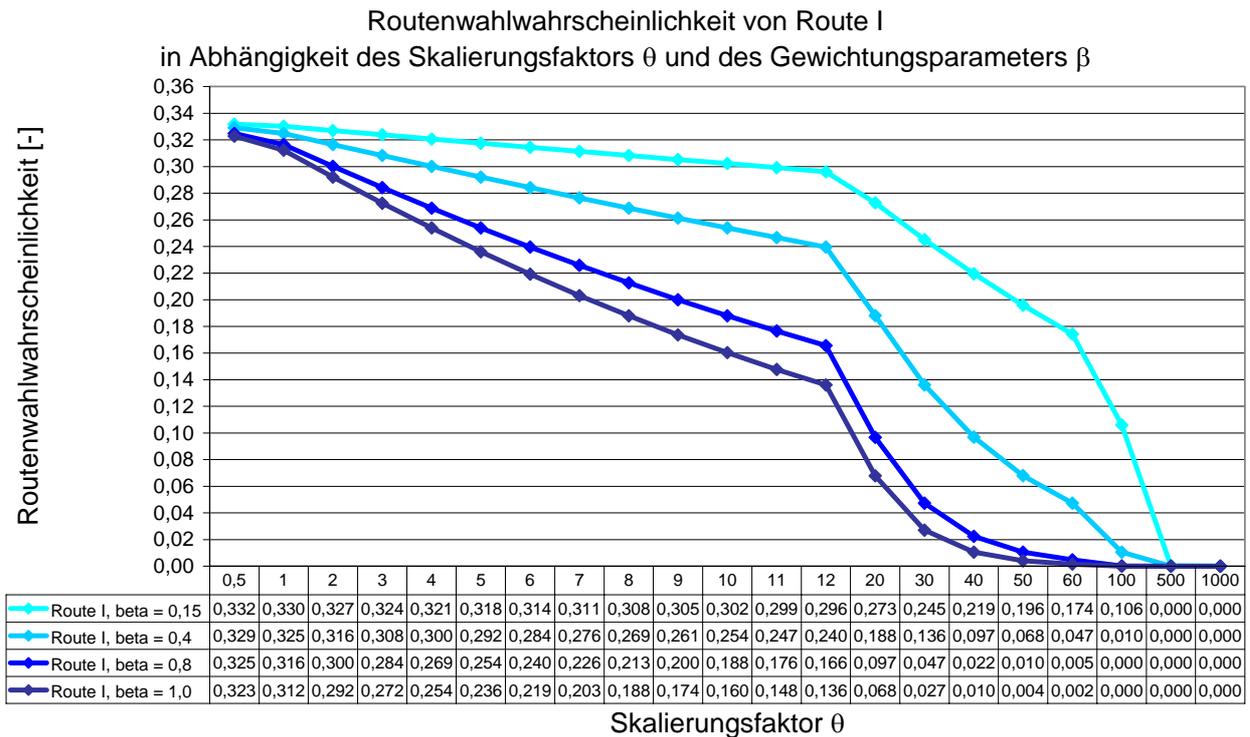
Der Parameter  $\beta$  gewichtet, wie stark die Überlappung gegenüber den Kosten berücksichtigt wird, wobei im Falle  $\beta = 0$  der C-Logit-Ansatz in den Logit-Ansatz übergeht. Mit steigenden

Werten für  $\beta$  findet eine immer stärkere Konzentration auf die sich weniger überlappenden Routen II und III statt. Diese Spreizung ist umso ausgeprägter, je größer der Skalierungsfaktor  $\theta$  ist, der beeinflusst, wie stark Änderungen in den Kosten Auswirkungen auf die Routenwahlwahrscheinlichkeit haben. Zur Verdeutlichung der Wirkung des Skalierungsfaktors  $\theta$  und des Parameter  $\beta$  sind in Bild 7.17 und Bild 7.18 die Veränderungen der Routenwahlwahrscheinlichkeiten für den einfachen Fall, dass es keine Rückkopplung zwischen der Belastung und der Reisezeit gibt, dargestellt.

Der Parameter  $\gamma$  ist von weniger großem Einfluss und wird normalerweise im Wertebereich von  $[0,2]$  gewählt [AIMSUN 5.0, 2005, Cascetta et al., 1996a, Torday, 2004]. In Anlehnung an die Literatur wird in allen Untersuchungen, die im Rahmen dieser Arbeit stattfinden,  $\gamma = 1,0$  gewählt. Im städtischen Bereich, auf den in dieser Arbeit die Betrachtung gerichtet ist, ergeben sich durch die Engmaschigkeit des Netzes häufig mehrere Routen zwischen Zellen, die sich nur geringfügig voneinander unterscheiden. Um der Wahlwahrscheinlichkeit auch stark überlappender Routen modelltechnisch nicht zu stark entgegen zu wirken, wird für die weiteren Untersuchungen der Gewichtungparameter relativ gering zu  $\beta = 0,15$  gesetzt.



**Bild 7.17:** Veränderung der Routenwahlwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit des Skalierungsfaktors  $\theta$  mit  $\beta = 0,15$  und  $\gamma = 1,0$



**Bild 7.18:** Routenwahlwahrscheinlichkeit von Route I in Abhängigkeit der Skalierungsfaktors  $\theta$  und des Gewichtungsparmeters  $\beta$

### Fall 1: Grundzustand

Zur Verdeutlichung der Wirkungsweise der modellierten Kostenfunktionen (siehe Kapitel 7.4.2), werden im Folgenden die Komponenten einzeln auf das Testnetz angewandt. Die Knotenpunkte sind nicht signalisiert und es gilt die Rechts-vor-Links-Vorfahrtsregelung. Wird lediglich die Reisezeit als Kostenkomponente  $FLC$  (siehe Gl. ( 7-1 )) verwendet, ergeben sich Kosten von etwa 260 s auf allen drei Routen, wobei aufgrund der Überlappung eine 31,8 %-34,2 %-34,1 %-Aufteilung stattfindet (siehe Tab. 7.5). Zieht man die Komfortkomponente  $FLC_{a,VT,v}^{STOPS}$  (siehe Gl. ( 7-2 )), die die Anzahl der Halte berücksichtigt, hinzu, ergibt sich eine nahezu identische Aufteilung, da das Netz behinderungsfrei befahren werden kann, so dass die Kostenerhöhung bedingt durch Stopps sehr gering ausfällt (siehe Tab. 7.4). Eine Gegenüberstellung der sich einstellenden Routenkosten und Routenwahlwahrscheinlichkeiten enthält Tab. 7.5.

**Tab. 7.4: Linkkosten bei Berücksichtigung der Komfortkomponente  $FLC_{a,VT,v}^{STOPS}$  (siehe Gl. ( 7-2 )) mit  $\varphi = 0,3$  (siehe Gl. ( 7-4 ))**

Link	Mittlere Reisezeit [s]	Mittlere Anzahl Halte [-]	$\varphi \cdot \ln(NbStops + 1)$	Kosten [s]
1-2	51,5	0,00	1,000	51,5
1-5	51,2	0,00	1,000	51,2
2-7	50,0	0,00	1,000	50,0
3-8	50,0	0,02	1,002	50,3
4-9	52,7	0,22	1,058	55,8
5-3	51,4	0,00	1,000	51,4
5-6	51,7	0,00	1,000	51,7
6-4	50,6	0,00	1,000	50,6
7-8	51,5	0,02	1,006	51,8
8-9	53,7	0,15	1,037	56,0
9-Ziel	53,8	0,01	1,004	54,0

**Tab. 7.5: Kosten und Wahlwahrscheinlichkeiten der drei Routen, Grundzustand**

Route	I	II	III
Kosten nur Reisezeit [s]	260,2	260,1	260,5
Kosten mit Komfortkomponente [s]	262,9	263,3	263,3
Routenwahlwahrscheinlichkeit [-] Kosten nur Reisezeit	0,318	0,342	0,341
Routenwahlwahrscheinlichkeit [-] Kosten mit Komfortkomponente	0,317	0,342	0,340

## Fall 2: Lichtsignalanlage

Durch Anordnung einer Lichtsignalanlage am Knotenpunkt zwischen Kante 2 und Kante 7, die bei einem 90 s-Umlauf 20 s Freigabe gewährt, entstehen zeitweise Stauungen auf Kante 2. Die Reisezeiten auf Route III erhöhen sich entsprechend, weshalb die Entscheidung zur Wahl dieser Route sinkt. Geht die Komfortkomponente  $FLC_{a,VT,v}^{STOPS}$  in die Kostenermittlung ein, werden die entstandenen Halte auf Kante 2 zusätzlich als negativ bewertet, weshalb sich die Routenwahlwahrscheinlichkeit von Route III noch verringert. Die Behinderungsfreiheit wird dabei abhängig vom Fahrzeugtyp durch den Faktor  $\varphi_{VT}$  (siehe Gl. ( 7-4 ) und Gl. ( 7-5 )) unterschiedlich groß gewichtet. Die Bestimmung der Linkkosten ist beispielhaft in Tab. 7.6 aufgeführt. Einen Vergleich der Kosten und der entsprechend resultierenden Routenwahlwahrscheinlichkeiten enthält Tab. 7.7. Zum besseren Verständnis der aufgeführten Einzelwerte sei angemerkt, dass sich die reine Reisezeit bei den unterschiedlichen Testläufen leicht unterscheidet, da sich aufgrund der unterschiedlichen Routenaufteilung differierende Belastungen und sich somit auch abweichende mittlere Reisezeiten erfasst über die simulierten Fahrzeuge auf den Routen ergeben.

**Tab. 7.6: Lichtsignalanlage an Knotenpunkt 2: Linkkosten bei Berücksichtigung der Komfortkomponente  $FLC_{a,Pkw,v}^{STOPS}$  (siehe Gl. ( 7-2 )) mit  $\varphi = 0,3$  (siehe Gl. ( 7-4 ))**

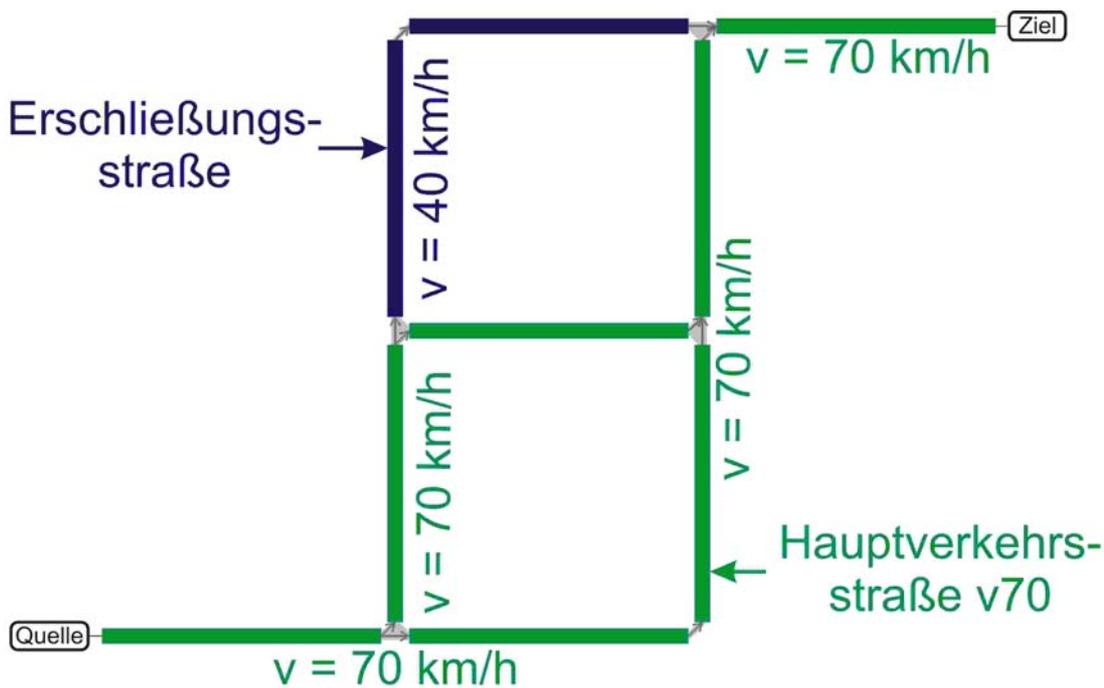
Link	Mittlere Reisezeit [s]	Mittlere Anzahl Halte [-]	$1 + \varphi \cdot \ln(NbStops + 1)$	Kosten [s]
1-2	51,4	0,00	1,000	51,4
1-5	51,2	0,00	1,000	51,2
2-7	218,2	3,55	1,455	317,4
3-8	50,0	0,05	1,015	50,7
4-9	53,0	0,16	1,044	55,4
5-3	51,5	0,00	1,000	51,5
5-6	51,8	0,00	1,000	51,8
6-4	50,6	0,00	1,000	50,6
7-8	53,4	0,07	1,021	54,5
8-9	54,1	0,17	1,048	56,6
9-Ziel	53,7	0,02	1,006	54,0

**Tab. 7.7: Kosten und Wahlwahrscheinlichkeiten der drei Routen, Netz mit Lichtsignalanlage**

Route	I	II	III
Kosten nur Reisezeit [s]	260,4	260,3	430,8
Kosten mit Komfortkomponente [s], $\varphi = 0,3$	264,1	262,9	534,0
Kosten mit Komfortkomponente [s], $\varphi = 0,1$	262,4	261,3	471,1
Routenwahlwahrscheinlichkeit [-] Kosten nur Reisezeit	0,340	0,361	0,300
Routenwahlwahrscheinlichkeit [-] Kosten mit Komfortkomponente, $\varphi = 0,3$	0,352	0,373	0,275
Routenwahlwahrscheinlichkeit [-] Kosten mit Komfortkomponente, $\varphi = 0,1$	0,344	0,366	0,290

### Fall 3: Unterschiedliche Straßenklasse

Die Kostenkomponente  $FLC_{a,Pkw,v}^{RT}$  (siehe Gl. ( 7-6 )) setzt die auf dem Netz vorhandenen Straßenklassen ins Verhältnis zueinander und beaufschlagt ein Fahren auf dem untergeordneten Netz mit zusätzlichen Kosten, was abhängig vom Fahrzeugtyp unterschiedlich hoch ausfällt (siehe Gewichtungsfaktor  $\mu_{VT}$ , Gl. ( 7-7 )). Die Kanten 4 und 6 des Testnetzes seien nun der Straßenklasse ‚Erschließungsstraße‘ zugeordnet, die mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 30 km/h befahrbar ist (siehe Bild 7.19). Dadurch verlangsamt sich die Reisezeit auf Route II, wodurch deren Wahlwahrscheinlichkeit sinkt. Die Kapazität der Straßenklasse ‚Erschließungsstraße‘ ist mit 400 Fz/h nur ein Drittel so groß eingestuft wie die übrigen Netzkannten, die der Straßenklasse ‚Hauptverkehrsstraße v70‘ angehören (hierzu sei angemerkt, dass der Kapazitätswert in der mikroskopischen Simulation AIMSUN NG keine beschränkende Wirkung hat, sondern lediglich in der Kostenfunktion berücksichtigt wird und somit eher die Rolle eines Gewichtungsfaktors hat).



**Bild 7.19:** Straßenklassen des Testnetzes im Fall 3

Bei Berücksichtigung der Straßenklassenkomponente  $FLC_{a,Pkw,v}^{RT}$  werden die Reisezeiten auf den Links des untergeordneten Netzes mit zusätzlichen Kostenanteilen belastet, die abhängig vom Fahrzeugtyp unterschiedlich groß sind. Die Bestimmung der Linkkosten für den Fahrzeugtyp Pkw ist beispielhaft in Tab. 7.8 aufgeführt. Einen Vergleich der Kosten und der entsprechend resultierenden Routenwahlwahrscheinlichkeiten auch für die anderen Fahrzeugtypen enthält Tab. 7.9.

**Tab. 7.8:** Straßenklasse ‚Erschließungsstraße‘ der Kanten 4 und 6: Linkkosten bei Berücksichtigung der Straßenklassenkomponente  $FLC_{a,Pkw,v}^{RT}$  (Gl. (7-6)) mit  $\mu_{Pkw} = 0,30$  (Gl. (7-7))

Link	Mittlere Reisezeit [s]	Kapazität	$1 + \mu_{vT} \cdot \left(1 - \frac{Cap_a}{CapNet_{max}}\right)$	Kosten [s]
1-2	59,0	1200	1	59,0
1-5	59,0	1200	1	59,0
2-7	49,7	1200	1	49,7
3-8	51,1	1200	1	51,1
4-9	126,2	400	$1 + 0,3 \cdot \left(1 - \frac{400}{1200}\right) = 1,2$	151,4
5-3	59,5	1200	1	59,5
5-6	59,8	1200	1	59,8
6-4	118,6	400	$1 + 0,3 \cdot \left(1 - \frac{400}{1200}\right) = 1,2$	142,3
7-8	51,3	1200	1	51,3
8-9	57,1	1200	1	57,1
9-Ziel	53,5	1200	1	53,5

**Tab. 7.9: Kosten und Wahlwahrscheinlichkeiten der drei Routen, unterschiedliche Straßenklassen**

Route	I	II	III
Kosten nur Reisezeit [s]	262,9	401,4	263,4
Kosten mit Straßenklassenkomponente [s], $\mu_{Pkw} = 0,30$	280,2	465,9	270,6
Kosten mit Straßenklassenkomponente [s], $\mu_{Lkw \text{ bis } 7.5t} = 0,40$	284,9	488,1	272,6
Kosten mit Straßenklassenkomponente [s], $\mu_{Lkw \text{ über } 7.5t} = 0,50$	289,9	509,2	275,3
Kosten mit Straßenklassenkomponente [s], $\mu_{Fernverkehr} = 0,80$	306,1	571,6	283,8
Routenwahlwahrscheinlichkeit [-] Kosten nur Reisezeit	0,334	0,307	0,360
Routenwahlwahrscheinlichkeit [-] Kosten mit Straßenklassenkomponente $\mu_{Pkw} = 0,30$	0,340	0,295	0,365
Routenwahlwahrscheinlichkeit [-] Kosten mit Straßenklassenkomponente $\mu_{Lkw \text{ bis } 7.5t} = 0,40$	0,342	0,289	0,369
Routenwahlwahrscheinlichkeit [-] Kosten mit Straßenklassenkomponente $\mu_{Lkw \text{ über } 7.5t} = 0,50$	0,343	0,285	0,372
Routenwahlwahrscheinlichkeit [-] Kosten mit Straßenklassenkomponente $\mu_{Fernverkehr} = 0,80$	0,348	0,271	0,381

### 7.5.1.2 Anwendung des Entscheidungsmodells auf das Untersuchungsnetz Hannover

Die Einstellung der Parameter  $\beta = 0,15$  und  $\gamma = 1,0$  erfolgt auf Grundlage der in Kapiteln 7.4.1, 7.4.2 und 7.5.1.1 beschriebenen Untersuchungen und in Anlehnung an Angaben der Literatur.

Der Skalierungsfaktor  $\theta$  wird zur Kalibrierung (siehe Kapitel 8.2.3) des Hannover-Modells verwendet, so dass eine möglichst gute Anpassung von Verkehrsstärken und Reisezeiten im Modell an reale Messwerte erreicht wird. Daraus ergab sich für die vorliegende Simulationsstudie eine Bestimmung der Auswahlwahrscheinlichkeit  $P_k$  einer Route  $k$  mit folgenden Parametereinstellungen:

$$P_k = \frac{e^{\theta(-PC_k - CF_k)}}{\sum_{l \neq k} e^{\theta(-PC_l - CF_l)}} = \frac{e^{5(-PC_k - CF_k)}}{\sum_{l \neq k} e^{5(-PC_l - CF_l)}} \quad (7-15)$$

mit:

$$CF_k = \beta \cdot \ln \sum_{l \in K_i} \left( \frac{L_{lk}}{\sqrt{L_l L_k}} \right)^\gamma = 0,15 \cdot \ln \sum_{l \in K_i} \left( \frac{L_{lk}}{\sqrt{L_l L_k}} \right)^{1,0} \quad (7-16)$$

mit:

$L_l$  bzw.  $L_k$  zeitliche Länge [h] der Route  $l$  bzw.  $k$

$L_{lk}$  zeitliche Länge [h] des Routenabschnitts, der Route  $l$  und  $k$  gemein ist

## 7.5.2 Generierung des historischen Erfahrungsschatzes

### 7.5.2.1 Modellansatz

Es wird angenommen, dass die nicht navigierten Verkehrsteilnehmer keineswegs unwissend sind, sondern ihre Route entsprechend ihres historischen Erfahrungsschatzes wählen. Dies bedeutet, dass von ortskundigen Fahrern ausgegangen wird, die, da sie das Netz bereits wiederholt befahren haben, die einzelnen Strecken bewertet und mit entsprechendem Nutzen/ Kosten assoziiert haben. Ein Fahrer „weiß“ beispielsweise (da er es bereits mehrmals erlebt hat), dass morgens im Berufsverkehr zwischen 8:00 Uhr und 8:30 Uhr auf einem bestimmten Streckenabschnitt „immer“ ein Stau auftritt und wählt daher eine andere Route. Will er die gleiche Verkehrsbeziehung aber zwischen 11:00 Uhr und 12:00 Uhr zurücklegen, fährt er seine eigentlich angedachte Route, da er zu dieser Zeit „noch nie“ einen Stau erlebt hat. Eine gänzlich richtige Einschätzung würde aber voraussetzen, dass der Verkehrsteilnehmer vollständige Kenntnis über den gesamten Netzzustand hat. Da er die Bewertung und darauf seine Routenentscheidung subjektiv und aufgrund begrenzter Belastungskennntnis trifft, kommt es auch zu Fehleinschätzungen und daher zu einer unterschiedlichen Verhaltensverteilung der einzelnen Verkehrsteilnehmer.

Die nicht navigierten Fahrer weisen somit eine Art vorausschauendes Handeln auf, da die an einem bestimmten Tag zu einer bestimmten Uhrzeit erfahrenen Routenkosten als eine sinnvolle Abschätzung für die Widerstände eines Folgetages dienen können. Dies setzt allerdings einen stabilen Zustand voraus (das Verhalten an einem Tag ist dem an einem anderen ähnlich = ein „typischer“ Tag). Die nicht navigierten Verkehrsteilnehmer treffen also ihre Routenentscheidung vor Fahrtantritt, indem sie das Netz für den Verlauf ihrer Fahrt bewerten (= Prognose auf Basis des subjektiven historischen Erfahrungsschatzes) und weichen, einmal in das System eingespeist, nicht mehr von ihrer beabsichtigten Wegewahl ab. Dies hat zur Folge, dass die nicht dynamisch navigierten Verkehrsteilnehmer bezüglich alltäglicher Verkehrssituationen relativ gut, da vorausschauend, agieren, bei unvorhergesehenen Störungen aber nicht flexibel handeln.

Treten nämlich nicht alltägliche Ereignisse auf, sind sie nicht in der Lage, zügig auf die veränderten Bedingungen zu reagieren. Weicht der aktuelle Verkehrszustand zu Reisezeitbeginn aber stark von dem typischen ab, werden, insbesondere wenn die Entfernung zwischen der Quelle und dem Ziel größer ist, auch die nicht navigierten Fahrer – allerdings erst mit zeitlicher Verzögerung - reagieren und einen anderen Weg wählen.

In der Simulation wird dieses Verhalten dadurch abgebildet, dass die Routenkosten *NHPC* (New Historical Path Costs) aus einer Kombination aus historischen und aktuellen Kosten bestimmt werden:

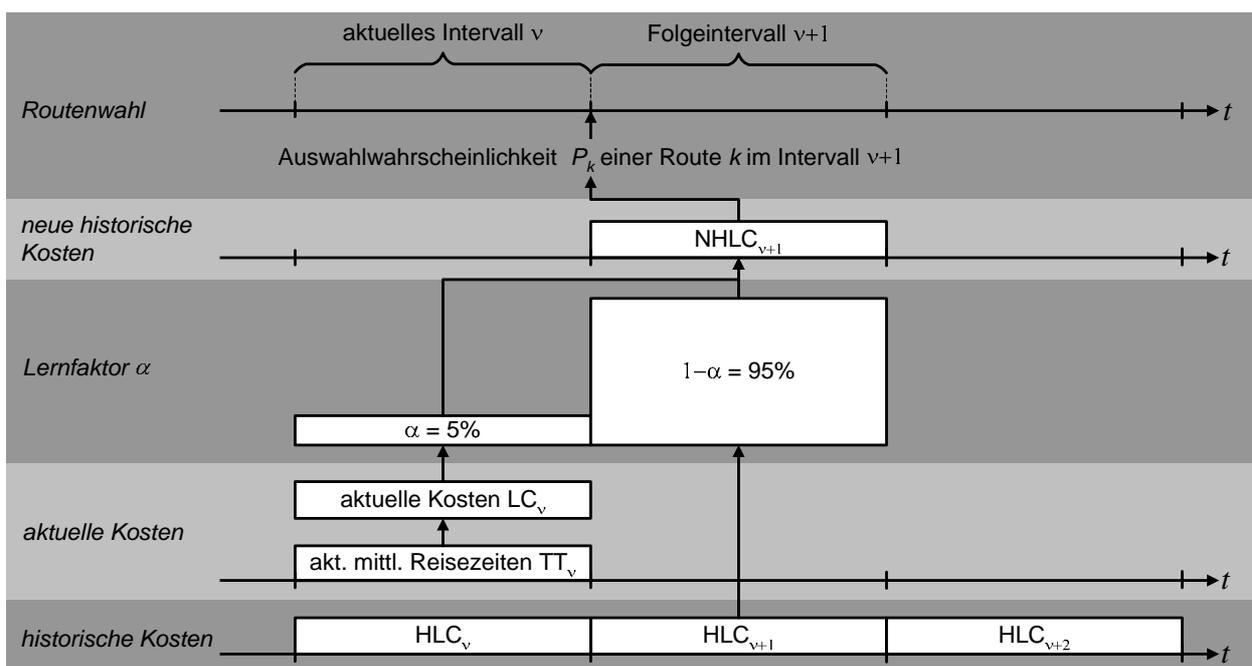
$$NHPC_{k,VT,v+1} = (1-\alpha) \cdot HPC_{k,VT,v+1} + \alpha \cdot PC_{k,VT,v} \quad [s] \quad (7-17)$$

mit:

- $NHPC_{k,VT,v+1}$  neue Kosten der Route  $k$ , basierend auf historischen und aktuellen Kosten, im Folgeintervall  $v+1$  für Fahrzeugtyp  $VT$
- $HPC_{k,VT,v+1}$  historische/ „typische“ Kosten der Route  $k$  im Folgeintervall  $v+1$  für Fahrzeugtyp  $VT$
- $PC_{k,VT,v}$  aktuelle Kosten der Route  $k$  im Intervall  $v$  für Fahrzeugtyp  $VT$ , bestimmt durch Summierung der einzelnen Linkkosten, bestimmt nach Gleichung ( 7-11 ) oder ( 7-13 ) bzw. ( 7-14 ), entlang der Route
- $\alpha$  Lernfaktor, der bestimmt, wie hoch der Einfluss der aktuell erfahrenen Kosten gegenüber den historischen ist.

Da die nicht navigierten Verkehrsteilnehmer gerade im Berufsverkehr in ihrem Routensatz und in ihrer Routenwahl ein stark habituelles Handeln aufweisen (siehe Kapitel 7.4.1 und 7.4.2), wird für die Studie, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wird, ein Lernfaktor von  $\alpha = 0,05$  angenommen.

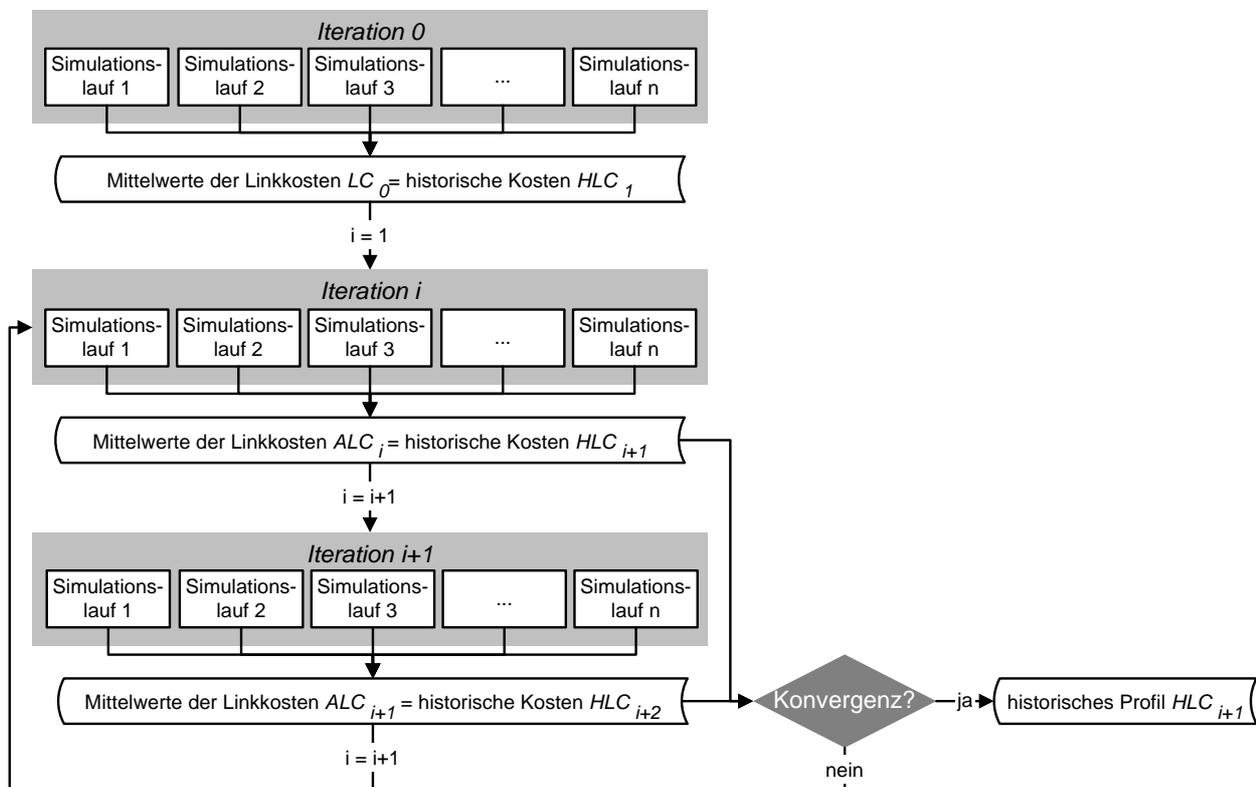
Das Intervall  $v$ , in dem jeweils eine neue Routensuche angestoßen wird, wird bei den Simulationen der vorliegenden Arbeit zu einer halben Stunde gewählt. Dabei liegt die Annahme zu Grunde, dass die nicht navigierten Verkehrsteilnehmer zwar Erfahrungen über die zeitliche Veränderung des Verkehrsgeschehens gerade auch im Berufsverkehr haben, die zeitliche Differenzierung aber nur so fein ist, wie ihre Fahrzeit zu dieser Uhrzeit ist. Da die Studie sich auf ein städtisches Gebiet bezieht, in dem sich die Fahrzeuge im Mittel etwa ein halbe Stunde von ihrer Quelle bis zu ihrem Ziel befinden, wird davon ausgegangen, dass dies die Größenordnung ist, in der eine Bewertung der Netzzustands und daher eine neue Routenwahl stattfindet.



**Bild 7.20:** Schema der Routenwahl der nicht navigierten Verkehrsteilnehmer

Die Sammlung von historischem Wissen über den Verkehrszustand wird durch iteriertes Simulieren erzeugt. Ein Simulationslauf entspricht somit einem beliebigen Tag. Die Zufälligkeit der Verhaltensweisen an diesem Tag wird in der Simulation dadurch wiedergegeben, dass alle zufallsgesteuerten Prozesse mit Hilfe einer Startzufallszahl angestoßen werden. Würde man nun mehrere Simulationsläufe mit derselben Startzufallszahl durchführen, erhielte man den Zustand eines speziellen Tages. Da aber das historische Profil eines durchschnittlichen Tages bestimmt werden soll, sind bei der Iteration mehrere Simulationsläufe mit jeweils unterschiedlichen Startzufallszahlen anzuschließen. Die mittleren aktuellen Linkkosten  $ALC$  (Actual Link Costs) für das Intervall  $\nu$ , bestimmt über die einzelnen Simulationsläufe der Iteration  $i$ , werden im Folgenden als historische Linkkosten  $HLC$  des Intervalls  $\nu$  für die Simulationsläufe der Iteration  $i+1$  verwendet.

Der zur Erzeugung der historischen Basis notwendige Iterationsprozess ist demnach darauf ausgerichtet, eine Konvergenz zwischen den Verkehrsverhältnissen der neuen Simulation und denen, die als historische Basis in diese eingehen, zu erreichen. Dies bedeutet, dass eine bestimmte Anzahl an Iterationsläufen durchgeführt werden muss, bis sich der globale Unterschied zwischen den für das jeweilige Intervall  $\nu$  als Eingangswerte verwendeten Linkkosten  $HLC$  (Historical Link Costs) und den Linkkosten  $ALC$ , die sich in der aktuellen Simulation ergeben, stabilisiert hat und unterhalb eines Grenzwerts liegt. Da durch die unterschiedlichen Simulationsläufe die Stochastizität abgebildet wird, wird sich keine Konvergenz zu Null ergeben, sondern um einen Wert einschwingen, der die Variabilität des Verkehrszustands an unterschiedlichen Tagen ausdrückt. Die historischen Linkkosten der stabilisierten Simulation repräsentieren dann das historische Profil.



**Bild 7.21:** Iterationsprozess zur Erzeugung des historischen Profils

Das verwendete Konvergenzkriterium lässt sich folgendermaßen ausdrücken:

$$\Delta(LC_{a,VT,v}^{i-1}, LC_{a,VT,v}^i) \sim \Delta(LC_{a,VT,v}^i, LC_{a,VT,v}^{i+1}) \quad [s] \quad \text{und} \quad (7-18)$$

$$\Delta(LC_{a,VT,v}^i, LC_{a,VT,v}^{i+1}) < \varepsilon$$

mit:

$LC_{a,VT,v}$  Kosten auf Link  $a$  für Fahrzeugtyp  $VT$  im Intervall  $v$  der Iteration  $i$   
 $\varepsilon$  Grenzwert,

wobei der Unterschied anhand der Wurzel aus dem mittleren Fehlerquadrat bestimmt wird:

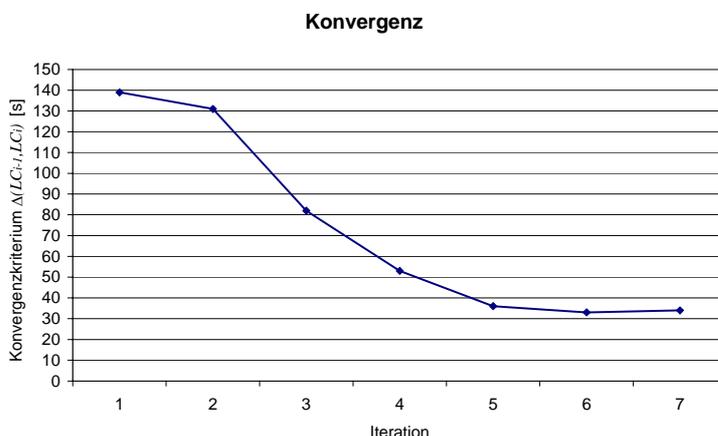
$$\Delta(LC_{a,VT,v}^{i-1}, LC_{a,VT,v}^i) = \sqrt{\frac{\sum_{a=1}^A \sum_{v=1}^N (LC_{a,VT,v}^{i-1} - LC_{a,VT,v}^i)^2}{A \cdot N}} \quad [s] \quad (7-19)$$

mit:

$a$  Link  $a$  aus der Gesamtanzahl aller Links  $A$   
 $v$  Intervall  $v$  aus der Gesamtanzahl an Intervallen  $N$  im gesamten Simulationszeitraum.

Bei der vorliegenden Simulationsstudie des Hauptstraßennetzes von Hannover wurden je Iteration fünf Simulationsläufe mit unterschiedlichen Startzufallszahlen durchgeführt. Die Bestimmung der erforderlichen Anzahl an Simulationsläufen, um mit einer bestimmten Genauigkeit Aussagen treffen zu können, enthält Anhang B.2.

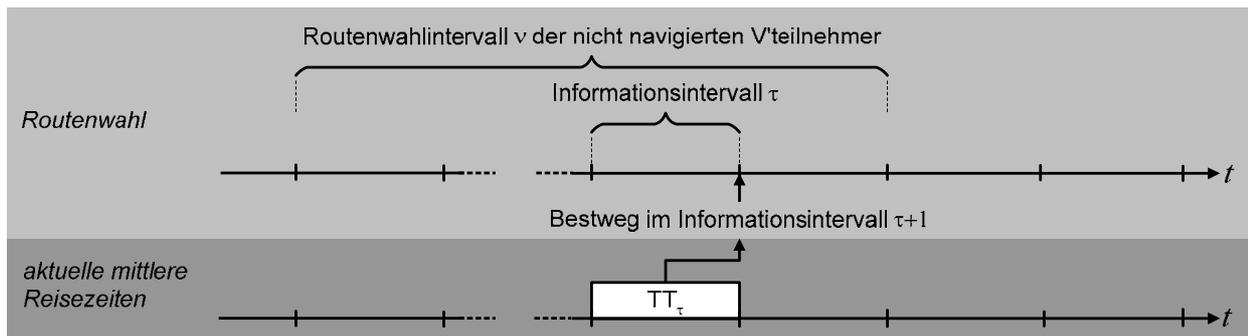
Die Erzeugung des historischen Wissens durch iteratives Simulieren wurde anhand eines Konvergenztests über die Mittelwerte zweier aufeinander folgender Iterationen durchgeführt, wobei als zu unterschreitender Grenzwert  $\varepsilon = 60$  [s] gewählt wurde. Eine Darstellung des in der Untersuchung erzielten Stabilisationsprozesses über die 40 Simulationsläufe bzw. die sieben Mittelwerte enthält Bild 7.22. Auf eine größere Anzahl von Simulationsläufen je Iteration, die die statistische Absicherung erhöht hätte, wurde aufgrund der hohen Rechenzeitanforderungen verzichtet. Entsprechendes gilt auch für die Länge des Konvergenztests, so dass nicht abschließend abgesichert werden kann, ob bereits ein stabiles Minimum erreicht worden ist. Die Güte der erzielten Konvergenz wurde aber für die zu untersuchende Fragestellung als ausreichend erachtet.



**Bild 7.22:** Iterationsprozess der Simulationsstudie am Untersuchungsnetz Hannover

Die navigierten Verkehrsteilnehmer werden in bestimmten Informationsintervallen  $\tau$  mit neuen Daten über den aktuellen Verkehrszustand versorgt. Die Routenwahl erfolgt auf Basis der Informationen des letzten Aktualisierungsintervalls, das entsprechend der vorhandenen Informationsqualität unterschiedlich groß sein kann (5 min bis zu 30 min, siehe Kapitel 7.4.2.2). Die navigierten Verkehrsteilnehmer verfügen somit über genaue Informationen im gesamten Netz und wählen darauf den Bestweg. Dieser ist der reisezeitgünstigste Weg, da in die Kostenberechnung als Größe nur die mittleren Reisezeiten eingehen (siehe Kapitel 7.4.2.2). Es wird davon ausgegangen, dass alle navigierten Verkehrsteilnehmer vollständiges Vertrauen in die Informationsgabe und Routenauswahl haben, so dass ein Befolgungsgrad von 100 % angenommen wird.

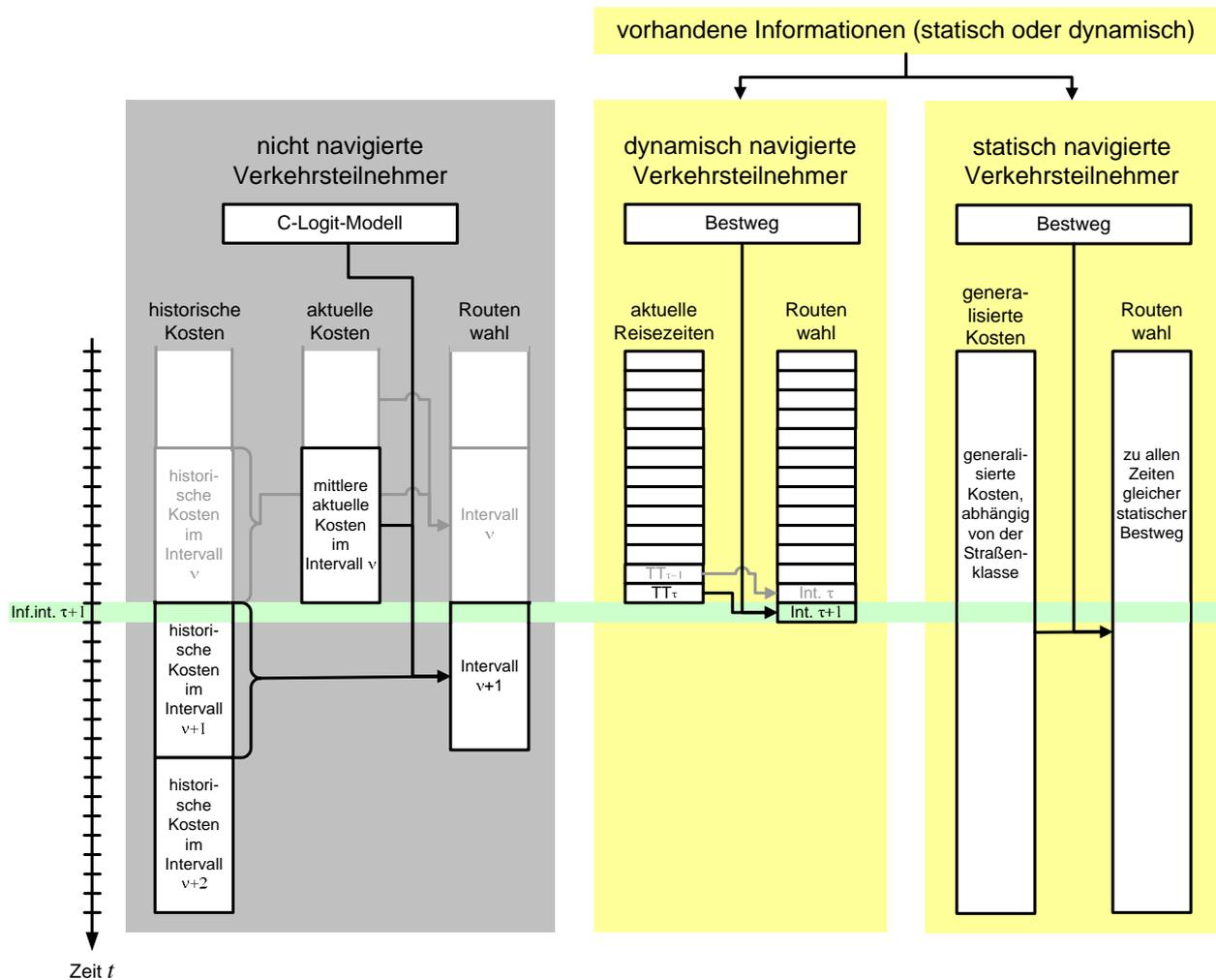
Da den navigierten Fahrern der aktuelle Zustand (= rückblickend auf das vergangene Aktualisierungsintervall) bekannt ist, ändern sie auch noch während ihrer Fahrt ihre zunächst gewählte Route, wenn ein anderer Weg eine günstigere Alternative darstellt (= Re-Routing). Sie besitzen also die Fähigkeit, auch auf unvorhergesehene Ereignisse zu reagieren, allerdings in Abhängigkeit des Aktualisierungsintervalls unterschiedlich schnell. Da sich der Nutzen einer Route mit der Verkehrsbelastung und den Störungen ändert, spielt der Zeitschritt, in dem jeweils neue Informationen gegeben werden, eine entscheidende Rolle.



**Bild 7.23:** Schema der Routenwahl der navigierten Verkehrsteilnehmer

Einen Sonderfall stellen die statisch navigierten Verkehrsteilnehmer dar. Ihnen werden Informationen über das gesamte Netz zur Verfügung gestellt, so dass sie den reisezeitgünstigsten Weg wählen können. Allerdings sind diese Daten statisch, da sie sich aus der Weglänge zu den durchschnittlich fahrbaren Geschwindigkeiten, die entsprechend der Straßenklassen differenziert werden, bestimmen. Der statische Bestweg einer Relation ist also zu allen Zeiten gleich und unabhängig von Veränderungen im Verkehrsgeschehen.

Zur Verdeutlichung sind die modellierten Routenwahlabläufe der unterschiedlichen Verkehrsteilnehmergruppen in Bild 7.24 gegenübergestellt.



**Bild 7.24:** Routenwahl Ablauf der nicht navigierten und der dynamisch bzw. statisch navigierten Verkehrsteilnehmer

### 7.5.2.2 Anwendung des Modellansatzes auf einem Testnetz

Zur Verdeutlichung des Einflusses der unterschiedlichen Verhaltensweisen der navigierten und der nicht navigierten Verkehrsteilnehmer auf die Reisezeiten und den Verkehrszustand wird das bereits in Kapitel 7.5.1.1 (siehe Bild 7.15) verwendete Testnetz (Fall 1 - Grundzustand: alle Strecken gleiche Straßenklasse mit einer max. zulässigen Geschwindigkeit von 70 km/h) aufgegriffen und weitere Versuche daran durchgeführt. Auch hier besteht eine Nachfrage von 2000 Fz/h zwischen der Quelle und dem Ziel.

Die Modellierung der Widerstände wird entsprechend der Ansätze in Kapitel 7.4.2 vollzogen, so dass die Kosten der nicht navigierten Verkehrsteilnehmer nach Gleichung ( 7-11 ) für den Fahrzeugtyp Pkw bestimmt werden und die der Navigierten den mittleren gefahrenen Reisezeiten des letzten Intervalls entsprechen (siehe Gl. ( 7-13 )).

Zur Erzeugung des historischen Wissens der nicht navigierten Verkehrsteilnehmer werden zehn Simulationsläufe (C-Logit-Modell:  $\theta = 5$ ,  $\beta = 0,15$ ,  $\gamma = 1,0$ ) durchgeführt (Bestimmung der erforderlichen Anzahl an Simulationsläufen siehe Anhang B.1), deren Mittelwerte der Linkkosten als Eingangswert für die nächste Iteration dienen. Die Routenkosten werden nach Gleichung

( 7-17 ) aus der Kombination der historischen und der aktuellen Kosten bestimmt, wobei ein Lernfaktor von  $\alpha = 0,05$  gesetzt wird. Nach Generierung des historischen Wissens ergeben sich folgende Routenkosten bzw. stellt sich folgende Aufteilung der Nicht-Navigierten auf die drei Routen ein:

**Tab. 7.10: Routenkosten und Wahlwahrscheinlichkeiten der drei Routen, 100 % Nicht-Navigierte**

Route	I	II	III
Routenkosten [s]	279,0	276,6	271,1
Wahlwahrscheinlichkeit der Route [%]	32 %	34 %	34 %

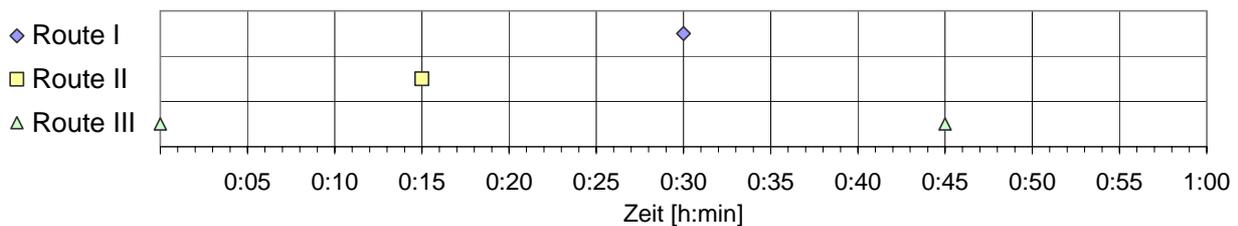
**Fall 1: keine Störung**

Die Navigierten werden auf den Weg mit der kürzesten Reisezeit gelenkt, der zu jedem Aktualisierungsintervall neu bestimmt wird. Für den Fall einer Aufteilung der 2000 Fz/h in 15 % navigierte und 85 % nicht navigierte Fahrzeuge und eines Informationsintervalls von 15 Minuten ergeben sich die in Tab. 7.11 dargestellten Routenkosten (= Kosten, auf deren Basis zu Beginn des Intervalls die Routenentscheidung getroffen wird) und Routenwahlwahrscheinlichkeiten der navigierten Verkehrsteilnehmer (siehe Tab. 7.11 und Bild 7.25).

Da Route III zu Beginn die - wenn auch nur geringfügig - günstigste Route darstellt, werden alle Navigierten im ersten Intervall entlang dieser geführt. Aufgrund der etwas höheren Belastung steigt die Reisezeit auf dieser Route leicht an und die Kostenberechnung nach Ende des ersten Intervalls als Eingangswert für die Routenwahl im Intervall 2 sieht nun Route II als den Bestweg an. Die Routenwahl strikt nach dem Prinzip des Bestwegs auch in Fällen, in denen die Alternativen sich nur marginal voneinander unterscheiden, bringt Unruhe in die Navigationsanweisung. Diese Vorgehensweise entspricht aber den üblichen heute auf dem Markt befindlichen Routing-systemen und wird daher in dieser Arbeit auch so abgebildet.

**Tab. 7.11: Kosten und Wahlwahrscheinlichkeiten der drei Routen der navigierten Fahrzeuge, Ausstattungsrate 15 %, Aktualisierungsintervall 15 min**

	Intervall	Route I	Route II	Route III
aktuelle Kosten Navigierte [s]	0 – 15 min	259,1	259,8	259,0
	15 – 30 min	259,7	258,4	261,2
	30 – 45 min	263,6	264,3	263,8
	45 – 60 min	261,1	262,0	260,7
Routenwahlwahrscheinlichkeit Navigierte [%]	0 – 15 min	0	0	100
	15 – 30 min	0	100	0
	30 – 45 min	100	0	0
	45 – 60 min	0	0	100



**Bild 7.25: Routenwahl der navigierten Fahrzeuge, Ausstattungsrate 15 %, Aktualisierungsintervall 15 min**

### Fall 2: Blockierung einer Kante

Das Aktualisierungsintervall prägt die Unvermitteltheit, entsprechend der die Navigierten auf Reisezeitänderungen im Netz reagieren. Dies ist vor allem dann von Einfluss, wenn Stauungen und Verkehrsbehinderungen auftreten. Im Folgenden wird auf dem Testnetz eine Störung in Mitte der Kante 6 von 0:20 Uhr – 0:35 Uhr generiert (siehe Bild 7.26), so dass an dieser Stelle eine vollständige Sperrung erfolgt. Die nicht navigierten Verkehrsteilnehmer wählen ihre Route entsprechend ihres historischen Erfahrungsschatzes und berücksichtigen nur zu 5 % (Lernfaktor  $\alpha = 0,05$ ) die aktuellen Bedingungen. Dies bewirkt, dass weiterhin zu fast gleichen Anteilen (siehe Tab. 7.10) alle drei Routen gewählt werden und ein Rückstau auf Kante 6 entsteht, der sich im Netz weiter fortpflanzt.

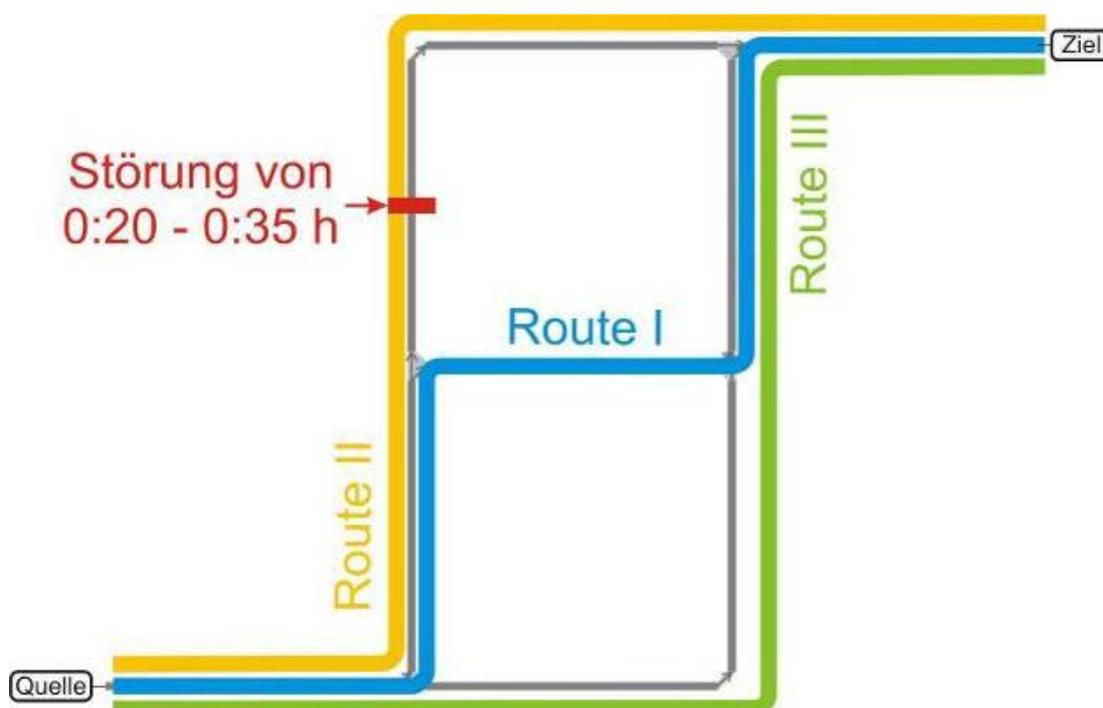
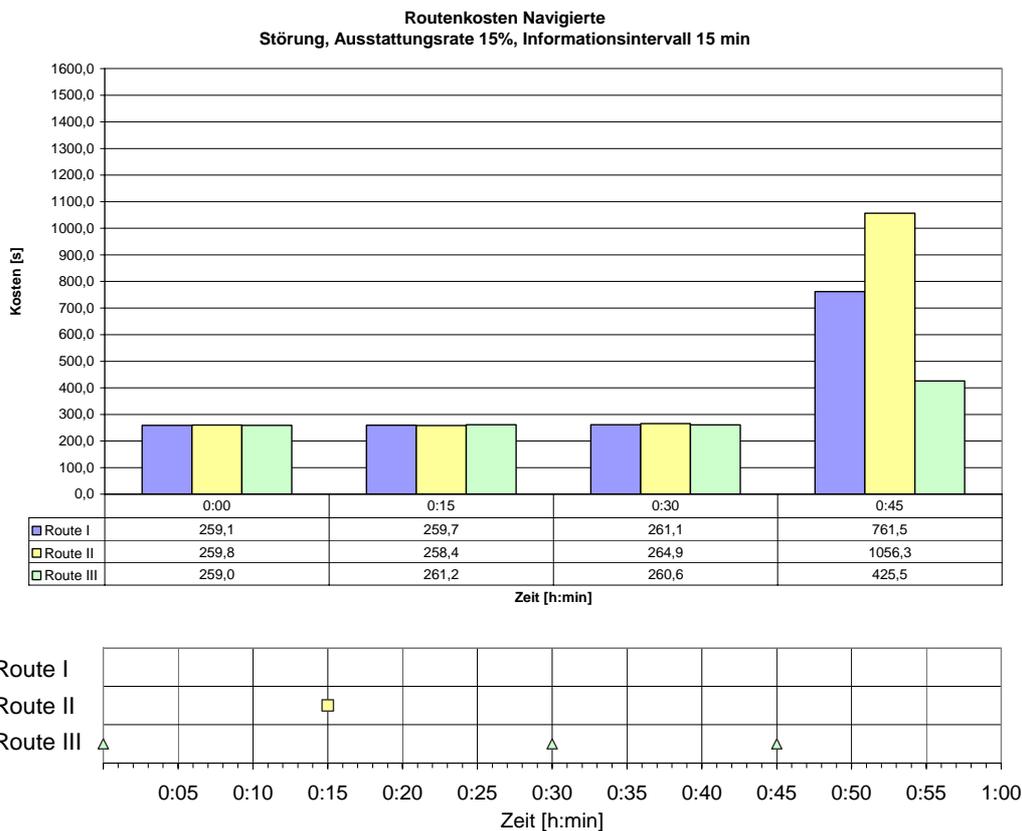


Bild 7.26: Lage der Störung im Testnetz

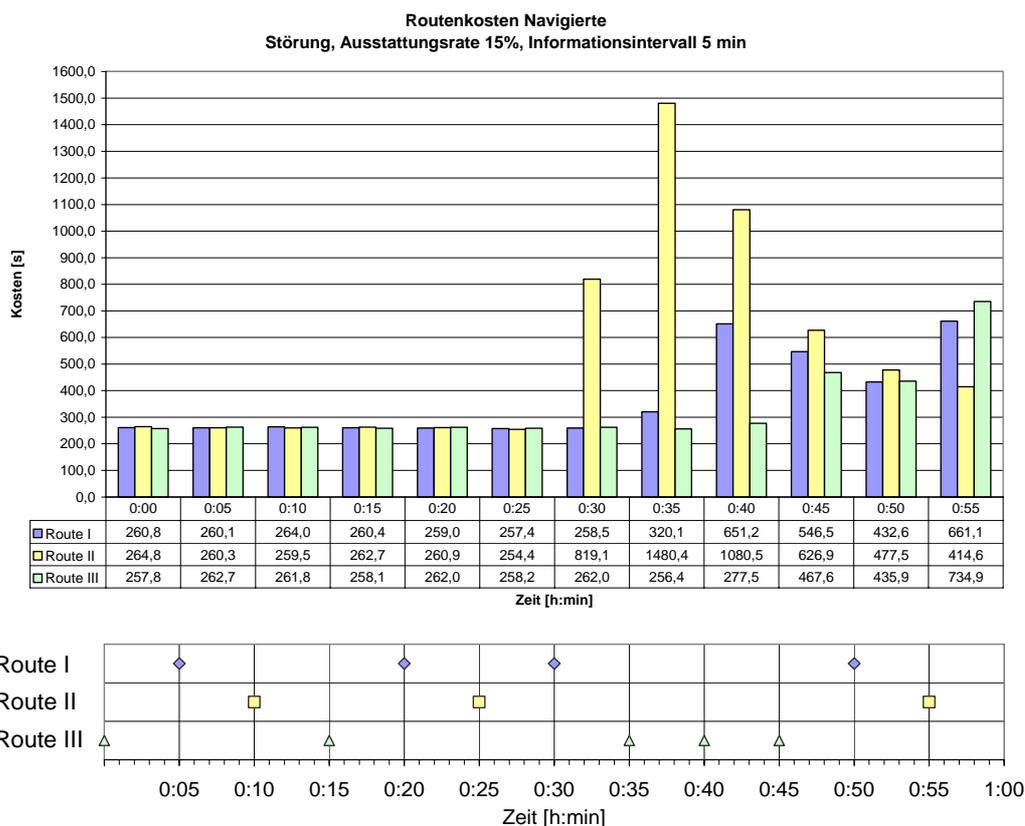
Im Falle einer Ausstattungsrate mit 15 % navigierten Fahrzeugen und einem Aktualisierungsintervall von 15 Minuten (siehe Tab. 7.11) trifft die Behinderung die Route, über die die Navigierten gerade geführt werden. Somit wirkt sich die Blockade für die Navigierten zunächst gravierender aus, da alle davon betroffen sind. Ein Umschwenken auf eine andere Route kann erst dann erfolgen, wenn nach Ablauf des Intervalls die gestiegenen Reisezeiten berücksichtigt werden. Je größer das Aktualisierungsintervall ist, desto länger dauert es nicht nur, bis ein Neurouten erfolgt und eine dementsprechend größere Anzahl von navigierten Fahrzeugen ist von der Blockade betroffen. Zudem verzögert sich die Erkennung des Störungsausmaßes, da die Linkkosten auf mittleren Reisezeiten basieren. Tritt eine Störung erst zur Mitte oder zu Ende eines Intervalls auf, wird ihr Ausmaß durch die Reisezeiten der zuvor unbehindert fahrenden Fahrzeuge vermindert und führt eventuell zu verspätet einsetzenden Umleitungen. Entsprechendes kann auch geschehen, wenn die Verkehrsbehinderungen bereits im Abklingen sind, aber zu Beginn des Intervalls noch massivere Störungen bestanden. Durch Nichtbeachten der Störungstendenz kann hier im nächsten Intervall eventuell ein Umschwenken der Route resultieren, wobei die vorherige bereits wieder ungehindert und nun eigentlich günstiger zu befahren

wäre. Verkürzt man das Aktualisierungsintervall, kann dieser Effekt reduziert werden. Ist es jedoch sehr klein, kann ein sehr häufiges Re-Routing der Fahrzeuge während ihrer Fahrt erfolgen (siehe Bild 7.29), das sich zum einen negativ auf die letztendlich erlebte Reisezeit auswirken kann und zum anderen den Komfort und das Vertrauen in ein Routingsystem verringert.

Die Veränderung der Routenkosten und die daraus resultierende Routenwahl der navigierten Verkehrsteilnehmer bei einer Ausstattungsrate von 15 % bedingt durch die unterschiedlich häufige Informierung in 15 Minuten-, 5 Minuten- oder 1 Minuten-Intervallen ist in Bild 7.27, Bild 7.28 und Bild 7.29 dargestellt. Zum Verständnis sei erläutert, dass der im Vergleich zum Auftreten der Störung erst zeitlich verzögert einsetzende Reisezeitanstieg durch die Auswertemethodik bedingt ist. Die einzelnen Fahrzeuge werden dann mit ihren statistischen Werten erfasst, wenn sie ihr Ziel erreichen. Dementsprechend werden die mittleren Reisezeiten aus den in dem betrachteten Intervall eintreffenden Fahrzeugen gebildet. Die stark von der Störung betroffenen Fahrzeuge stauen sich oder werden umgeleitet und treffen entsprechend verzögert ein.

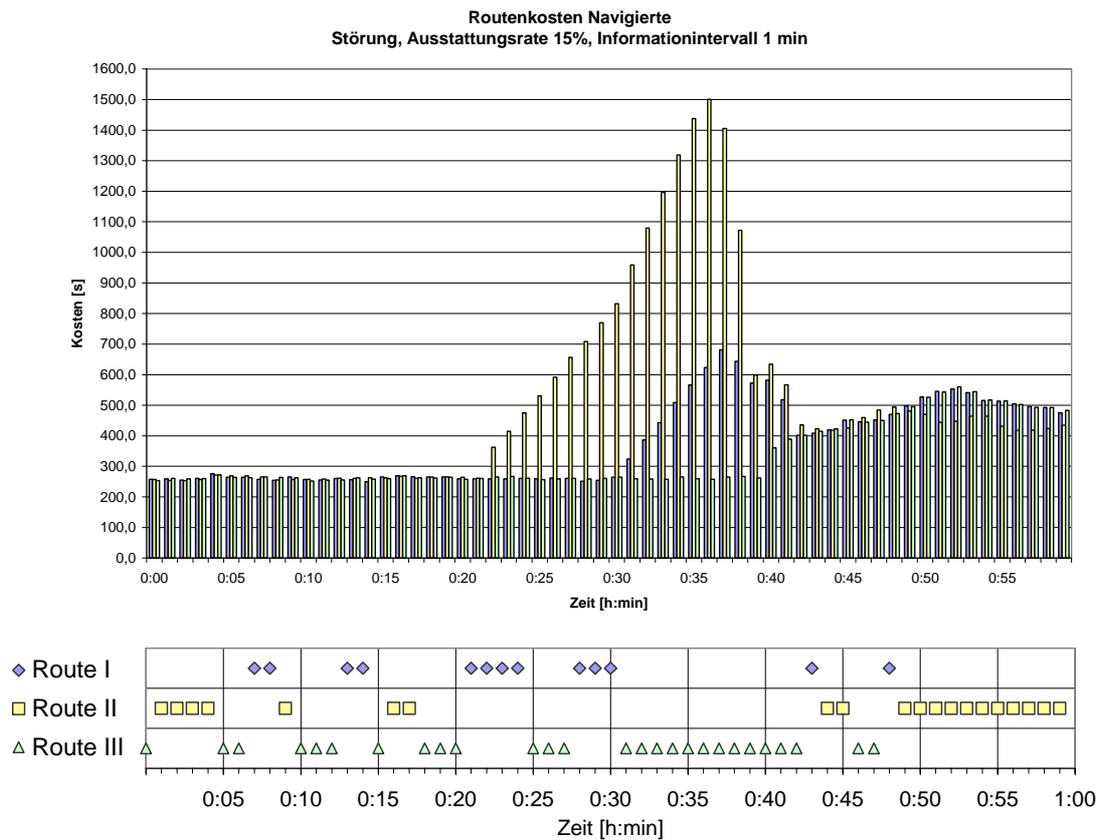


**Bild 7.27: Routenkosten und Routenwahl der navigierten Fahrzeuge, Störung von 0:20 - 0:35 h Ausstattungsrate 15 %, Aktualisierungsintervall 15 min**

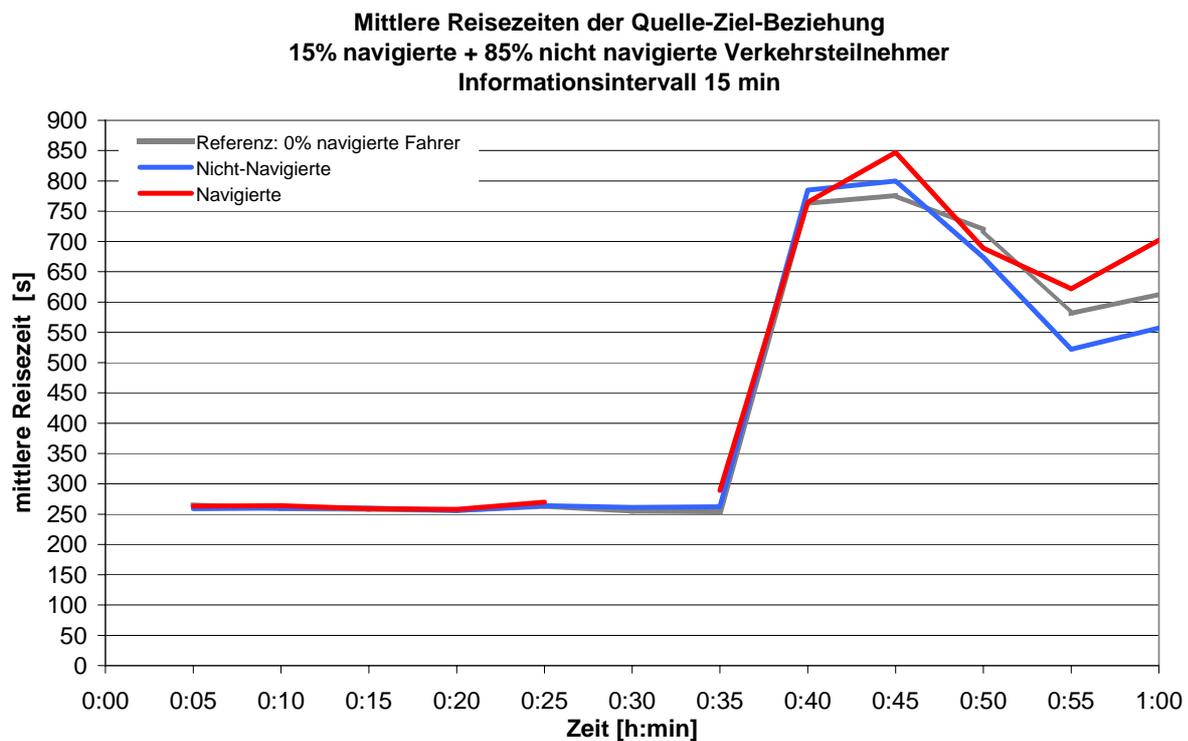


**Bild 7.28:** Routenkosten und Routenwahl der navigierten Fahrzeuge, Störung von 0:20 - 0:35 h Ausstattungsrate 15 %, Aktualisierungsintervall 5 min

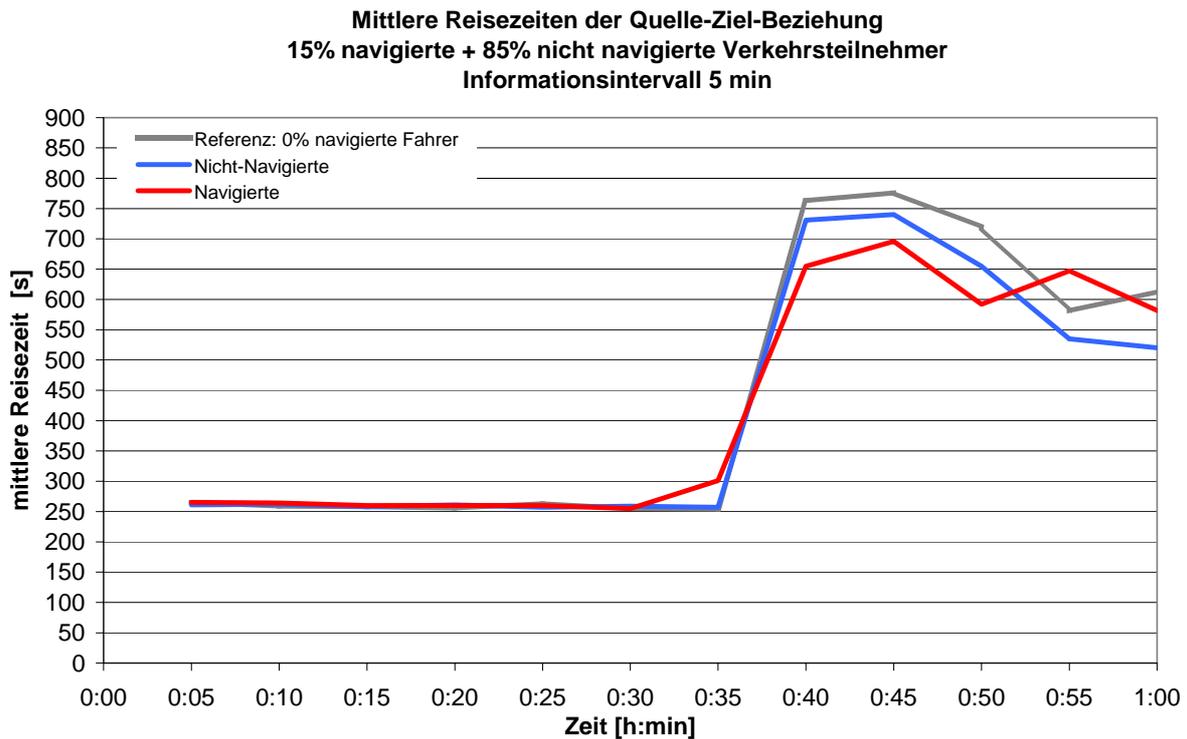
Der Einfluss des Aktualisierungsintervalls wird anhand des Vergleichs der jeweils über fünf Minuten gemittelten Reisezeiten deutlich (siehe Bild 7.30, Bild 7.31, Bild 7.32). Es ergibt sich ein Reisezeitanstieg, der für die navigierten Verkehrsteilnehmer bei Verwendung des 15 Minuten-Aktualisierungsintervalls höher ausfällt, als für die nicht navigierten. Sie liegen auch gegenüber dem Fall, dass kein Fahrzeug navigiert ist, höher. Dies begründet sich daraus, dass die Navigierten ausschließlich die gestörte Route II wählen und somit alle von der Blockade betroffen sind. Der Mittelwert der Reisezeit liegt also zunächst höher als bei den Nicht-Navigierten, die auch Route I und Route III befahren und dort weiterhin unbehindert vorankommen. Erst nach Ablauf des nächsten Aktualisierungsintervalls können die navigierten Fahrer reagieren und werden umgelenkt.



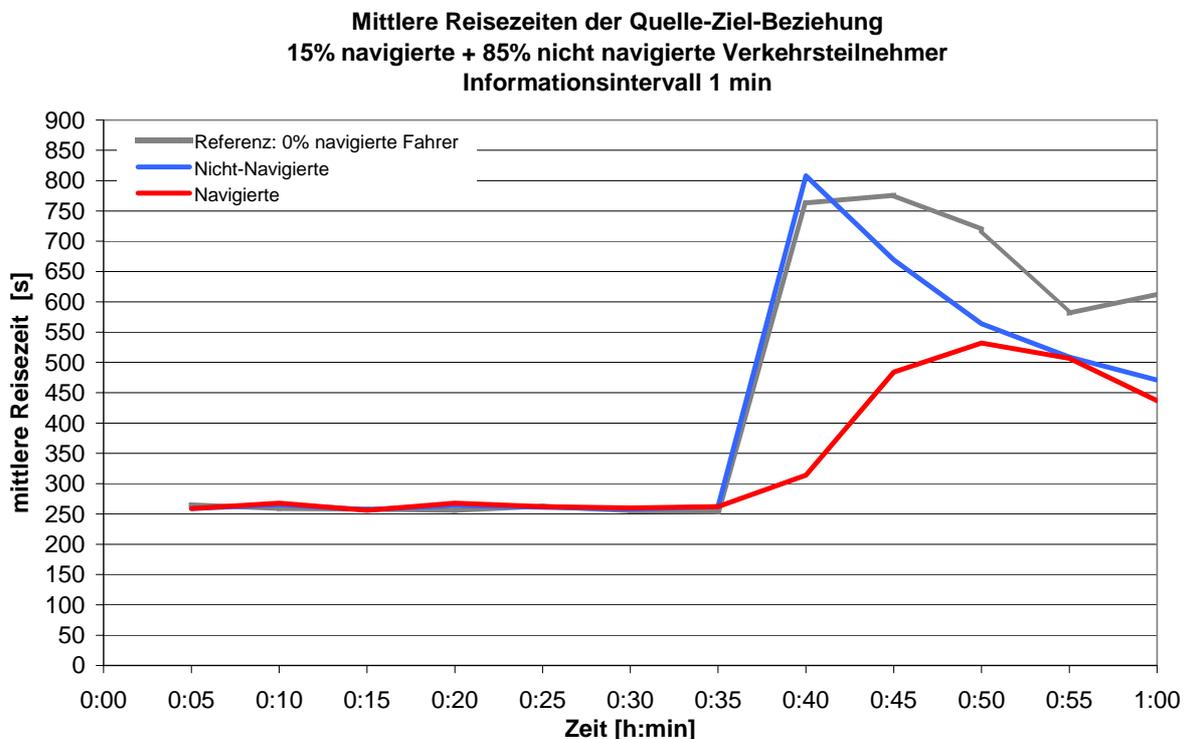
**Bild 7.29:** Routenkosten und Routenwahl der navigierten Fahrzeuge, Störung von 0:20 - 0:35 h Ausstattungsrate 15 %, Aktualisierungsintervall 1 min



**Bild 7.30:** Mittlere Reisezeiten der Quelle-Ziel-Beziehung, Störung von 0:20- 0:35 h Ausstattungsrate 15 %, Aktualisierungsintervall 15 min



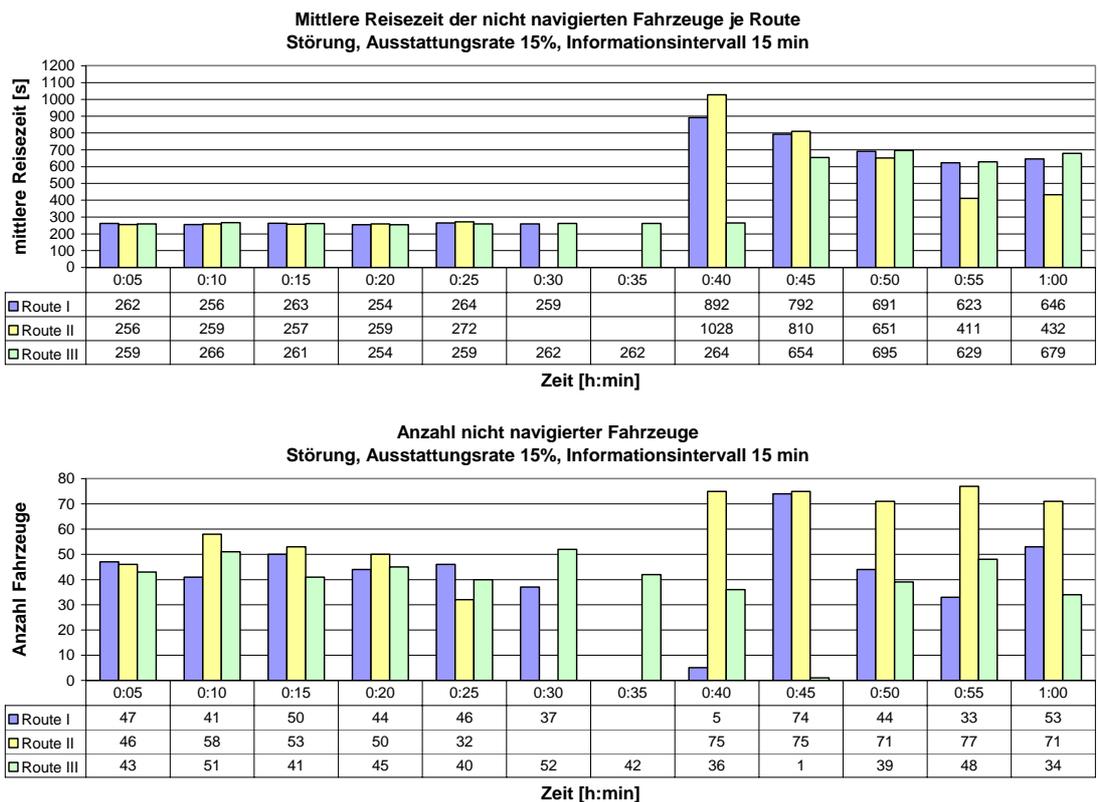
**Bild 7.31:** Abnahme der mittlere Reisezeiten der Navigierten der Quelle-Ziel-Beziehung durch Reduzierung des Aktualisierungsintervalls auf 5 min  
Störung von 0:20- 0:35 h, Ausstattungsrate 15 %



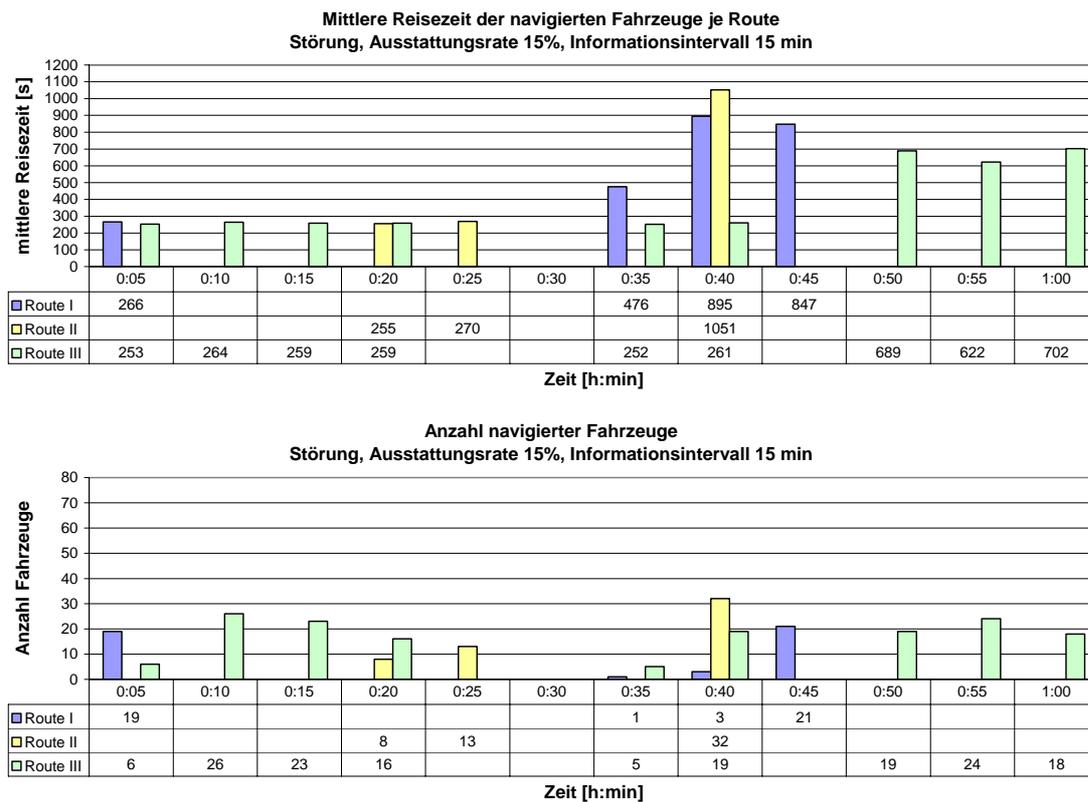
**Bild 7.32:** Deutliche Reduzierung der mittleren Reisezeiten der Navigierten durch zeitnahes Umleiten bei einem Informationsintervall von 1 min  
Störung von 0:20- 0:35 h, Ausstattungsrate 15 %

Das Fehlen einiger Werte und das zeitlich versetzte Ansteigen der Reisezeiten gegenüber dem Zeitpunkt der Störung ergibt sich auch hier, wie bereits zuvor schon zu Bild 7.27, Bild 7.28 und Bild 7.29 erwähnt, aus der Auswertemethodik, die die erfahrene Reisezeit eines Fahrzeugs in dem Intervall berücksichtigt, in dem das Ziel erreicht wurde. Wie in Bild 7.30 erkenntlich, erreicht zwischen 0:25 Uhr und 0:35 Uhr kein navigiertes Fahrzeug das Ziel, da die von ihnen befahrene Route II noch blockiert ist und sie noch nicht umgelenkt wurden. Nach Ende der Blockade im Intervall zwischen 0:30 Uhr und 0:35 Uhr werden die ersten der navigierten Fahrzeuge erfasst, die im Stau standen und umgeleitet wurden (entweder auf Route I, wenn bei Staubeginn bereits Kante 5, aber noch nicht Kante 6 befahren worden ist oder auf Route III, falls die Fahrzeuge etwas später gestartet sind; siehe Bild 7.34). Die navigierten Fahrzeug, die auf Route II im Stau standen, erreichen erst im Intervall zwischen 0:35 Uhr und 0:40 Uhr das Ziel, weshalb hier die Kurve der mittleren Reisezeit am stärksten ausschlägt.

Die entlang Route II gefahrenen und somit behinderten Nicht-Navigierten treffen ebenfalls erst im Intervall zwischen 0:35 Uhr und 0:40 Uhr im Ziel ein. Die bis zu diesem Zeitpunkt weiterhin niedrig bleibende mittlere Reisezeit resultiert aus den erlebten Fahrtzeiten der auf Route I und Route III gefahrenen Fahrzeuge.



**Bild 7.33: Mittlere Reisezeit und Anzahl der nicht navigierten Verkehrsteilnehmer**  
Störung, Ausstattungsrate 15 %, Aktualisierungsintervall 15 min

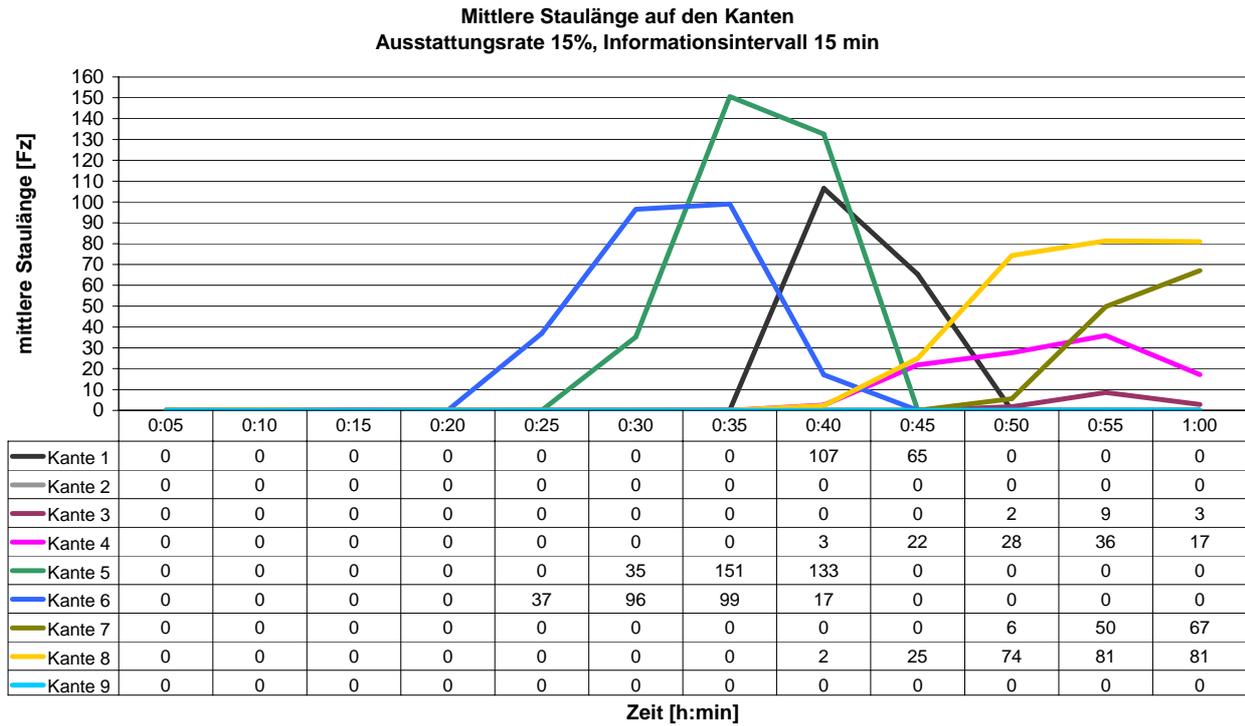


**Bild 7.34: Mittlere Reisezeit und Anzahl der navigierten Verkehrsteilnehmer**  
Störung, Ausstattungsrate 15 %, Aktualisierungsintervall 15 min

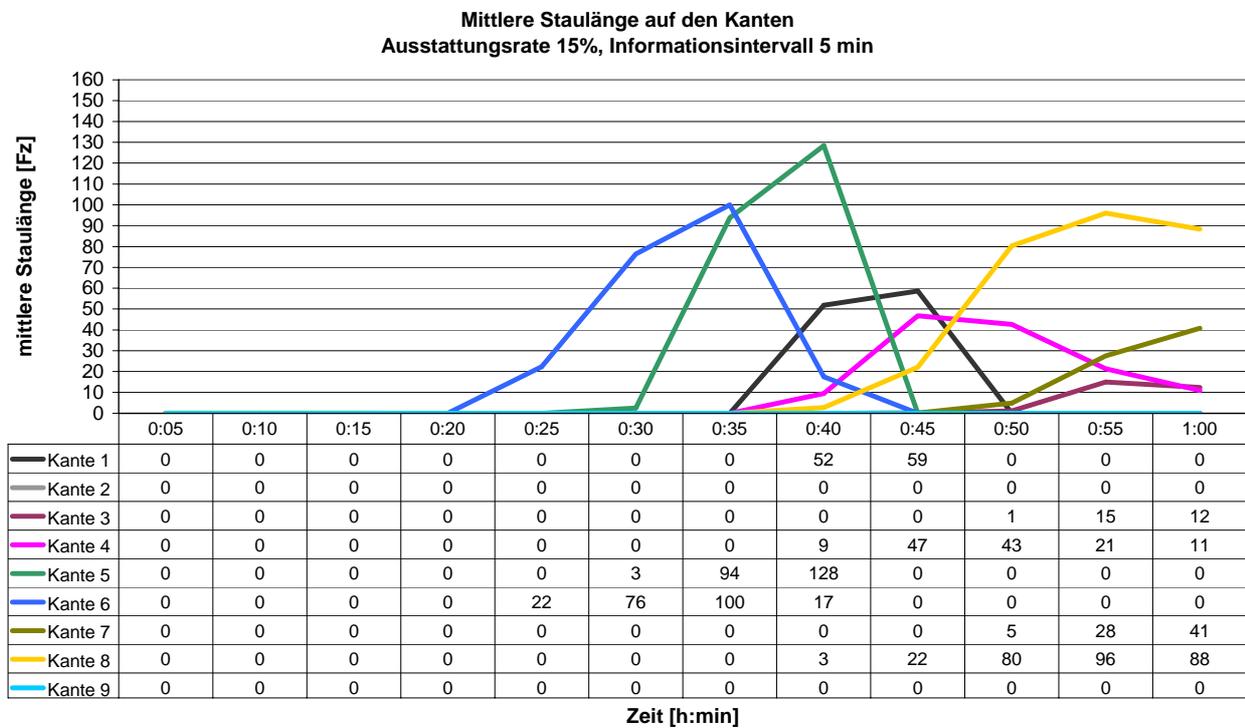
Verkürzt man das Aktualisierungsintervall, führt das frühzeitigere Reagieren dazu, dass die mittleren Reisezeiten sowohl für die navigierten wie für die nicht navigierten Verkehrsteilnehmer sinken, da der Rückstau im gesamten Netz reduziert werden kann. Eine Gegenüberstellung der deutlich abnehmenden Rückstaus auf den einzelnen Kanten im Netz mit Verringerung des Aktualisierungsintervalls enthalten Bild 7.35, Bild 7.36 und Bild 7.37. Der Reisezeitvorteil der Navigierten wird mit Verringerung des Informationsintervalls zunehmend deutlicher, da ein immer geringerer Teil von der Störung betroffen ist. Die mittlere Reisezeit der Nicht-Navigierten bleibt anfänglich genauso hoch, da der Rückstau sich aber langsamer aufbaut, werden die anderen Routen später und weniger heftig gestört (siehe Bild 7.30, Bild 7.31, Bild 7.32). Das gesamte Störungsausmaß kann somit verringert werden, was anhand der veränderten Gesamt-reisezeit im Netz ausgedrückt werden kann.

**Tab. 7.12: Gesamt-reisezeit [h] im Netz über den simulierten Zeitraum**

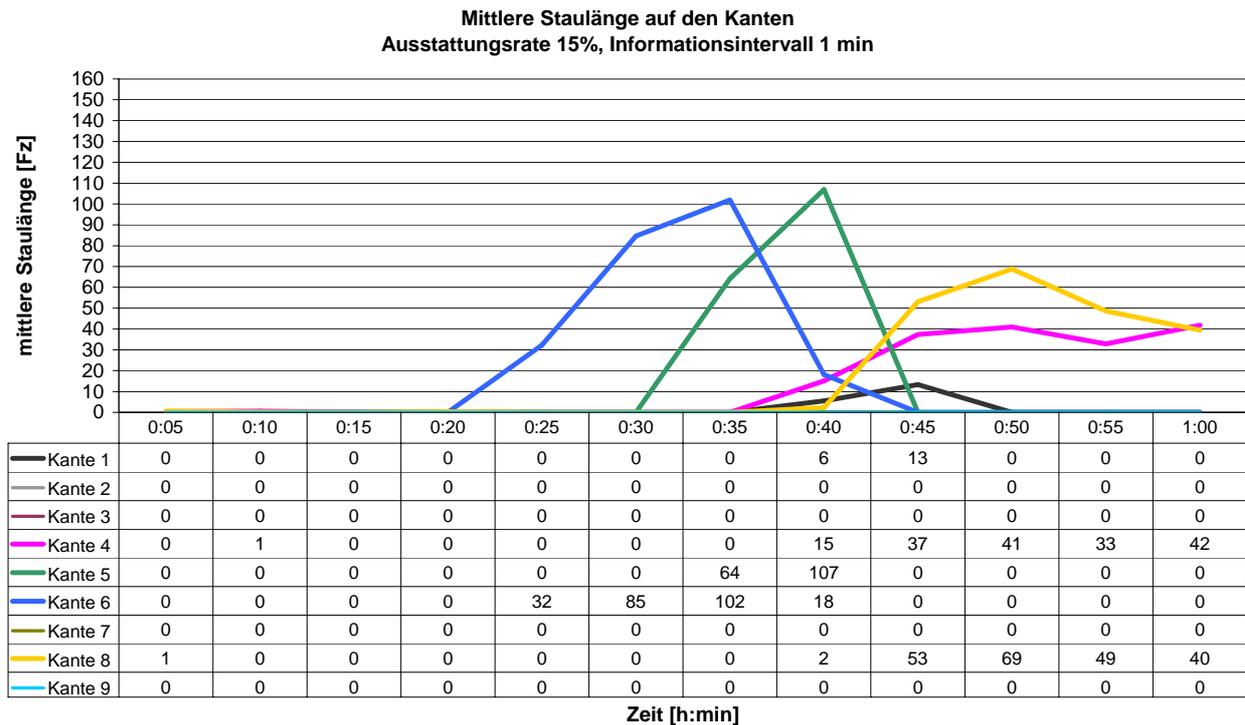
Informationsintervall	15 min	5 min	1 min
Gesamt-reisezeit [h]	230,3	217,1	213,1



**Bild 7.35: Mittlere Staulänge auf den Kanten, Störung von 0:20- 0:35 h**  
Ausstattungsrate 15 %, Informationsintervall 15 min



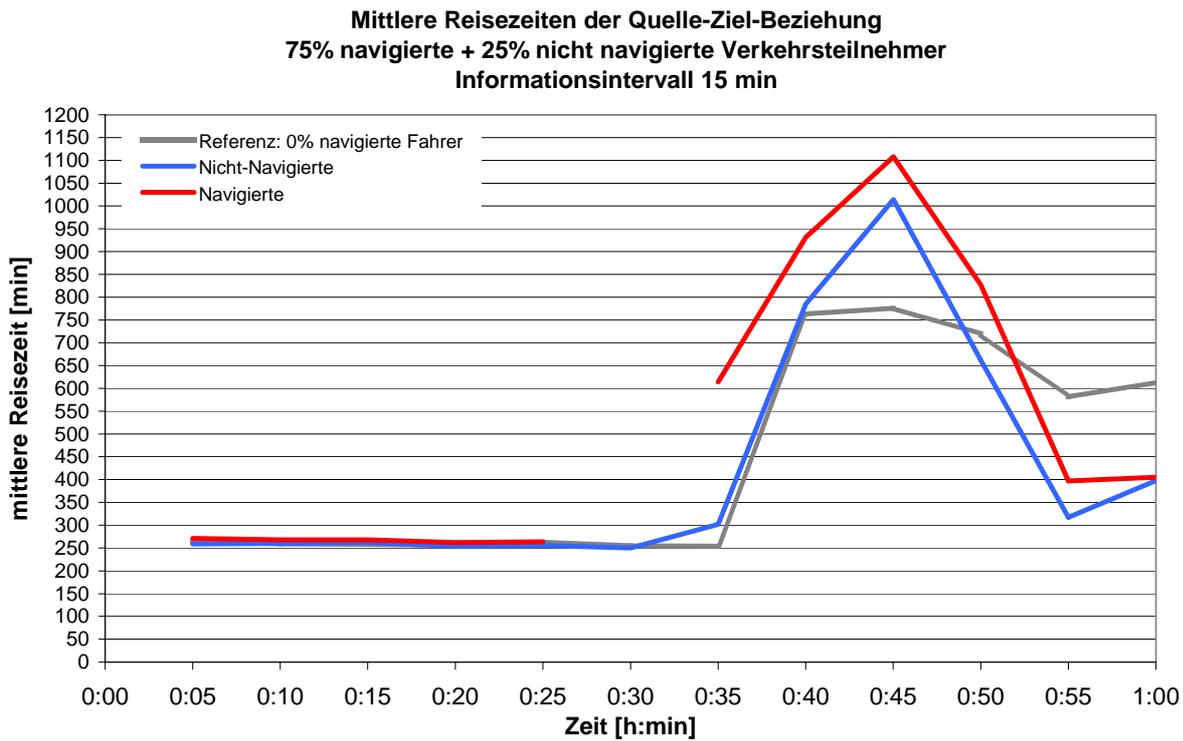
**Bild 7.36: Mittlere Staulänge auf den Kanten, Störung von 0:20- 0:35 h**  
Ausstattungsrate 15 %, Informationsintervall 5 min



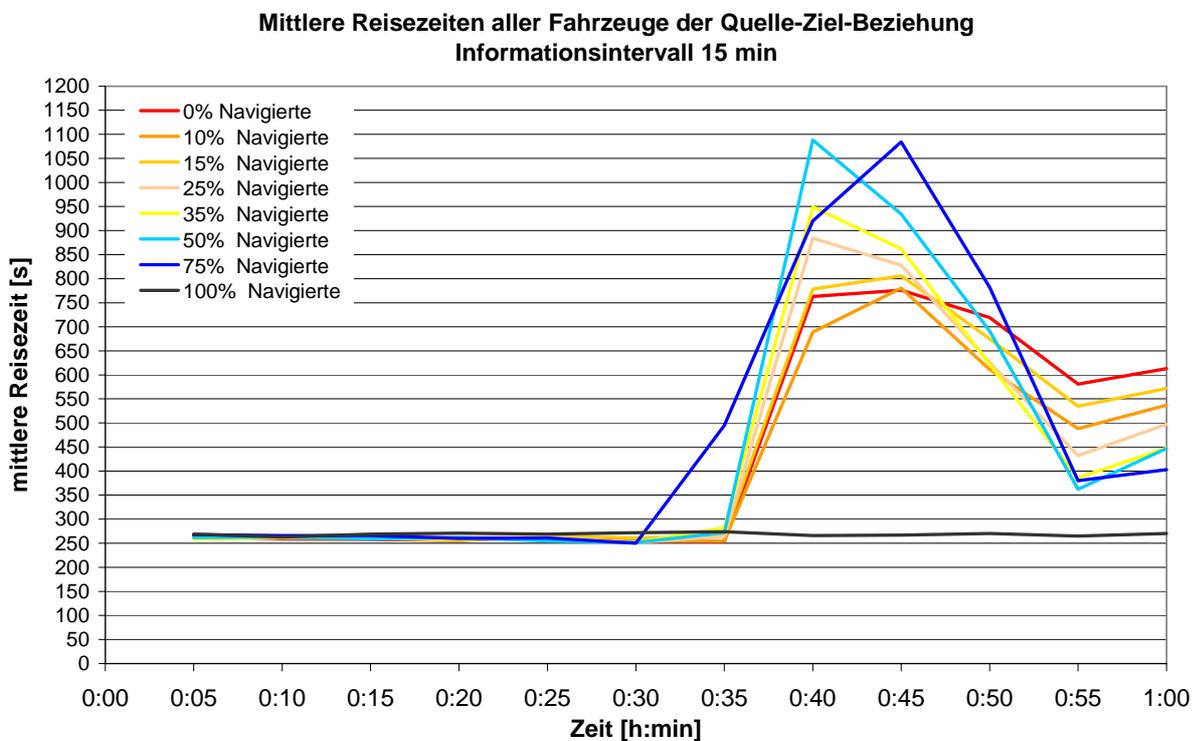
**Bild 7.37: Mittlere Staulänge auf den Kanten, Störung von 0:20 - 0:35 h**  
Ausstattungsrate 15 %, Informationsintervall 1 min

Neben dem Aktualisierungsintervall verändert der Anteil der navigierten Fahrzeuge das gesamte Verkehrsgeschehen, was nicht nur Auswirkungen für die navigierten, sondern auch für die nicht navigierten Verkehrsteilnehmer hat. Wie zuvor anhand der Ausstattungsrate von 15 % gezeigt, können vor allem bei einem großen Aktualisierungsintervall Reisezeitverschlechterungen gegenüber dem Referenzfall von 0 %-Penetrationsrate auftreten, wenn die Störung sich auf der Route ereignet, über die die Navigierten gerade geleitet werden. Mit steigender Ausstattungsrate findet eine immer stärkere Konzentration der Verkehrsnachfrage auf eine Route statt. Sind Strecken dieser Route nicht leistungsfähig genug, kommt es bereits im Normalfall zu stärkeren Behinderungen, was dazu führt, dass im nächsten Schritt alle Fahrzeuge auf eine andere Route umgelenkt werden, auf der wiederum Kapazitätsüberlastungen resultieren können. Eignet sich auf der aktuell angewiesenen Route zudem eine Störung, hat dies umso gravierendere Auswirkungen, wobei nach Störungsende auch schneller wieder normale Verkehrszustände erreicht werden (siehe Bild 7.38).

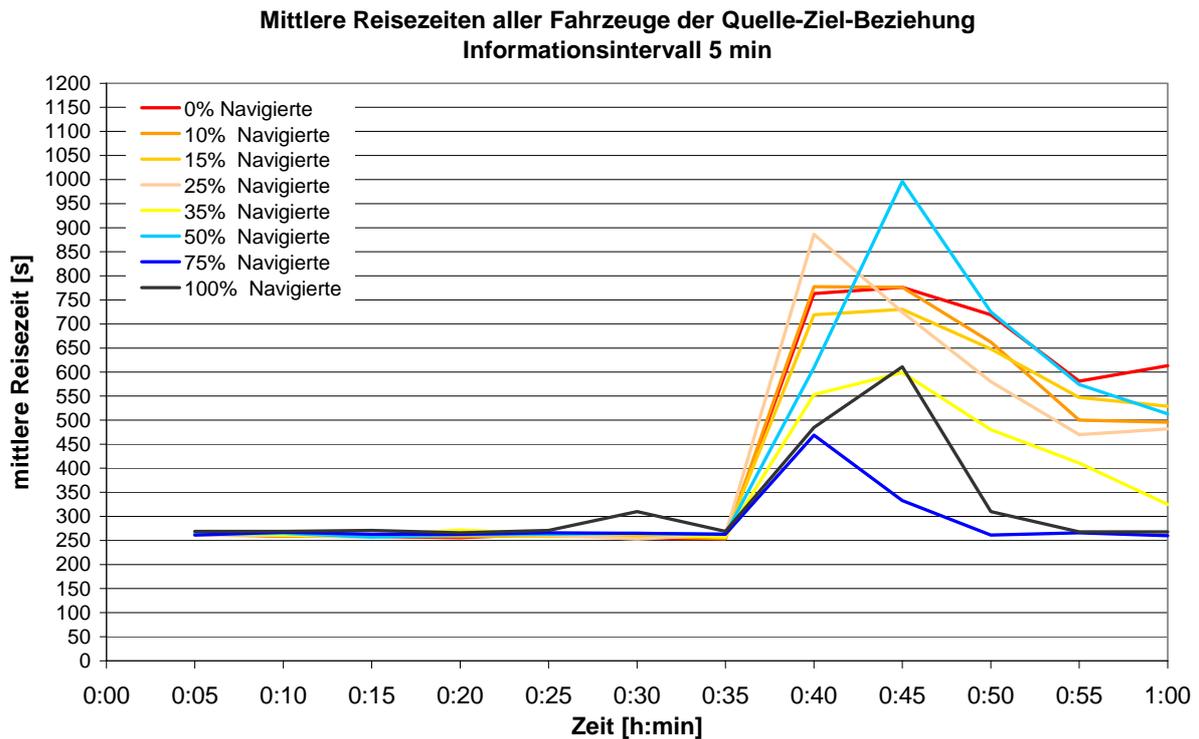
Die Veränderungen der mittleren Reisezeiten aller Fahrzeuge bei unterschiedlichen Ausstattungsraten bei einem Aktualisierungsintervall von 15 Minuten, 5 Minuten und 1 Minute ist in Bild 7.39, Bild 7.40 und Bild 7.41 dargestellt. Die ungestörten Reisezeiten im Falle der Vollausrüstung rühren daher, dass die Kapazität der Strecken selbst bei vollständiger Konzentration des gesamten Verkehrs noch nicht überschritten wird und die aktuelle Routenanweisung zum Zeitpunkt der Störung nicht über Route II führt, so dass kein Fahrzeug davon betroffen ist.



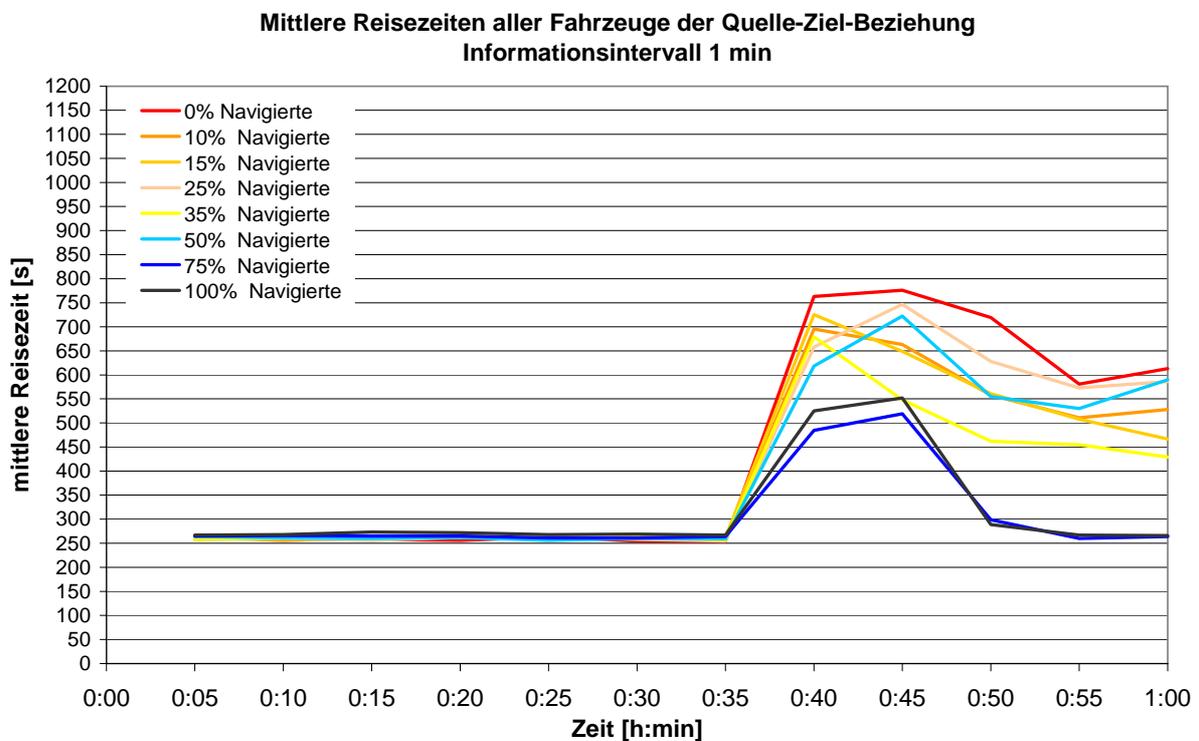
**Bild 7.38: Mittlere Reisezeiten der Quelle-Ziel-Beziehung, Störung von 0:20- 0:35 h  
Ausstattungsrate 75 %, Informationsintervall 15 min**



**Bild 7.39: Mittlere Reisezeiten aller Fahrzeuge, Störung von 0:20- 0:35 h  
unterschiedliche Ausstattungsraten, Informationsintervall 15 min**



**Bild 7.40:** Mittlere Reisezeiten aller Fahrzeuge, Störung von 0:20- 0:35 h unterschiedliche Ausstattungsraten, Informationsintervall 5 min



**Bild 7.41:** Mittlere Reisezeiten aller Fahrzeuge, Störung von 0:20- 0:35 h unterschiedliche Ausstattungsraten, Informationsintervall 1 min



## **8 Aufbau der Simulationsstudie**

### **8.1 Inhalt und Vorgehensweise**

Der Aufbau der Studie am Untersuchungsnetz von Hannover wird im Folgenden dargestellt, wobei die verwendeten Datengrundlagen hinsichtlich der Abgrenzung und Abbildung des Netzes und die hinterlegten Verkehrsnachfragedaten erläutert werden.

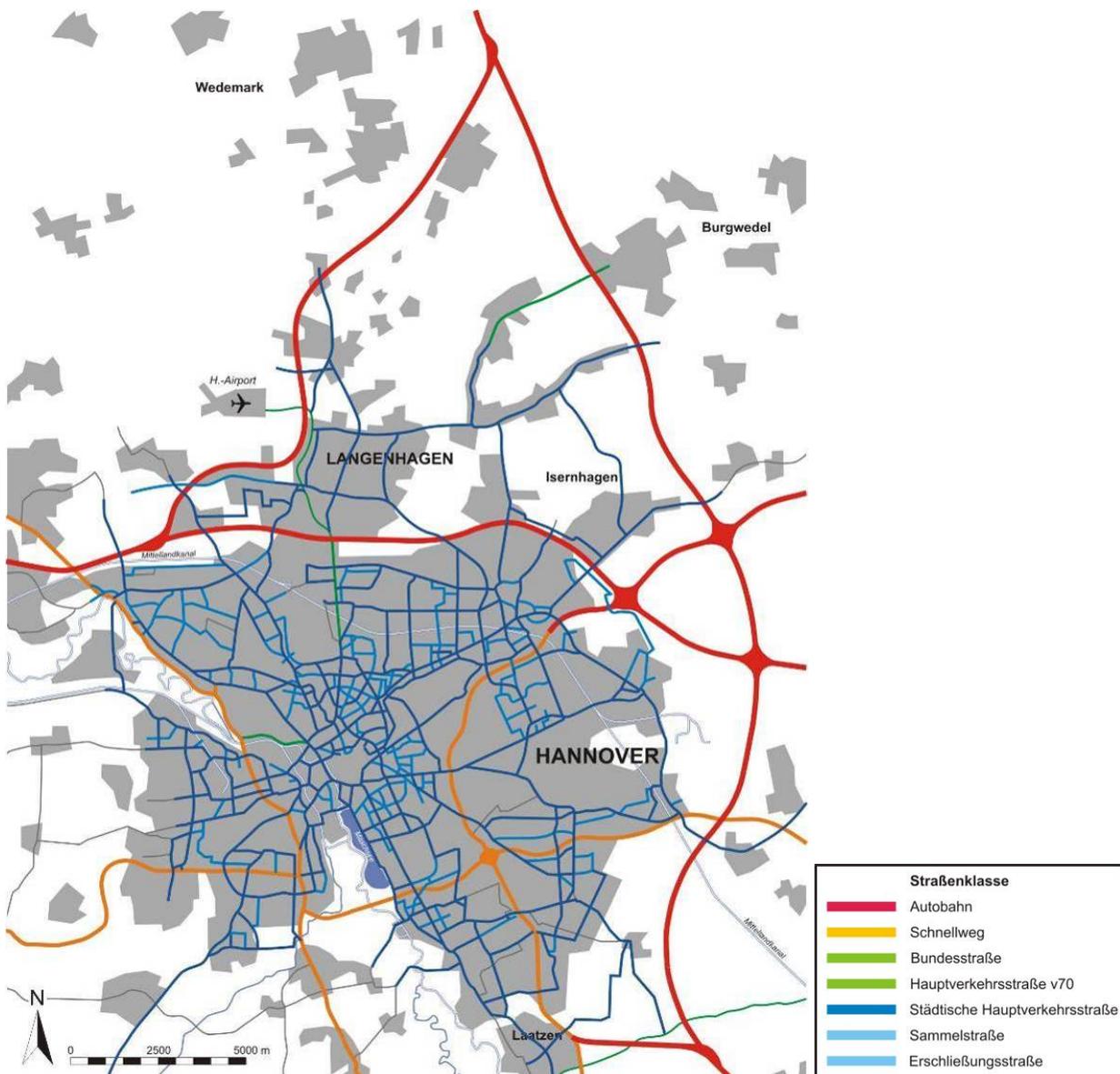
Der Kalibrierungsablauf wird bezüglich verwendeter Gütemaße und erreichter Übereinstimmungen beschrieben. Um die Anpassungsgüte der Simulation an die Realität überprüfen zu können, werden über das gesamte Netz verteilte reale Verkehrsstärkezahlungen herangezogen und mit den in der Simulation an gleicher Stelle erreichten Werten verglichen.

Um das Wirkungsspektrum von Informierung abzustecken, werden Szenarien entworfen, die neben der Variation der Aktualisierungsrate der Information und dem Anteil navigierter Verkehrsteilnehmer auch die Differenzierung in normale Verkehrsverhältnisse und unvorhergesehene Störfälle vornehmen.

### **8.2 Untersuchungsnetz Hannover**

#### **8.2.1 Abgrenzung und Abbildung des Untersuchungsgebiets**

Das Anliegen der vorliegenden Untersuchung beruht auf der Analyse der Auswirkungen von Verkehrsinformationen insbesondere im städtischen Verkehr. Um die Vermischung und den Übergangsbereich zwischen Fernverkehr und städtischem Verkehr in die Betrachtung einschließen zu können, sollte das Untersuchungsgebiet von der räumlichen Ausprägung wie von der Netzstruktur entsprechend geartet sein. Als Untersuchungsgebiet wurde Hannover (siehe Bild 8.1) gewählt, da es als Landeshauptstadt von Niedersachsen mit rund 515 000 Einwohnern die netzfunktionalen wie räumlichen Anforderungen hinsichtlich eines umgebenden Autobahn- und Schnellstraßennetzes mit überregionalen Verkehren gemischt mit regionalem Verkehr sowie eines gegliederten städtischen Netzes in der gewünschten Größenausprägung erfüllt. Die Intention war dabei nicht, hannoverspezifische Gegebenheiten zu untersuchen, sondern ein typisches städtisches Netz zur Verfügung zu haben, auf dessen Basis den unterschiedlichsten Fragestellungen nachgegangen werden kann. Die gezogenen Aussagen sind auch nicht explizit auf untersuchte Stellen in Hannover ausgerichtet, sondern allgemein auf Netze und Verkehrsgegebenheiten entsprechender Ausprägung.



**Bild 8.1: Untersuchungsgebiet Hannover, farbliche Differenzierung entsprechend der Straßenklasse**

Das Untersuchungsgebiet umfasst das Hauptstraßennetz der Stadt Hannover. Ergänzt wird es durch Strecken direkt angrenzender Gemeinden, so dass ein zusammenhängendes Netz resultiert, das in etwa durch das umliegende Autobahn- bzw. Schnellstraßennetz begrenzt wird. Im Norden handelt es sich dabei um die A2 und die A352 bis zum Autobahndreieck Hannover-Nord, bei dem die A352 mit der A7 zusammentrifft, die die Begrenzung nach Osten darstellt. Der Netzschnitt im Süden wurde am Autobahndreieck Hannover-Süd entlang der A37 und der B443 gezogen. Da im Südwesten und Westen von Hannover kein Autobahnnetz vorhanden ist, wurden der Netzschnitt entlang des Übergangsbereichs der Bundesstraßen bzw. Schnellwege von der Region zur Stadt Hannover geführt. Dies sind die L393 (Hildesheimer Straße) im Bereich Laatzen, der Südschnellweg (B6/ B3/ B65), die B3 (Göttinger Landstraße) in Hemmingen, die B217 (Hamelner Straße) in Ronnenberg und im Bereich Davenstedt, Badenstedt und Ahlem die B65, die K49 (Carlo-Schmid-Allee), die B441 (Wunstorfer Landstraße) und der Westschnellweg (B6).

Das beschriebene Netz wurde nicht in der gesamten vorhandenen Tiefe in der Simulation abgebildet, sondern nur bis zu der Straßenklasse ‚Hauptverkehrsstraße‘. In Richtung Stadtzentrum wurde die Detaillierung jedoch durch Ergänzung des Netzes um Sammel- und Erschließungsstraßen erhöht, um die Erreichbarkeit der Verkehrszellen und die komplexeren Routenmöglichkeiten differenziert abbilden zu können.

Die Straßenklassen wurden entsprechend der Einstufung im Netzmodell der Region Hannover in dem Verkehrsplanungssystem VISUM - Version 9.15 (PTV AG), das von den zuständigen Gebietskörperschaften der Stadt und der Region Hannover verwendet und gepflegt wird (Stand März 2005), bestimmt.

In dem editierten Simulationsnetz in AIMSUN NG werden die acht in Tab. 8.1 dargestellten Straßenklassen unterschieden, wobei die Attribute ‚maximal zulässige Geschwindigkeit‘ und ‚Kapazität pro Fahrstreifen‘ entsprechend der aufgeführten Werte gesetzt sind. Der Kapazitätswert hat in der mikroskopischen Simulation in AIMSUN NG aber keine beschränkende Wirkung, sondern wird lediglich in der Kostenfunktion berücksichtigt (siehe Kapitel 7.4.2) und spielt somit eher die Rolle eines Gewichtungsfaktors und wurde mit Werten entsprechend Tab. 8.1 belegt.

**Tab. 8.1: Parameter der Straßenklassen des Simulationsnetzes**

Straßenklasse	Zulässige Geschwindigkeit [km/h]	Kapazität pro Fahrstreifen [Fz/h]	Geschwindigkeiten bei statischer Navigation [km/h]
Autobahn	120	2100	130
Schnellweg	80	1800	80 bzw. teilweise 50
Bundesstraße	100	1500	80
Hauptverkehrsstraße v70	70	1200	30
Städt. Hauptverkehrsstraße	50	1000	30
Sammelstraße	30	700	20
Erschließungsstraße	30	400	20
Ein-/ Ausfahrtrampe	60	1000	80

Die in der Simulation verwendete Modellierung der Widerstände der nicht navigierten Verkehrsteilnehmer berücksichtigt als eine Komponente die Straßenklasse (siehe Kapitel 7.4.2.1, Gl. ( 7-6 )). Für die Normierung wird die maximal im Netz vorhandene Kapazität eines Streckenabschnitts verwendet, die sich bei der vorliegenden Untersuchung auf einem vierstreifigen Autobahnabschnitt befindet und sich zu  $CapNet_{\max} = 4 \cdot 2100 = 8400 [Fz/h]$  ergibt.

Das in AIMSUN NG abgebildete Netz besteht aus 3460 Kanten mit einer Gesamtstreckenlänge von 1256 km bzw. 1882 km Fahrstreifenlänge und 261 lichtsignalisierten Knotenpunkten. Die Editierung und Georeferenzierung des Netzes fand mit Hilfe von Lageplänen im Maßstab 1:10 000 bzw. 1:1 000 und im Knotenpunktbereich anhand detaillierter Unterlagen im Maßstab 1:500 statt, die im jpg- oder dxf-Format vorlagen.

Der Fokus der Untersuchung ist auf den Individualverkehr und dessen Verkehrsgeschehen in städtischen Netzen gerichtet. Da die mikroskopische Simulation großer Netze noch immer auf Grund hoher modellertechnischer und rechentechnischer Anforderungen eine Herausforderung darstellt, wurden Beschränkungen in der Abbildungsgenauigkeit vorgenommen. Wie bereits zuvor beschrieben, wurden daher nicht alle untergeordneten Straßen abgebildet und es wurde darauf verzichtet, den Öffentlichen Verkehr (ÖV) zu simulieren. Da sowohl der schienengebun-

dene Verkehr, wie etwa Stadtbahnen, als auch der nicht schienengebundene Öffentliche Verkehr (Busverkehr) Auswirkungen auf den gesamten Verkehrsablauf hat, bedeutet dies, dass bei einem Verzicht auf eine ÖV-Abbildung bestimmte Interaktionen bei der Untersuchung nicht berücksichtigt werden können. Insbesondere im Bereich lichtsignalisierter Knotenpunkte fließt der Einfluss, den vor allem verkehrsabhängige Steuerungen mit einer ÖV-Priorisierung auf den Individualverkehr haben, nicht in die Betrachtung ein. Dies wird bei der vorliegenden Untersuchung jedoch in Kauf genommen, da netzweite Veränderungen von Interesse sind und keine knotenpunkt- oder streckenfeine Betrachtung angestrebt wird. Auch hier sei nochmals angemerkt, dass es bei der Abbildung des Untersuchungsnetzes auch nicht darum geht, das real vorhandene Hannovernetz in allen Details nachzubilden, sondern *ein realistisches* städtisches Netz zu modellieren.

Aus gleicher Intention heraus wurde darauf verzichtet, die 261 im Untersuchungsgebiet vorhandenen lichtsignalisierten Knotenpunkte, sofern sie verkehrsabhängig geschaltet sind, mit der tatsächliche vorhandenen Logik abzubilden. Stattdessen wurde auf die hinterliegenden Festzeitprogramme der morgendlichen Hauptverkehrszeit zurückgegriffen. Die erforderlichen Daten wurden von den zuständigen Gebietskörperschaften zur Verfügung gestellt.

### 8.2.2 Verkehrsnachfrage

Die Verkehrsnachfrage wurde, wie bereits zuvor schon die Straßenklasse, in Anlehnung an das Netzmodell der Region Hannover in dem Verkehrsplanungssystem VISUM - Version 9.15 (PTV AG) modelliert. Das dort abgebildete Netz der gesamten Region Hannover wurde auf den für die vorliegende Arbeit relevanten Bereich beschnitten und unter Beibehaltung der vorhandenen Gebietseinteilung eine Verkehrsnachfragematrix für das Untersuchungsgebiet erzeugt.

In dem Untersuchungsgebiet sind 303 Quellen und Ziele vorhanden, die zum Teil auch an mehreren Stellen an das Netz angebunden sind. Die Einspeisungspunkte wurden ebenfalls entsprechend dem VISUM-Netz gewählt.

Bei der Nachfragematrix, die dem VISUM-Regionsmodell hinterliegt, und folglich auch bei der Schnittmatrix des Untersuchungsgebiets, handelt es sich um eine 24h-Matrix, in der nur der Tagesverkehr, aber nicht die Schwankungen über den Tag wiedergegeben sind. Die zeitlichen Veränderungen der Verkehrsnachfrage und die wechselnden Verkehrsverhältnisse sollen in der vorliegende Untersuchung aber gerade Berücksichtigung finden und daher auch in der mikroskopischen Simulation abgebildet werden. Um die Tagesmatrix auf eine zeitlich feinere Auflösung herunter zu brechen, wurden Verkehrszählungen<sup>3</sup> an zehn über das Stadtgebiet von Hannover verteilten Stellen aus den Jahren 2000 bis 2005 in ihrem Verlauf über den Tag verglichen und mittlere Stundenwerte gebildet. Vor dem Hintergrund, dass der Start einer Fahrt, die an einem der Messquerschnitte erfasst wurde, zu einem früheren Zeitpunkt lag, wurde eine um eine halbe Stunde versetzte Ganglinie durch Mittelwertbildung benachbarter Werte erstellt. Auf Basis dieser wurden Matrizen generiert, und der Simulation hinterlegt. Diese Vorgehensweise vermag natürlich nicht, spezifische Schwankungen auf einzelnen Nachfragebeziehungen diffe-

---

<sup>3</sup> Die Messdaten wurden der VEDAS – Verkehrszählendatenbank Hannover (siehe POHL, J. & JANSSEN, S. (2004): Schneller Zugriff auf Verkehrszählendaten - Eine Oracle-Datenbank in der Region Hannover. *Straßenverkehrstechnik*, 48: 453-458.) entnommen.

renziert nachzubilden. Dem Anspruch, eine realistische Nachfrage zu generieren, die die Verteilung starker und schwächer ausgeprägter Relationen im Netz wiedergibt, wird sie aber gerecht.

prozentuale Aufteilung der 24h-Verkehrsnachfrage über den Tag

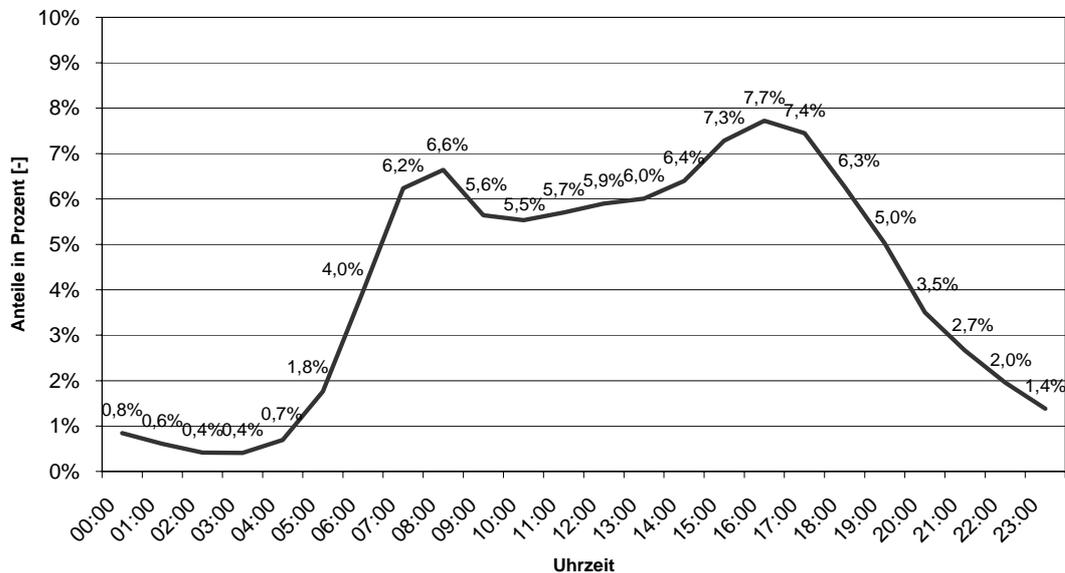


Bild 8.2: Ganglinie der prozentualen Aufteilung der 24h-Verkehrsnachfrage über den Tag

Für die mikroskopische Simulation wurde als Untersuchungszeitraum die morgendlichen Spitzenstundengruppe von 6:00 bis 10:00 Uhr gewählt, wobei eine Warmlaufphase von zwei Stunden vorgeschaltet wurde, um realistischen Bedingungen zu Beginn des Auswertzeitraums vorzufinden. Die Gesamtanzahl von Fahrzeugen, die im Simulationszeitraum das Netz befahren, beträgt rund 300 000 Fahrzeuge.

Die Nachfrage wurde nicht nur hinsichtlich der räumlichen Ausprägung entsprechend des VISUM-Modells gebildet, sondern auch hinsichtlich der Differenzierung nach einzelnen Fahrzeugtypen. Es werden folgende fünf Fahrzeugtypen unterschieden:

- Pkw
- Pkw Wirtschaftsverkehr
- Pkw Fernverkehr
- Lkw bis 7,5 t
- Lkw über 7,5 t.

Die VISUM-Matrizen der einzelnen Fahrzeugtypen wurden, wie zuvor beschrieben, in zeitlich feiner aufgelöste Matrizen umgewandelt und AIMSUN NG hinterlegt.

Die einzelnen Fahrzeugtypen sind in AIMSUN NG mit spezifischen fahrzeug- und fahrdynamischen Attributen versehen, wobei bei den Typen ‚Pkw‘, ‚Pkw Wirtschaftsverkehr‘ und ‚Pkw Fernverkehr‘ gleiche fahrdynamische Parameter unterstellt sind, sie aber in den Kostenfunktionen (siehe Kapitel 7.4.2) unterschiedlich behandelt werden und somit ein anderes Routenwahlverhalten resultiert.

### 8.2.3 Modellkalibrierung

Die mikroskopische Simulation wird verwendet, um unterschiedliche Szenarien nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ vergleichen zu können. Dies bedeutet, dass davon ausgegangen wird, dass das Verhalten in der Simulation dem Verhalten in der Realität sehr ähnlich kommt. Um die Anpassungsgüte überprüfen zu können, wurden reale Verkehrsstärkezahlungen<sup>4</sup>, die an 635 über das Gesamtnetz verteilten Kanten unterschiedlicher Straßenklasse in stundenfeiner Auflösung für den betrachteten Zeitraum von 6:00 Uhr bis 10:00 Uhr vorlagen (ergibt 2540 Kalibrierungswerte) und aus den Jahren 2005 bis 2000 (vereinzelt bis 1998 zurückgegriffen) stammen, mit denen an gleicher Stelle in der Simulation erzielten verglichen.

Als Gütemaße wurde der Mittlere Quadratische Fehler (Roote Mean Square Error – RMSE) bzw. der relative Fehler bezogen zum Mittelwert (Roote Mean Square Percent Error – RMSPE) und das aus der Korrelations- und linearen Regressionsrechnung resultierende Bestimmtheitsmaß  $B = r_{x_{sim}x_{obs}}^2$  verwendet. Eine detaillierte Beschreibung der verwendeten Gütemaße und der erzielten Kalibrierung enthalten Anhang C.1 und C.2.

Mit der Wurzel aus dem Mittleren Quadratischen Fehler  $RMSE = 253$  [Fz/h] bzw. relativ ausgedrückt mit  $RMSPE = 20,3\%$  und dem Bestimmtheitsmaß von  $B = 0,70$  wurde keine hervorragende Anpassung erreicht. Da aber bereits Unsicherheiten bei den hinterlegten Quelle-Ziel-Matrizen bestanden und lediglich Zählungen aus verschiedenen Jahren zur Verfügung standen, wird die Anpassungsgüte als ausreichend erachtet. Zumal nicht die präzise Abbildung des Verkehrszustands von Hannover für die Untersuchung im Vordergrund stand, sondern die Simulation *eines realistischen* städtischen Netzes.

## 8.3 Szenarienentwicklung

Der Einfluss von dynamischer Information auf das Verkehrsverhalten soll in Abhängigkeit der Ausstattungsrate der Fahrzeugflotte mit navigierten Fahrzeugen und der Aktualität und der Verfügbarkeit der Informationen untersucht werden. Ausstattungs- oder Penetrationsrate bezeichnet im eigentlichen Sinn nur die Tatsache, dass der Verkehrsteilnehmer ein Navigationssystem zur Verfügung hat, es aber nicht zwangsläufig benutzt. Im Rahmen dieser Arbeit wird jedoch davon ausgegangen, dass die Nutzungsrate der Penetrationsrate entspricht und somit jeder Navigierte die Anweisungen vollständig befolgt.

Durch Simulation verschiedener Experimente, in denen der Anteil der nicht navigierten gegenüber den navigierten Fahrern stufenweise variiert wird, soll ausgetestet werden, ob es bestimmte Bereiche gibt, in denen sich ein Zuwachs informierter Verkehrsteilnehmer besonders positiv auf die Verkehrslage auswirkt, ob sich die Beeinflussung ab einer gewissen Ausstattungsrate abschwächt oder ob sogar negative Einflüsse, etwa einer Stauverlagerung durch den Wechsel der navigierten Fahrzeuge auf die gleiche Alternativroute, erkennbar werden.

Der Grenzzustand ist der, bei dem alle Verkehrsteilnehmer vollständige Informationen haben, beständig richtige Entscheidungen hinsichtlich ihrer Routenwahl treffen und identisch in ihrem

---

<sup>4</sup> Die Messdaten wurden der VEDAS – Verkehrszählendatenbank Hannover (siehe POHL, J. & JANSSEN, S. (2004): Schneller Zugriff auf Verkehrszählendaten - Eine Oracle-Datenbank in der Region Hannover. *Straßenverkehrstechnik*, 48: 453-458.) entnommen.

Verhalten sind. Dieser Zustand ist zwar nicht realistisch, durch Aufspannen der Extrempunkte und der Untersuchung der gesamten Bandbreite soll das Wirkungsspektrum und das im Sinne eines Verkehrsmanagements vorhandene Potenzial zur Reduzierung der Gesamtreisezeiten im Netz aufgezeigt werden.

Neben dem Anteil informierter Verkehrsteilnehmer beeinflusst auch die Art und Genauigkeit der Information das Verhalten. In Kombination mit der Variation der Anteile navigierter Verkehrsteilnehmer werden Experimente mit unterschiedlich langen Aktualisierungsintervallen generiert (5 min, 15 min, 30 min), um die dynamischen Änderungen des Verkehrszustands, die sich während einer Fahrt ergeben, berücksichtigen zu können. Denn ein unter bestimmten Bedingungen als bester identifizierter Weg kann durch die dynamischen Änderungen des Verkehrszustands zu einem darauf folgenden Zeitpunkt nicht mehr die günstigste Alternative darstellen. Werden aber weiterhin veraltete und nicht mehr zutreffende Informationen gegeben, kann dies im ungünstigsten Fall sogar eine Verschlechterung des Verkehrszustands gegenüber dem Zustand, der sich ohne Information einstellen würde, bewirken. Es ist daher ein Anliegen, zu identifizieren, welche zeitliche Sicherheit Informationen haben sollten bzw. welche Aktualisierungsrate bei der Informationsverbreitung angestrebt werden sollte, um eine möglichst positive Beeinflussung des Verkehrszustands und der Reisezeiten erreichen zu können.

Andererseits wird auch der Einfluss der Verfügbarkeit von Informationen über das Netz untersucht. Dazu werden Varianten generiert, bei denen aktuelle Informationen nur bis zu einer bestimmten Netzdifferenzierung (bis zu der Straßenklasse ‚Hauptverkehrsstraße‘, nicht auf dem untergeordneten Netz) zur Verfügung stehen. Mit diesen Untersuchungen sollen Kenntnisse gewonnen werden, inwieweit eine aktuelle Reisezeit-/ Verkehrslageerfassung auf dem vollständigen Netz zur dynamischen Navigation notwendig ist, oder ob eine Beschränkung auf einzelne Teile bereits ebenso zufrieden stellende Ergebnisse liefert.

Der dynamischen Informierung wird der Fall der statischen Zielführung gegenübergestellt. Die Kostenermittlung bzw. Auswahl der günstigsten Route basiert hierbei auf durchschnittlich fahrbaren Geschwindigkeiten, die in einer Straßenklasse jeweils gleich und zeitinvariant sind (siehe Gl. ( 7-14 )). Es werden Wirkungsunterschiede einer statischen gegenüber einer dynamischen Navigation aufgezeigt, um darauf aufbauend notwendige Entwicklungsrichtungen ableiten zu können.

Eine Zwischenstufe der dynamischen und der statischen Routenführung stellt die Informierung ab einem Schwellwert dar. Bei den bisherigen Experimenten wurde davon ausgegangen, dass die Informationen für die dynamisch navigierten Verkehrsteilnehmer in jedem Intervall aktualisiert werden, auch wenn sich die Reisezeiten nur minimal verändert haben. Bei der Schwellwertinformierung basiert die Kostenbestimmung zunächst auf den statischen Geschwindigkeitswerten. In jedem Aktualisierungsintervall wird aber überprüft, ob die aktuelle Reisezeit auf einem Link im Vergleich zur Reisezeit im unbelasteten Netz (free flow travel time) einen festgesetzten Anteil übersteigt. Ist dies der Fall, wird statt der statischen Reisezeit die aktuelle Reisezeit zur Kostenberechnung auf diesem Link verwendet. Diese Vorgehensweise entspricht dem heute üblichen Meldeverfahren über RDS-TMC (siehe Kapitel 4.3.1), bei dem Verkehrsstörungen in Form von fünf verbal beschriebenen Stufen (Levels of Service) übermittelt werden. Die Einteilung lautet:

- freier Verkehr
- reger Verkehr
- dichter Verkehr
- stockender Verkehr
- Stau.

Die Einstufung der jeweiligen Störung in eine Stufe liegt dabei im Ermessen der zuständigen Meldestelle und basiert auf keinen einheitlich festgesetzten Kriterien. Auch die Weiterverarbeitung und Berücksichtigung der Störungsstufen bei der Routenberechnung in einem Navigationsgerät ist vom Hersteller abhängig. In Anlehnung an real verwendete Grenzen wird der Schwellwert zur Störungsmeldung (Stufe von freiem Verkehr zu regem Verkehr) zu

$$\frac{\text{aktuelle Reisezeit}}{\text{Reisezeit im unbelasteten Netz}} = 1,6 \quad [-] \quad (8-1)$$

gesetzt. Jenseits dieser Grenze erfolgt keine weitere stufenweise Betrachtung, sondern die Berücksichtigung der differenzierten aktuellen Reisezeiten.

Zusammenfassend bestimmen sich die Experimente aus der Variation folgender Einflussgrößen:

- Anteile der navigierten Verkehrsteilnehmer
  - 0 %, 10 %, 15 %, 25 %, 35 %, 50 %, 75 %, 100 %
- Dauer des Aktualisierungsintervalls
  - 5 min, 15 min, 30 min
- Navigationsweise
  - dynamisch (aktuelle Reisezeiten sind auf dem gesamten Netz verfügbar)
  - dynamisch auf hochrangigem Straßennetz, darunter (Sammel- und Erschließungsstraßen) nur statische Informationen
  - dynamisch ab Schwellwert, sonst statisch (aktuelle Informationen werden erst gegeben, wenn aktuelle Reisezeit auf Link die Reisezeit im unbelasteten Netzes um 60 % übersteigt)
  - statisch (zur Widerstandsberechnung werden feste Geschwindigkeitswerten abgestuft nach der Straßenklasse verwendet).

### 8.3.1 Normalfall

Die zuvor definierten Experimente werden zunächst unter dem Szenario ‚Normalfall‘ simuliert. Bei diesem treten keine unvorhergesehenen Störungen auf, sondern lediglich Verkehrsbehinderungen, die aufgrund der alltäglichen Nachfrage zur morgendlichen Hauptverkehrszeit entstehen. Da diese Szenarien das gewohnte Verkehrsgeschehen widerspiegeln, sollten in diesen Fällen die nicht navigierten Verkehrsteilnehmer ihre Routenwahl relativ vorteilhaft wählen können, da der Zustand ihrem historischen Wissen entspricht und sie vorausschauend agieren können.

### 8.3.2 Störungsfall

Verkehrsinformationen sollen gerade in den Situationen, in denen sich eine unvorhergesehene Störung ereignet, zu einem reibungslosen Verkehrsgeschehen durch Umleitung um die Störstelle beitragen. Zur Identifizierung der Auswirkungen in Abhängigkeit der Stördauer in Ver-

gleich mit der Aktualisierungsrate der Verkehrsinformation, werden Szenarien generiert, in denen jeweils an verschiedenen Stellen im Netz ein Störfall mit unterschiedlicher Ausprägung auftritt. Die Wahl typischer Stellen mit Störfällen fiel auf Grundlage einer Analyse von 100 stichprobenhaft ausgewählten Verkehrsmeldungen, die über TMC (siehe Kapitel 4.3) im Zeitraum zwischen Januar 2005 und Juni 2006 in Hannover ausgestrahlt wurden (siehe Bild 8.3) [Landesmeldestelle Niedersachsen, 2006]. Das Fehlen von Verkehrsmeldungen auf untergeordneten Strecken in städtischen Bereichen ist dabei nicht auf die Tatsache zurückzuführen, dass dort keinerlei Störungen auftraten, sondern dass eine Erfassung bzw. Ausstrahlung in diesen Bereichen standardmäßig nicht vorhanden ist. Um die Auswirkungen von Verkehrsstörungen und deren Meldungen auch in diesen Bereichen identifizieren zu können, wurden Störszenarien auf städtischen Hauptverkehrsstraßen generiert.



**Bild 8.3:** Streckenabschnitte mit TMC-Verkehrsmeldungen (rot gekennzeichnet) im Zeitraum von Januar 2005 bis Juni 2006 in Hannover (ohne Meldungen auf Autobahnen) [Landesmeldestelle Niedersachsen, 2006]

### 8.3.2.1 Störfall 1: Fahrstreifensperrung Westschnellweg von 7:40 Uhr bis 8:40 Uhr

Störfallszenario 1 umfasst eine einstündige Blockade des rechten Fahrstreifens des Westschnellwegs in Richtung Süden zwischen 7:40 Uhr und 8:40 Uhr. Der Westschnellweg ist als zweithöchste Straßenklasse eingestuft und stellt eine wichtige Straßenverbindung aus Richtung Westen für Hannover dar.

Die in der Realität gemeldete Störungsdauer über TMC liegt größtenteils bei vier Stunden (siehe Anhang D), was aber nicht unbedingt der tatsächlichen Störungsdauer entsprechen muss, da dies der im System standardmäßig eingestellte Zeitraum für Störungsmeldungen ist und die Meldung entweder nicht herausgenommen wurde oder keine erneute Störungsaufhebungsmeldung gesendet wurde. Um die Auswirkungen auf das Verkehrsgeschehen während des Bestehens der Störung und auch die Ausprägungen danach untersuchen zu können, ist die Störung auf eine Stunde begrenzt, wobei sie den Zeitraum der höchsten Nachfrage des Simulationszeitraums trifft.



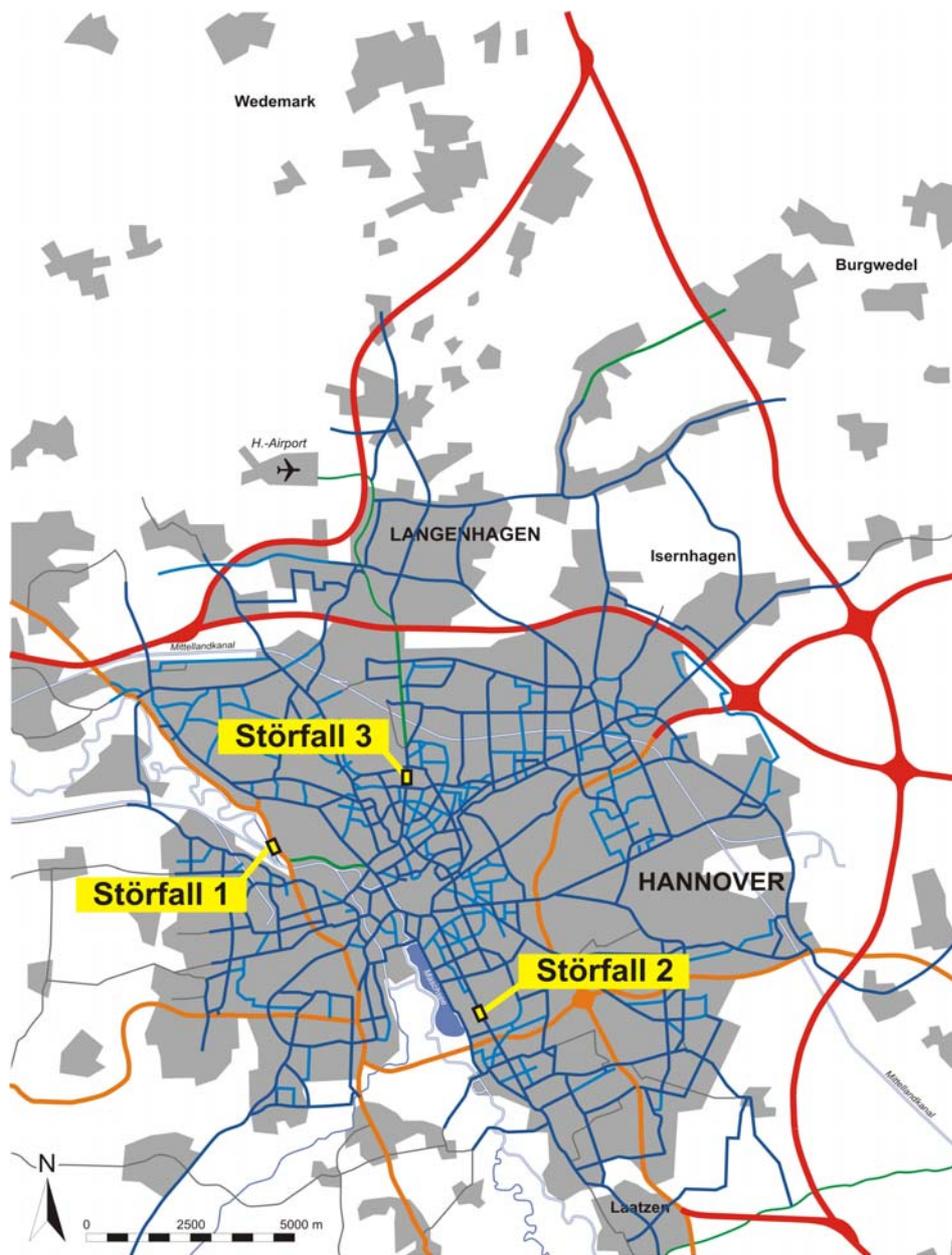


Bild 8.4: Lage der Störfälle im Untersuchungsnetz



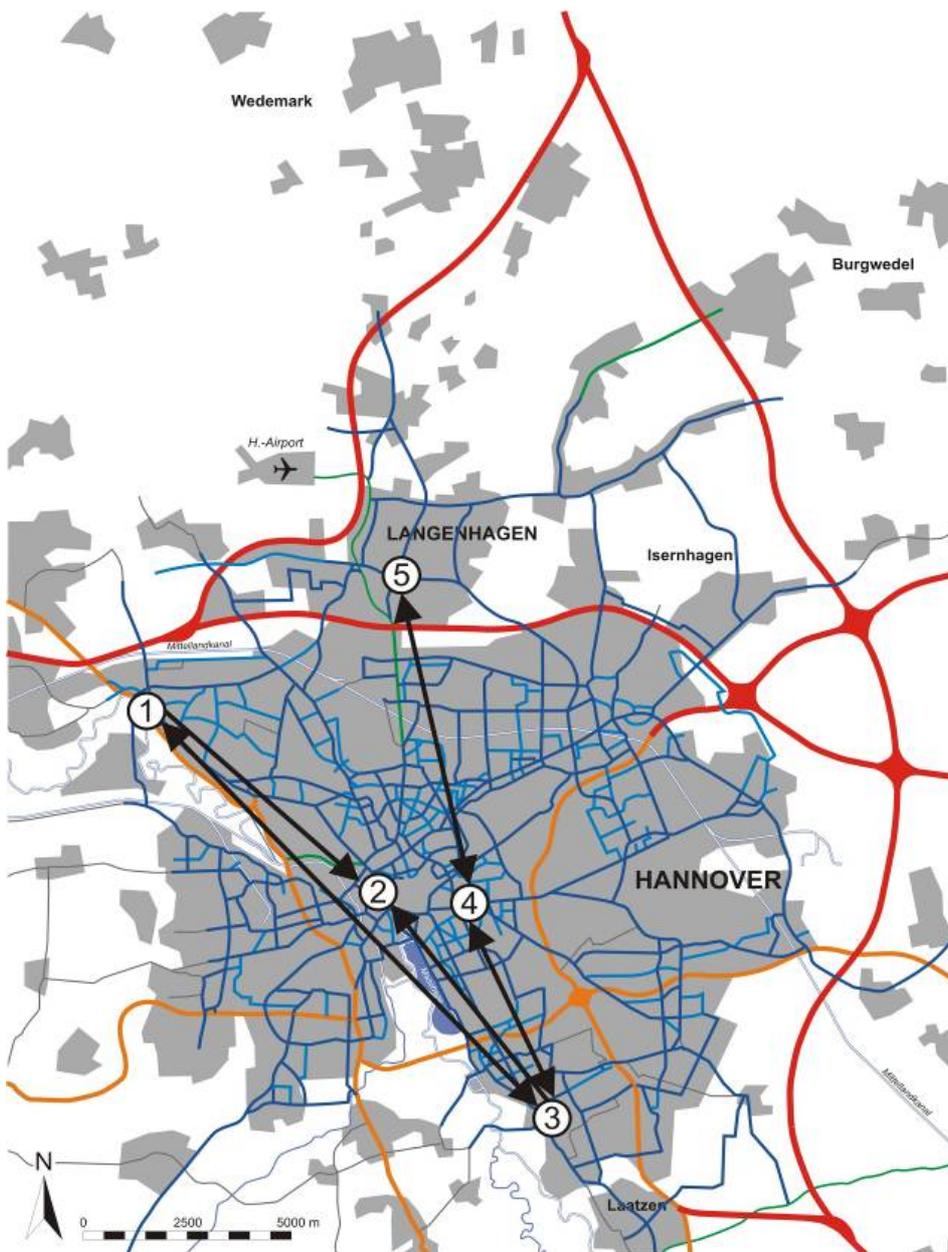
## 9 Untersuchungsergebnisse

### 9.1 Bewertungsgrößen

Als Bewertungsgrößen werden Reisezeiten differenziert nach den unterschiedlichen Fahrzeuggruppen und -typen verwendet. Die Analyse ist dabei auf das sich einstellende Reisezeitniveau gerichtet, aber auch auf dessen Schwankungsbereich, so dass Rückschlüsse auf die Stabilität und Vergleichmäßigung des Verkehrsflusses gezogen werden können. Zudem wird die Aufteilung auf die unterschiedlichen Routen betrachtet, um die Wirkungszusammenhänge differenzierter identifizieren zu können. Bei der Bewertung stehen nicht die einzelne Verkehrsteilnehmer im Vordergrund, sondern die Wirkungen auf Fahrzeugkollektive und auf den gesamten Verkehrszustand im Netz.

Neben der Analyse des Gesamtsystems werden exemplarisch die in Bild 9.1 dargestellten acht Verkehrsbeziehungen differenziert untersucht. Hierunter sind Rand-Zentrums-Beziehungen bzw. Beziehungen entgegen gesetzter Richtung wie auch Durchfahrten des Gesamtnetzes durch Rand-Rand-Beziehungen beinhaltet, so dass unterschiedliche Fahrtweiten und Belastungsrichtungen abgedeckt sind. Die Verkehrsnachfrage dieser Quelle-Ziel-Beziehungen beträgt aufgeteilt in 15 Minuten-Matrizen jeweils 15 [Fz/15min] des Fahrzeugtyps Pkw über den gesamten Simulationszeitraum.

Zur sinnvollen Einordnung der Ergebnisse sei auch hier nochmals angemerkt, dass im Rahmen dieser Arbeit davon ausgegangen wird, dass die Penetrationsrate mit Navigationssystemen gleich der Nutzungsrate ist. Dies bedeutet, dass alle navigierten Verkehrsteilnehmer die Anweisungen vollständig befolgen.



**Bild 9.1:** Differenziert analysierte Verkehrsbeziehungen

## 9.2 Untersuchungsergebnisse bezogen auf das Gesamtsystem

### Dynamische Navigationsweise

Die Analyse der Veränderungen der Gesamtreisezeit im Netz über den Untersuchungszeitraum von 6:00 Uhr bis 10:00 Uhr zeigt zunächst eine Abnahme mit Ansteigen der Anteile der navigierten Verkehrsteilnehmer. Bei hohen Penetrationsraten tritt durch das immer stärkere Gleichverhalten der Verkehrsteilnehmer ein starke Konzentration auf einzelne Strecken bzw. Routen statt. Dadurch behindern sich die Fahrzeuge gegenseitig, was zu Stauungen führt und ein Ansteigen der Gesamtreisezeit bewirkt. Die Lage des Umschwenkpunkts ist abhängig von der Häufigkeit, in der neue Informationen gegeben werden, d. h. wie rasch die Verkehrsteilnehmer auf sich ändernde Verkehrsverhältnisse reagieren. Die Gegenüberstellung der Gesamtreisezei-

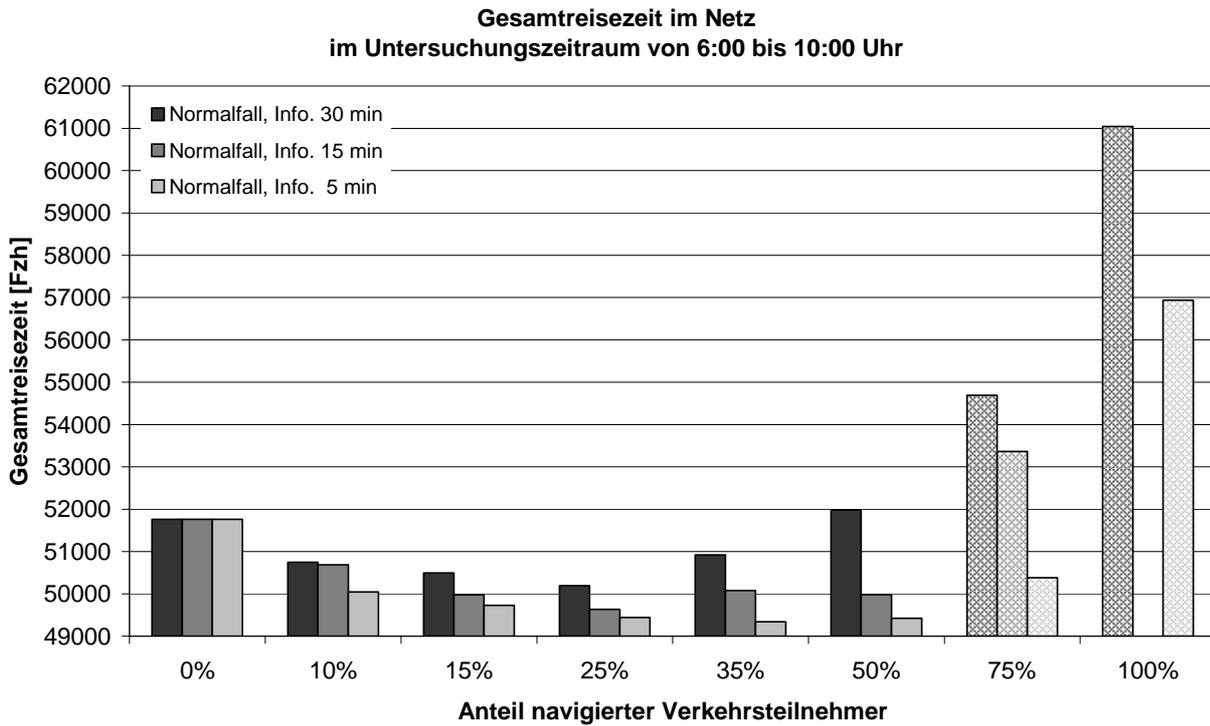
ten im Normalfall in Bild 9.2 bei den drei untersuchten Aktualisierungsintervallen zeigt, dass sich bei einem 30 Minuten-Intervall minimale Gesamtreisezeiten (Reduzierung um ~ 1500 [Fzh]) bei einer Ausstattungsrate von 25 % ergeben und sich danach ein Ansteigen ergibt, das bei 50 % etwa wieder das Niveau des Referenzfalls 0 %-Ausstattungsquote erreicht.

Bei Verwendung kürzerer Aktualisierungsintervalle kann die Gesamtreisezeit weiter verringert werden (Reduzierung um ~ 2000 [Fzh] bei einem 5 min-Intervall). Zudem verschiebt sich der Umkehrpunkt in den Bereich zwischen 35 % und 50 % navigierter Fahrzeuge.

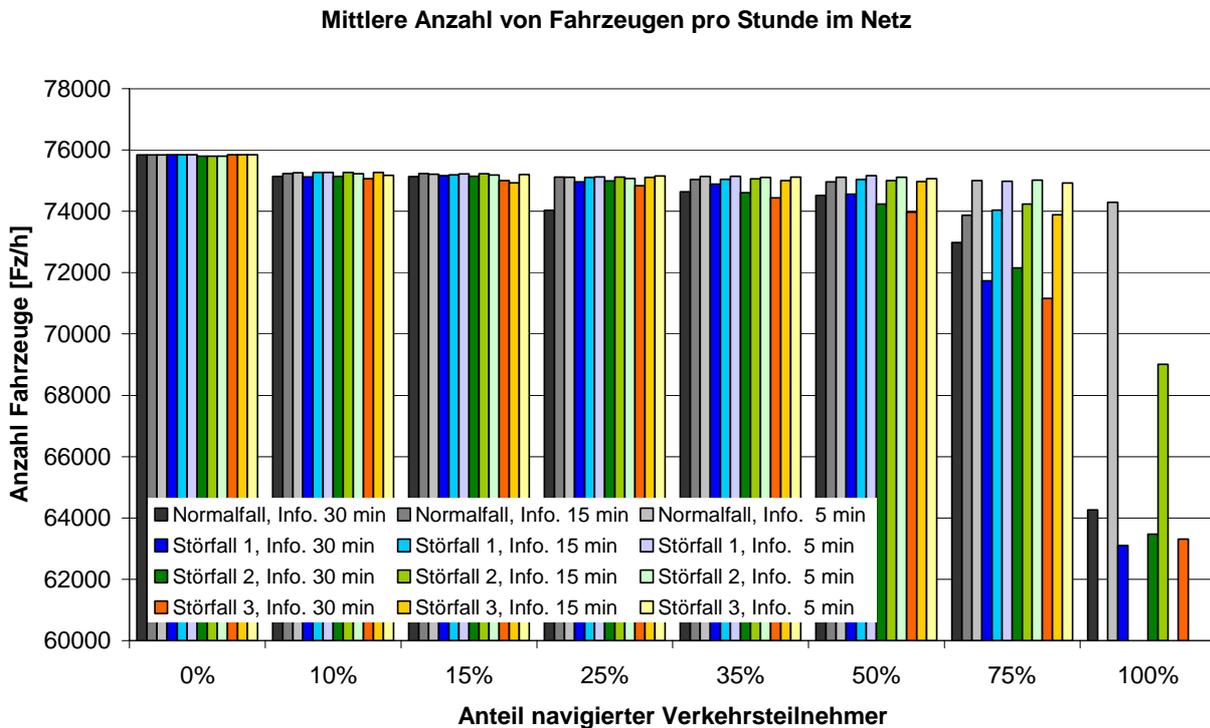
Bei Anteilen von 75 % oder 100 % navigierter Verkehrsteilnehmer ist ein deutlicher Reisezeitanstieg festzustellen. Die Ergebnisse der Vollausstattung und zum Teil auch die der 75 %-Experimente sind in ihren Absolutwerten jedoch nicht mehr belastbar, da die sehr großen Verkehrsstörungen in der Simulation nicht mehr aufgelöst werden können und das System zum Teil zum Zusammenbrechen bringen, so dass eine Auswertung nicht mehr möglich ist. Dies zeigt sich auch daran, dass der Durchsatz an Fahrzeugen durch das Netz deutlich absinkt und die Anzahl der Fahrzeuge, die in den vier untersuchten Stunden das Netz durchfahren haben, abnimmt (siehe Bild 9.3).

Für die sehr hohen Penetrationsraten sind somit die Rückschlüsse und die Übertragung auf die Realität, dass in diesen Fällen extreme Verkehrsbehinderungen und eine Verschlechterung des Verkehrszustands gegenüber dem Referenzfall entstehen würden, nicht zulässig. In der Realität könnte sich jeder Verkehrsstau über eine entsprechend lange Zeit auflösen. Zur Verdeutlichung, dass die Simulationsergebnisse der Experimente mit sehr hohen Ausstattungsraten nur Tendenzen liefern und in ihren Absolutwerten nicht belastbar sind, sind sie bei der Darstellung der Untersuchungsergebnisse farblich zurückgenommen bzw. werden nicht in allen Szenarien untersucht.

Bei einer aktuellen Ausstattungsrate des Fahrzeugbestands mit Navigationsgeräten in Deutschland zwischen 10 % und 15 % (siehe Kapitel 4.4.2), wobei wohl ein deutlich geringerer Anteil bei alltäglichen städtischen Fahrten wirklich zum Einsatz gelangt, werden die Szenarien mit sehr hohen Penetrationsraten voraussichtlich noch nicht einmal mittelfristig akut werden. Zudem wird davon ausgegangen, dass sich alle navigierten Fahrzeuge exakt gleich verhalten. In der Realität würde dies nur dann vorliegen, wenn die Navigation bei allen auf identischen Routensuchalgorithmen, einer identischen Bewertung des Straßennetzes und der Fahrmanöver auf Basis der Karte und identischen Konfigurationen (z. B. Routenoptionen wie die Mischung aus weg- und reisezeitkürzester Route) basierte. Heute sind bereits eine Vielzahl von Herstellern von Navigationsgeräten mit ihren unterschiedlichsten Produkten auf dem Markt, so dass ein identisches Verhalten aller auch bei Vollausstattung nicht realistisch ist, weshalb die sehr hohen Ausstattungsbereiche in der vorliegenden Arbeit nicht detailliert untersucht werden. Die eintretenden Negativeffekte bereits bei geringeren Raten (35 % bis 50 %) zeigen jedoch, dass mit zunehmender Durchdringung eine Weiterentwicklung der Navigationsalgorithmen und eine Interaktion zwischen den navigierten Fahrzeugen stattfinden müssen.



**Bild 9.2: Gesamtreisezeit [Fzh] im Netz im Normalfall mit dynamischer Navigation**



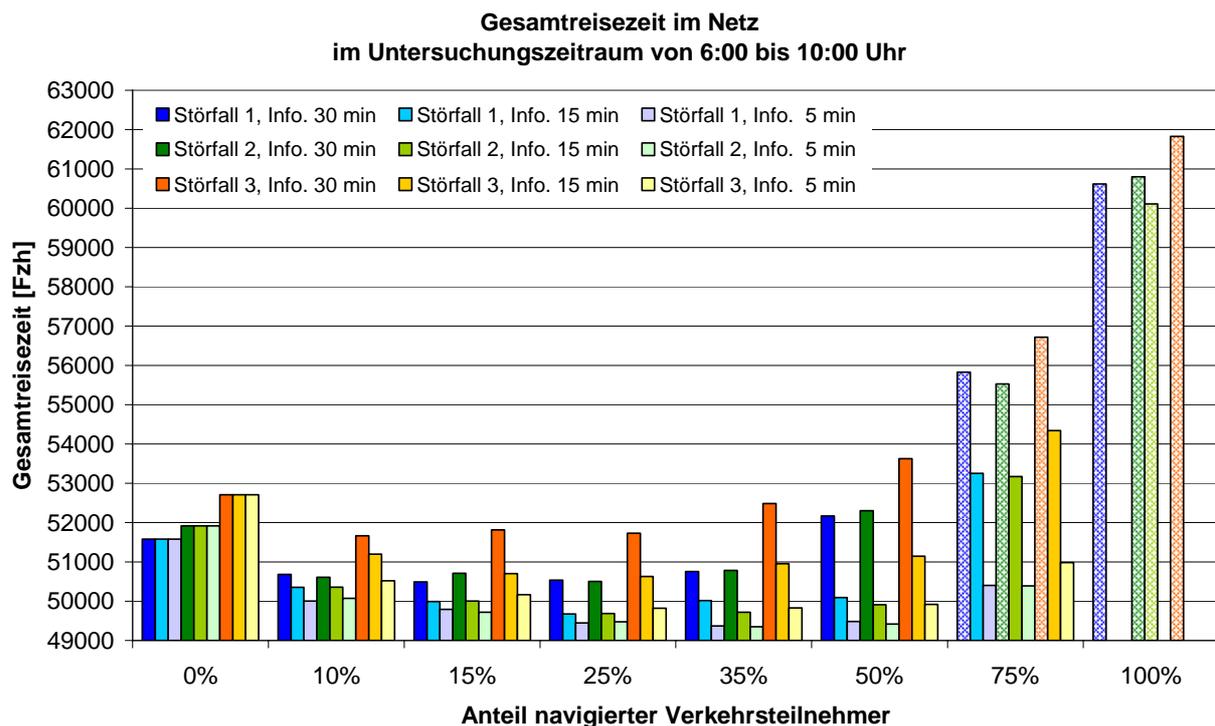
**Bild 9.3: Mittlere Anzahl an Fahrzeugen pro Stunde im Netz bei dynamischer Navigation**

Bei den Gesamtreisezeiten der Störfallszenarien ist wie im Normalfall eine Reduzierung mit steigendem Anteil navigierter Fahrzeuge festzustellen. Der Bereich mit dem größten Reisezeitgewinn verschiebt sich auch hier von Penetrationsraten von 10 % bis 15 % im Falle eines

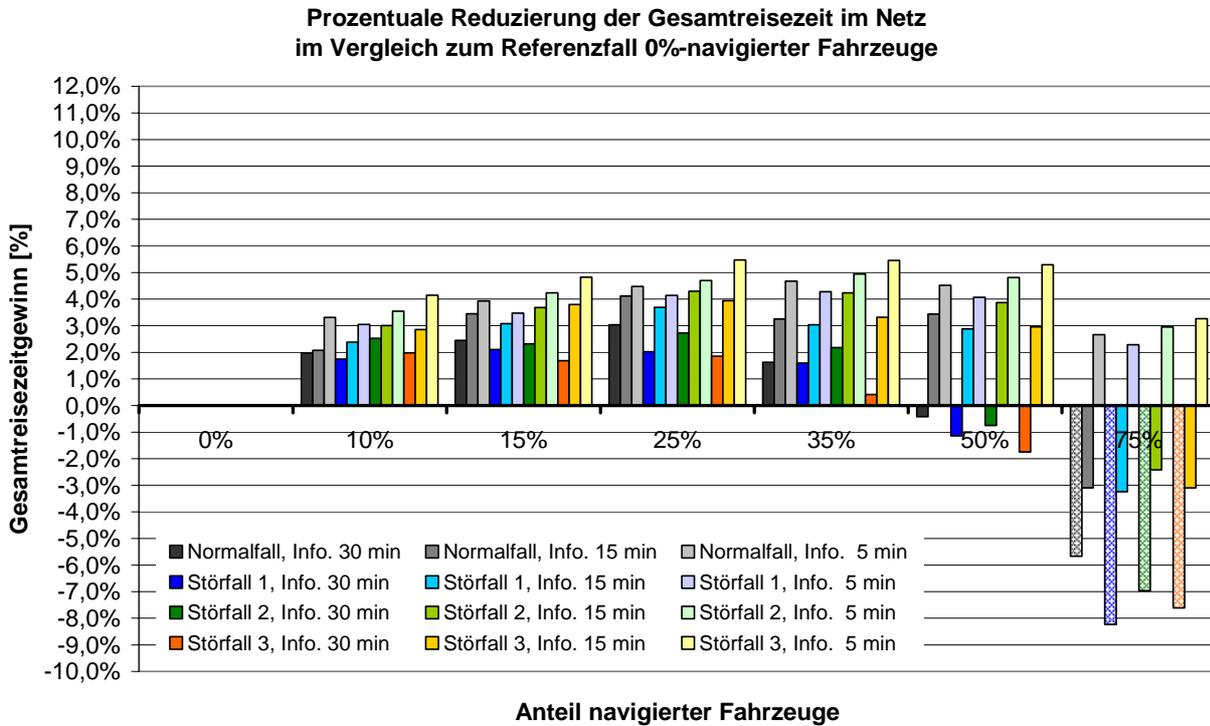
30 Minuten-Aktualisierungsintervalls hin zu 35 % bis 50 % bei einer Informierung alle fünf Minuten (siehe Bild 9.4). Der Einfluss der Länge des Aktualisierungsintervalls macht sich besonders bei Störfall 3 bemerkbar. Im Fall dieser sehr gravierenden Verkehrsbehinderung einer gesamten Fahrtrichtungssperrung einer Haupteinfallstraße kann durch dynamische Navigation bei halbstündiger Aktualisierung der Meldungen ein Gesamtzeitgewinn von ~ 2 % erzielt werden (gegenüber dem Referenzfall 0 %-navigierter Fahrzeuge), wobei der Anteil navigierter Verkehrsteilnehmer nicht über 25 % liegen darf. Steigt er auf 35 % an, ergibt sich nur noch ein geringfügiger Gewinn und resultiert bei 50 % navigierter Fahrzeuge sogar in einer Erhöhung der Gesamtzeit gegenüber dem Fall, dass keiner navigiert ist (siehe Bild 9.5).

Bei einem Aktualisierungsintervall von fünf Minuten stellt sich ein Gesamtzeitgewinn von bis zu 5,5 % ein und hält sich über einen relativ breiten Ausstattungsbereich (25 %, 35 %, 50 %) auf diesem Niveau. Durch das kurze Aktualisierungsintervall kann bewirkt werden, dass weniger Fahrzeuge in den gestörten Bereich einfahren bzw. schneller umgeleitet werden und sich die Fahrzeuge breiter gefächert im Netz verteilen, da anteilig weniger Fahrzeug auf die gleiche Route geschickt werden. Werden die Verkehrsteilnehmer nur in großen Abständen mit neuen Informationen über den aktuellen Verkehrszustand versorgt, sind deutlich mehr Fahrzeuge von der Störung betroffen, da die Navigation noch relativ lange nach Auftreten der Störung die Fahrzeuge über die überstauten Strecken führt. Die lange andauernde Navigation über eine bestimmte Route, nämlich den Bestweg bestimmt aus den Zuständen des letzten Intervalls, bewirkt zudem eine hohe Konzentration des Verkehrs auf wenige Streckenabschnitte, so dass Überlastungen auftreten können (siehe auch Kapitel 9.3).

Diese beiden Phänomene bewirken, dass sich, wie vor allem Störfall 3 zeigt, bei hohen Ausstattungsgraden und langen Aktualisierungsintervallen sogar negative Auswirkungen im Vergleich zum Referenzfall einstellen können, während sich bei gleichen Anteilen navigierter Fahrzeuge und kurzen Aktualisierungsintervallen noch deutliche Gesamtzeitreduzierungen ergeben.

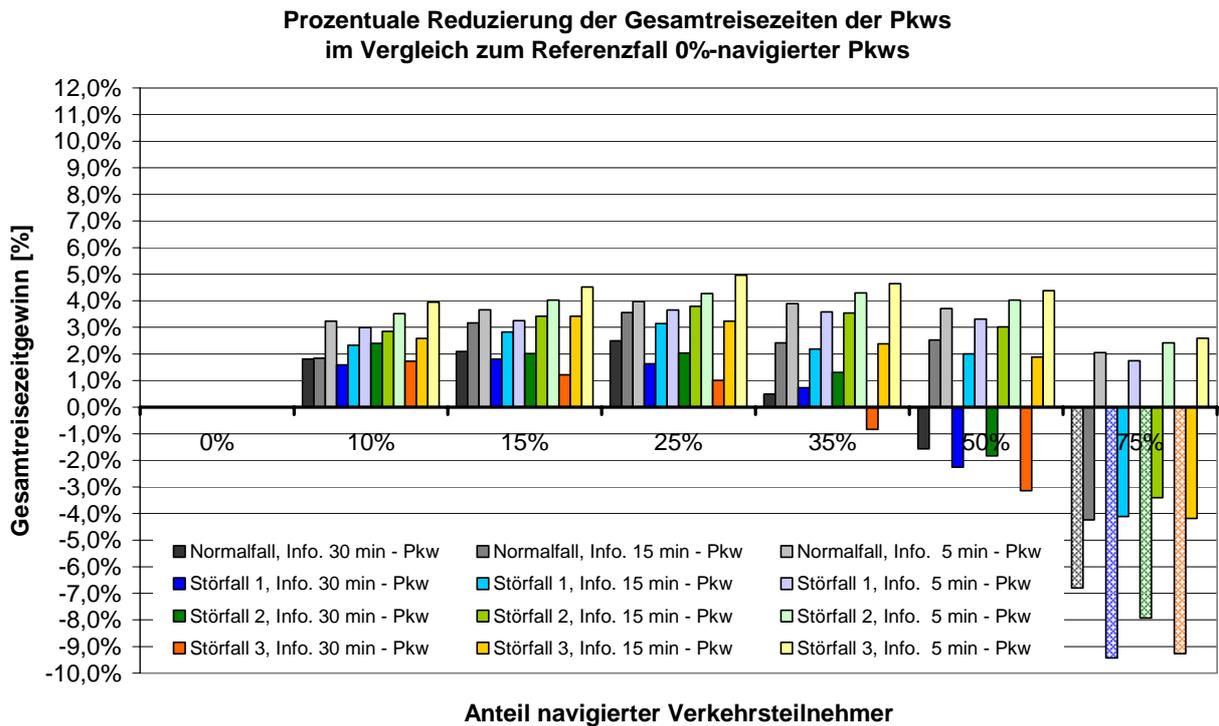


**Bild 9.4: Gesamtreisezeit [Fzh] im Netz bei den Störfall-Szenarien mit dynamischer Navigation**

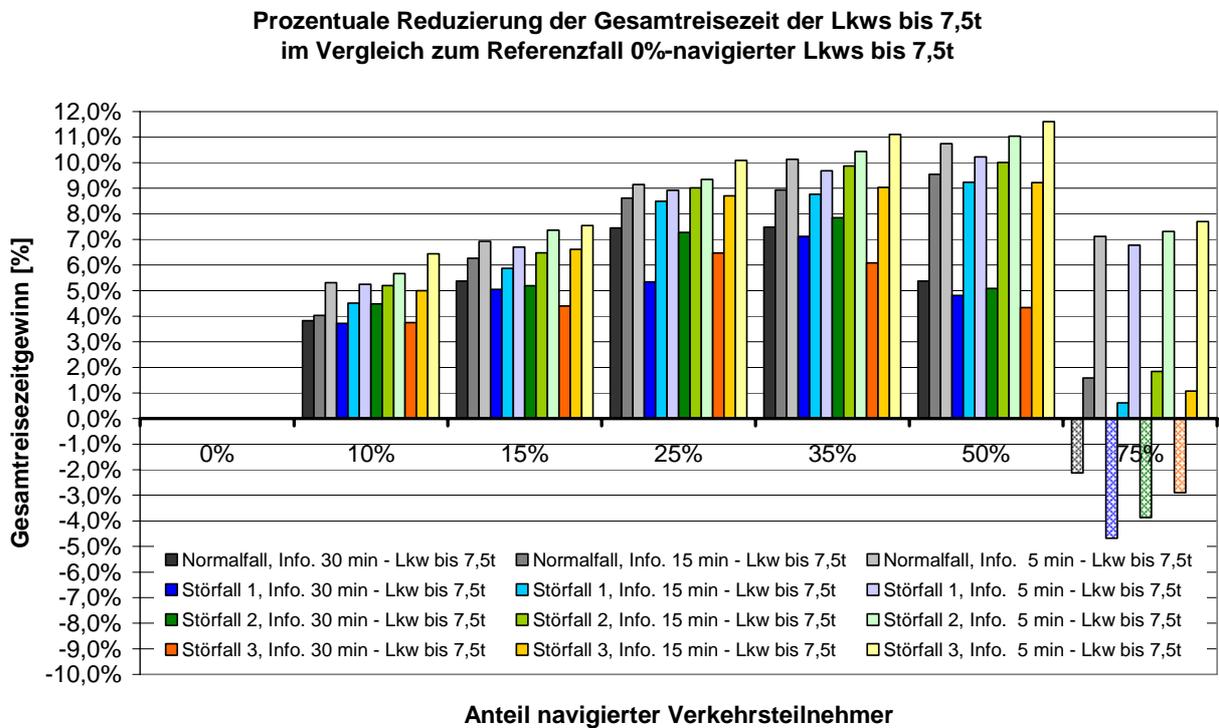


**Bild 9.5: Prozentualer Gesamtreisezeitgewinn im Netz bei dynamischer Navigation**

Differenziert man die Gesamtreisezeitveränderungen nach den einzelnen Fahrzeugtypen, werden deutliche Unterschiede sichtbar. Bei den Pkws ergibt sich ein ähnliches Bild wie für den Gesamtverkehr mit maximalen Gesamtreisezeitreduzierungen von ~ 5 % bei einem Aktualisierungsintervall von fünf Minuten (siehe Bild 9.6). Die größten Gesamtreisezeitgewinne von 11 % bis 12 % werden bei den Lkws sichtbar, die auch noch in hohen Ausstattungs Bereichen erzielt werden (siehe Bild 9.7). Dies ist dadurch bedingt, dass das modelltechnische Verhalten der Lkw-Fahrer ohne Navigation eine Bevorzugung höherrangiger Straßen vorsieht (siehe Kapitel 7.4.2.1). Da bei dynamischer Navigation rein nach der Fahrzeit geroutet wird, werden auch niedrigklassigere Straßen gewählt, was allerdings aus verkehrsplanerischen Gesichtspunkten bedenklich ist. Auch wären diese hohen Gewinne in der Realität wohl nicht zu erreichen, da die fahrdynamischen Aspekte vor allem größerer Lkws bedingt durch ihre geringe Wendigkeit, die in diesem Maße nicht in der Simulation Berücksichtigung findet, nicht dem Routenvorschlag durch das untergeordnete Straßennetz folgen.

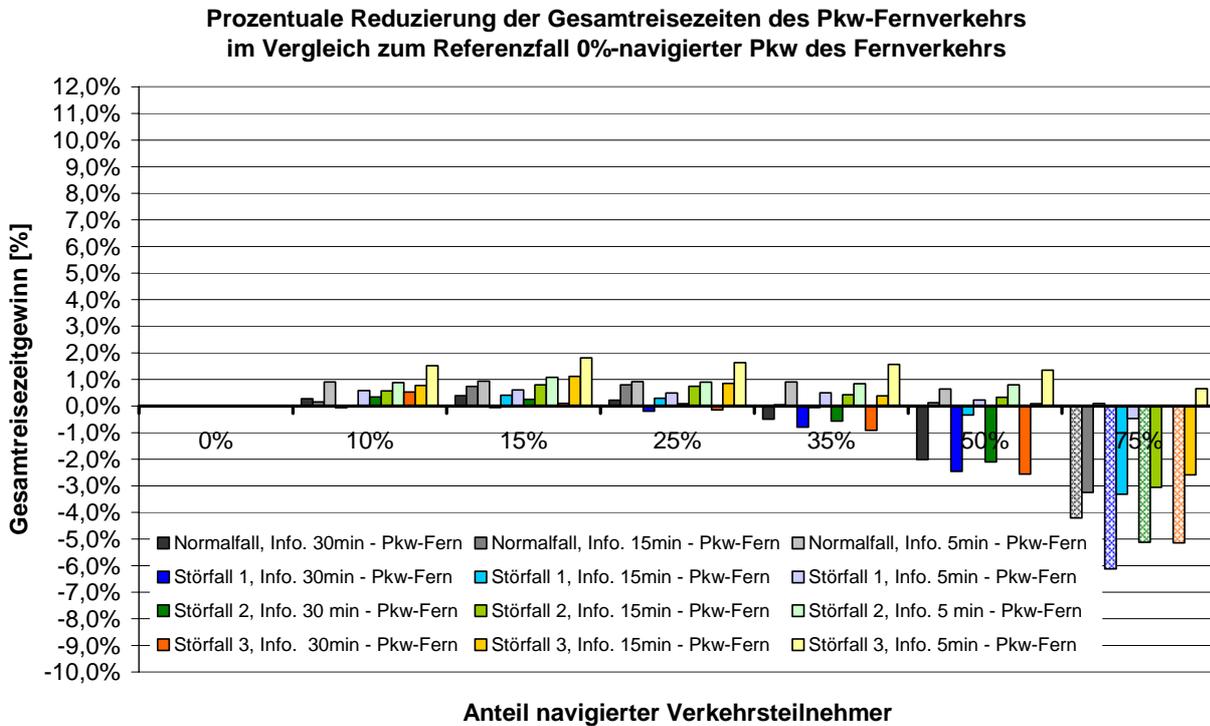


**Bild 9.6: Prozentualer Gesamtreisezeitgewinn der Pkw bei dynamischer Navigation**



**Bild 9.7: Deutlicher Gesamtreisezeitgewinn für den Fahrzeugtyp ,Lkw bis 7,5 t' bei dynamischer Navigation**

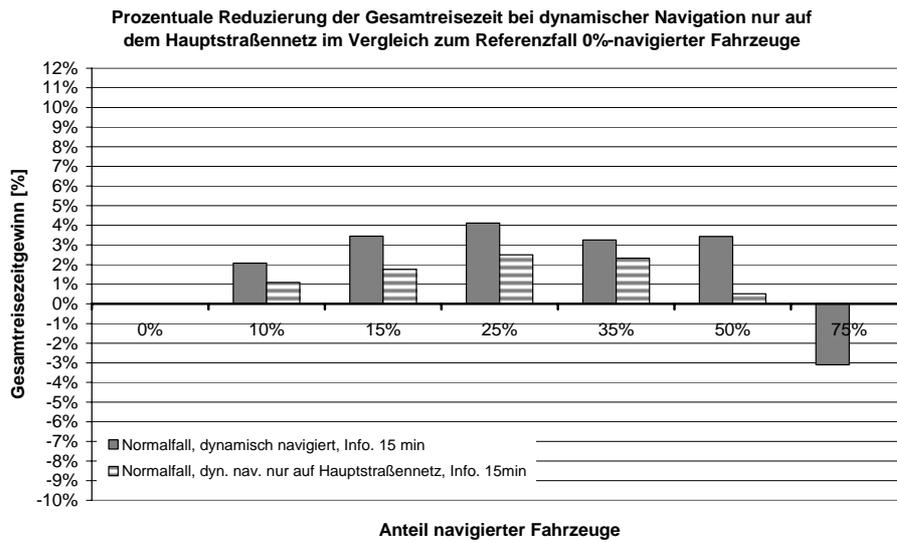
Die Navigation im Fernverkehr macht sich im Hinblick auf Gesamtzeitgewinne wenig bemerkbar, da die Quellen und Ziele außerhalb des Stadtgebiets liegen und der Verkehr überwiegend über die Autobahnen abgewickelt wird (siehe Bild 9.8). Die Alternativrouten mit einer Stadtdurchfahrung bieten keinen Reisezeitvorteil, so dass der Fernverkehr auch mit Navigation weiterhin über die Autobahnen bzw. Schnellwege geführt wird.



**Bild 9.8: Geringe prozentuale Reduzierung der Gesamtreisezeit für den Fahrzeugtyp ‚Pkw-Fernverkehr‘ bei dynamischer Navigation**

**Dynamische Navigation nur auf hochrangigem Straßennetz**

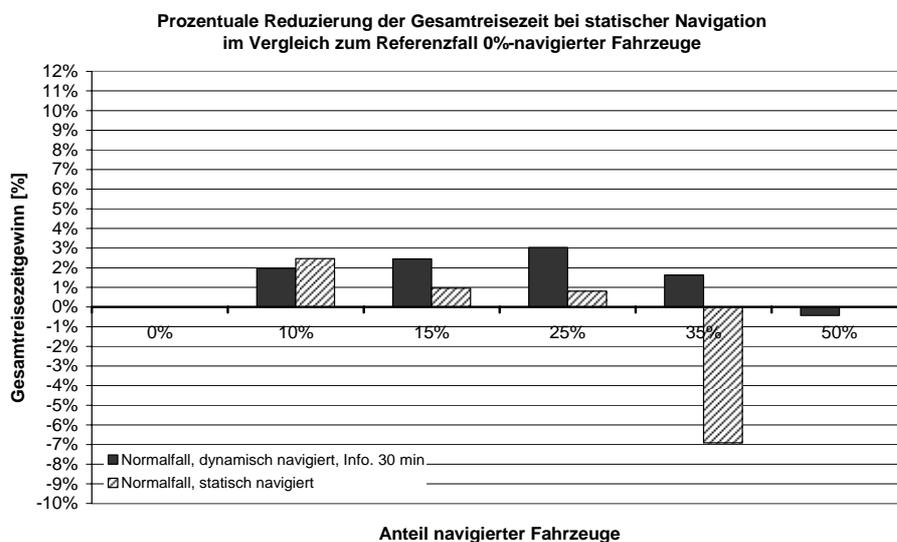
Den bisher vorgestellten Szenarien lag eine dynamische Navigationsweise zugrunde, die eine Erfassung des aktuellen Verkehrszustands auf dem gesamten Netz voraussetzt. Sind diese idealen Voraussetzungen nicht gegeben und es liegen nur aktuelle Informationen auf dem Hauptstraßennetz und für die untergeordneten Straßen statische Werte vor, können nicht mehr so hohe Gesamtzeitreduzierungen erzielt werden. Bei einem Aktualisierungsintervall von 15 Minuten verringert sich der Gewinn von ~ 4 % auf 2,5 % bei einer Ausstattungsrate von 25 % (siehe Bild 9.9). Ein noch deutlicherer Unterschied macht sich bei einem hohen Anteil navigierter Fahrzeuge von 50 % bemerkbar, da die niedrigklassigen Straßen mit relativ geringen statischen Geschwindigkeitswerten belegt sind, so dass Alternativen, die über diese führen, hohe Widerstände haben und daher seltener als Ausweichroute gewählt werden und sich die Verkehrsnachfrage nicht so stark verteilt.



**Bild 9.9: Geringer ausfallender Gesamtreisezeitgewinn im Netz bei dynamischer Navigation nur auf dem Hauptstraßennetz**

### Statische Navigationsweise

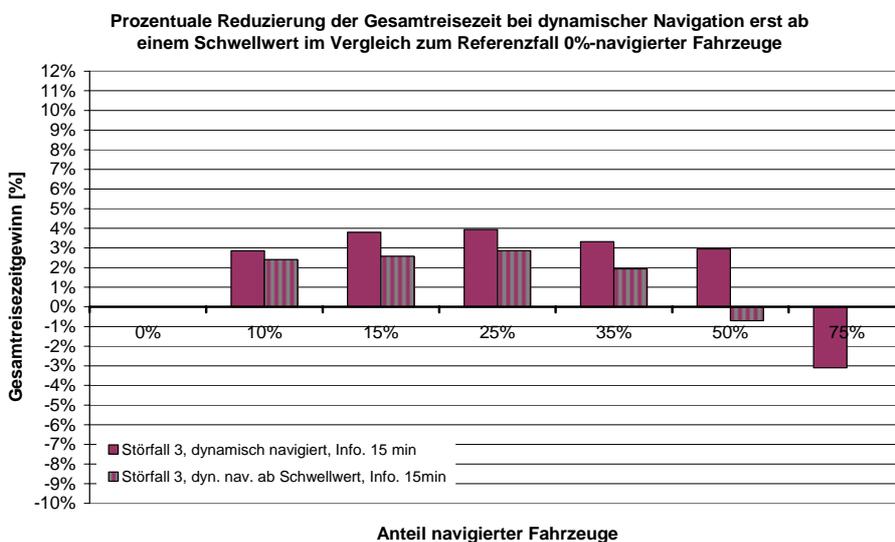
Ein ähnlicher Effekt tritt auch bei statischer Navigation auf. Bei einer geringen Ausstattungsrate von 10 % ergeben sich ähnliche Gesamtreisezeitreduzierungen von ~ 2 % wie bei dynamischer Navigation mit einem großen Aktualisierungsintervall von 30 Minuten. Steigt der Anteil navigierter Fahrzeuge an, werden die Konzentrierung der Fahrzeuge auf wenige Routen und der dadurch bedingte Anstieg der Widerstände auf diesen Strecken nicht berücksichtigt, so dass sich nur noch ein geringer Gesamtreisezeitgewinn einstellt. Bei einer Ausstattungsrate von 35 % wirkt sich die statische Navigationsweise bereits deutlich negativ aus, so dass höhere Gesamtreisezeiten als im Referenzfall von 0 % navigierten Fahrzeugen entstehen, was bei noch größeren Ausstattungsanteilen dazu führt, dass das System in der Simulation zusammenbricht (siehe Bild 9.10).



**Bild 9.10: Geringe und bei mittleren Penetrationsraten bereits negativ ausfallender Gesamtreisezeitgewinn im Netz bei statischer Navigation**

## Dynamische Navigationsweise erst nach Überschreiten eines Schwellwerts

Die Zwischenstufe der dynamischen und der statischen Navigation stellt die Informierung ab einem Schwellwert dar. Die Kostenbestimmung und entsprechend das Routing basiert zunächst auf den statischen Geschwindigkeitswerten. Übersteigt die aktuelle Reisezeit auf einem Link die Reisezeit im unbelasteten Netz um 60 %, wird zur Kostenberechnung die aktuelle statt der statischen Reisezeit verwendet. Bei niedrigen und mittleren Ausstattungsraten werden etwa gleich hohe Gesamtreisezeitgewinne von ~ 2 % bis 3 % erzielt, die somit etwas unter den Werten der dynamischer Navigation liegen, wie der Szenarienvergleich des Störfalls 3 und einer Informierung alle 15 Minuten im Bild 9.11 zeigt. Bei hohen Ausstattungsraten erfolgt allerdings ein verzögertes Reagieren auf überlastete Abschnitte, so dass kein Gesamtreisezeitgewinn resultiert.



**Bild 9.11:** Geringer ausfallende prozentuale Reduzierung der Gesamtreisezeit im Netz bei dynamischer Navigation ab einem Schwellwert durch verzögertes Reagieren

## 9.3 Untersuchungsergebnisse einzelner Verkehrsbeziehungen

### 9.3.1 Normale Verkehrsverhältnisse

Die sich mit zunehmender Penetrationsrate navigierter Fahrzeuge zunächst einstellende Reduzierung der Reisezeiten und die später folgende Umkehrung bei hohen Ausstattungsraten, wie sie bereits bezüglich des Gesamtsystems beschrieben wurde, ist auch in der Analyse einzelner Verkehrsbeziehungen erkennbar.

#### Dynamische Navigationsweise

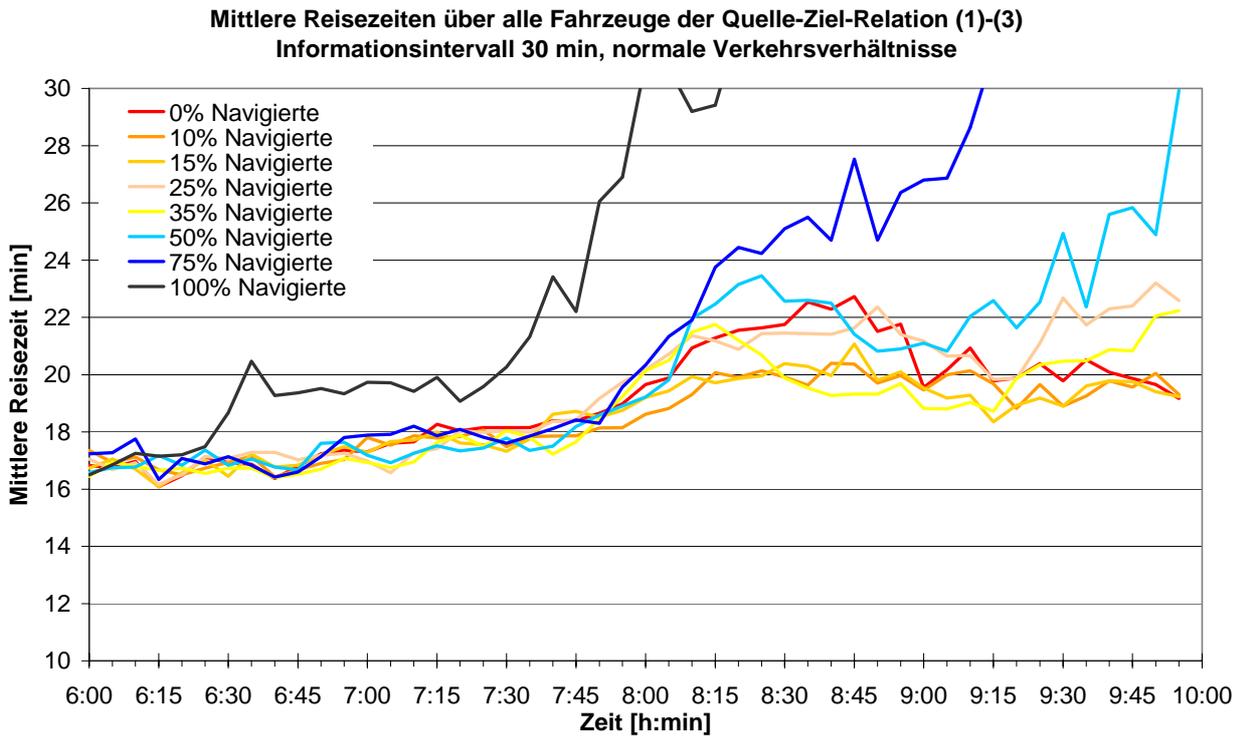
Die Ganglinie der mittleren Reisezeit über alle Fahrzeuge beispielsweise der Verkehrsbeziehung (1)–(3) zeigt aufgrund der höheren Nachfrage im Netz ab 7:45 Uhr bis 8:45 Uhr ein Ansteigen um etwa fünf Minuten und fällt danach wieder, erreicht aber nicht mehr ganz das Ausgangsniveau. Nahezu unabhängig von der Penetrationsrate verändert sich die mittlere Reisezeit in den frühen Stunden bis 7:45 Uhr kaum (siehe Bild 9.12, Bild 9.14, Bild 9.15), da keine Überlastungen in dem befahrenen Netzbereich auftreten und der reisezeitkürzeste Weg, dem

die Navigierten folgen, nur einen marginalen Vorteil gegenüber den diversen Alternativen (siehe Bild 9.20), die die Nicht-Navigierten nutzen, mit sich bringt.

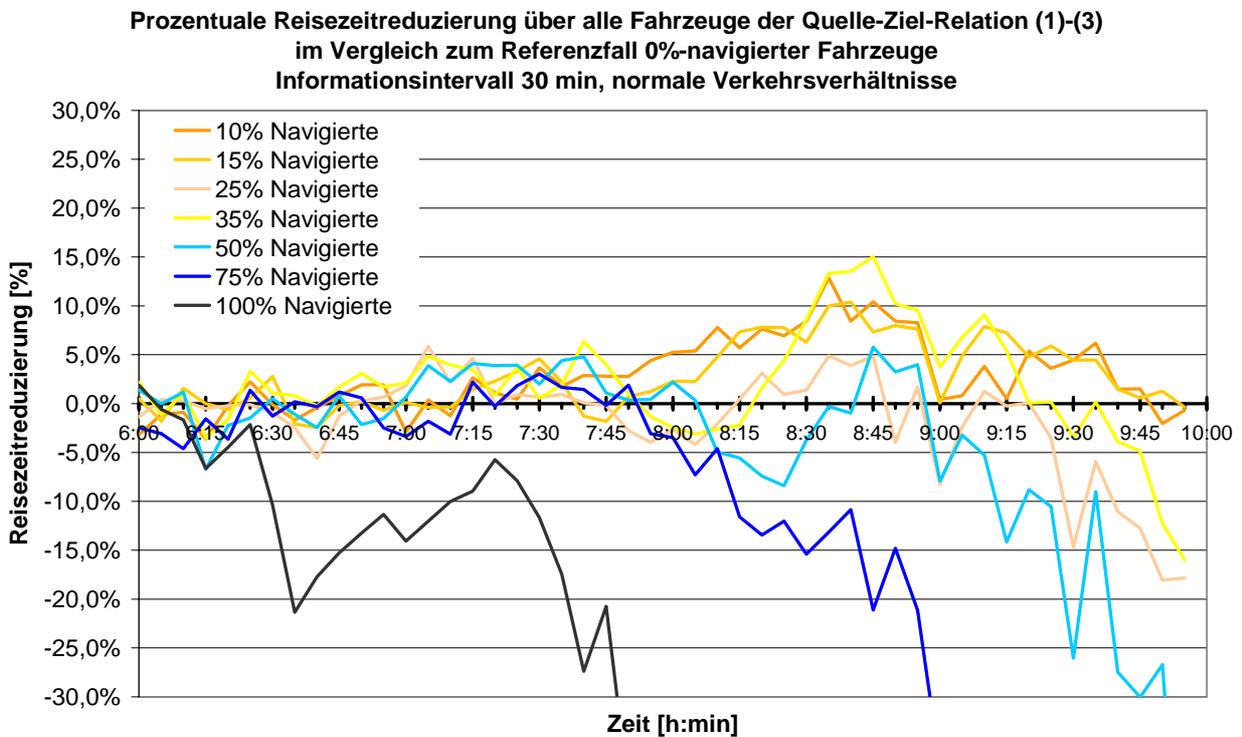
Treten vermehrt Verkehrsbehinderungen auf (ab 7:45 Uhr), steigen die Reisezeiten an, wobei die dynamische Navigation und die damit verbundene Befahrung der reisezeitgünstigsten Alternative dazu führt, dass die Reisezeiten gegenüber dem Referenzfall 0 %-navigierter Fahrzeuge verringert werden können. Im Falle eines Aktualisierungsintervalls von 30 Minuten ist dies bei geringen Penetrationsraten von 10 % oder 15 % der Fall. Steigt die Ausstattungsrate auf 25 % oder 35 %, erhöht sich der Reisezeitvorteil zunächst zwar prozentual auf Werte von bis zu 15 % im Beispiel der Quelle-Ziel-Relation (1)-(3) (siehe Bild 9.13), schrumpft dann aber wieder und kehrt sich sogar in negative Auswirkungen, da sich die Nachfrage zunehmend auf den Bestweg konzentriert und auf dieser Route vermehrt Behinderungen entstehen. Dieser Effekt macht sich aus dem Grund so bemerkbar, weil die Penetrationsrate nicht nur auf der einen betrachteten Quelle-Ziel-Relation ansteigt, sondern sich auf allen Verkehrsbeziehungen des Netzes entsprechend verändert. Da sich die Bestwege unterschiedlicher Verkehrsbeziehungen in großen Teilen überlagern, geht die Verteilung der Nachfrage über das Netz zurück und es findet eine Konzentration auf bestimmte Streckenabschnitte statt, die Verkehrsbehinderungen hervorrufen kann. In hohen und sehr hohen Penetrationsraten von 50 % und mehr treten so große Stauungen auf, dass sich die mittlere Reisezeit gegenüber dem Fall keiner Navigation sogar erhöht.

Der extrem hohe Reisezeitanstieg bei Anteilen von 75 % oder 100 % navigierter Verkehrsteilnehmer ist, wie bereits zuvor auch schon bei Betrachtung der Auswirkungen auf das Gesamtnetz erläutert, auf die großen gegenseitigen Behinderungen der Fahrzeuge zurückzuführen, die in der Simulation nicht mehr aufgelöst werden können und das System zum Teil zum Zusammenbrechen bringen. Die Simulationsergebnisse in diesen Bereichen sind auch bei der Betrachtung einzelner Verkehrsbeziehungen in ihren Absolutwerten nicht mehr belastbar und werden daher nur als Tendenzen behandelt.

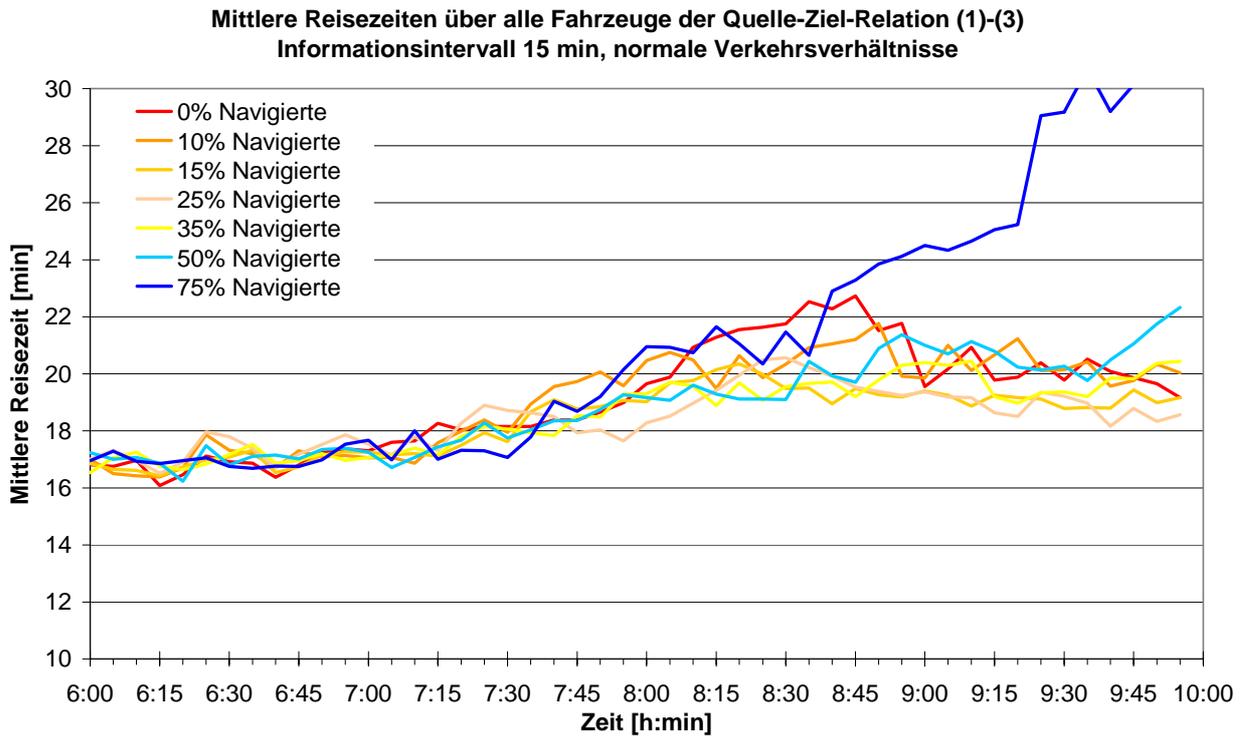
Verkürzt man das Aktualisierungsintervall auf 15 Minuten (siehe Bild 9.14) oder fünf Minuten (siehe Bild 9.15), werden die navigierten Verkehrsteilnehmer zeitnaher entsprechend der sich ändernden Verkehrsverhältnisse geleitet. Über die Zeit gesehen findet ein häufigerer Wechsel des aktuellen Bestwegs statt, so dass eine stärkere Verteilung des Verkehrs stattfindet (siehe Bild 9.17, Bild 9.18, Bild 9.19; die Abbildungen zeigen die Positionen der analysierten Fahrzeuge in 1 min-Schritten). Dadurch kann eine Reisezeitreduzierung von 10 % bis 20 % gegenüber dem Fall, dass kein Fahrzeug navigiert ist, erreicht werden (siehe Bild 9.16). Die Penetrationsschwelle, ab der sich eine Navigation der Verkehrsteilnehmer negativ auf die resultierenden Reisezeiten auswirkt, kann durch Verkürzung des Aktualisierungsintervalls in deutlich höhere Bereiche verschoben werden (siehe Bild 9.16). Dieser Umkehrbereich liegt bei einem 30-Minuten-Intervall schon bei 25 % bis maximal 35 %, wohingegen bei 5-Minuten-Informationsschritten noch Raten von 50 % Navigierten meist vorteilhaft bewältigt werden können.



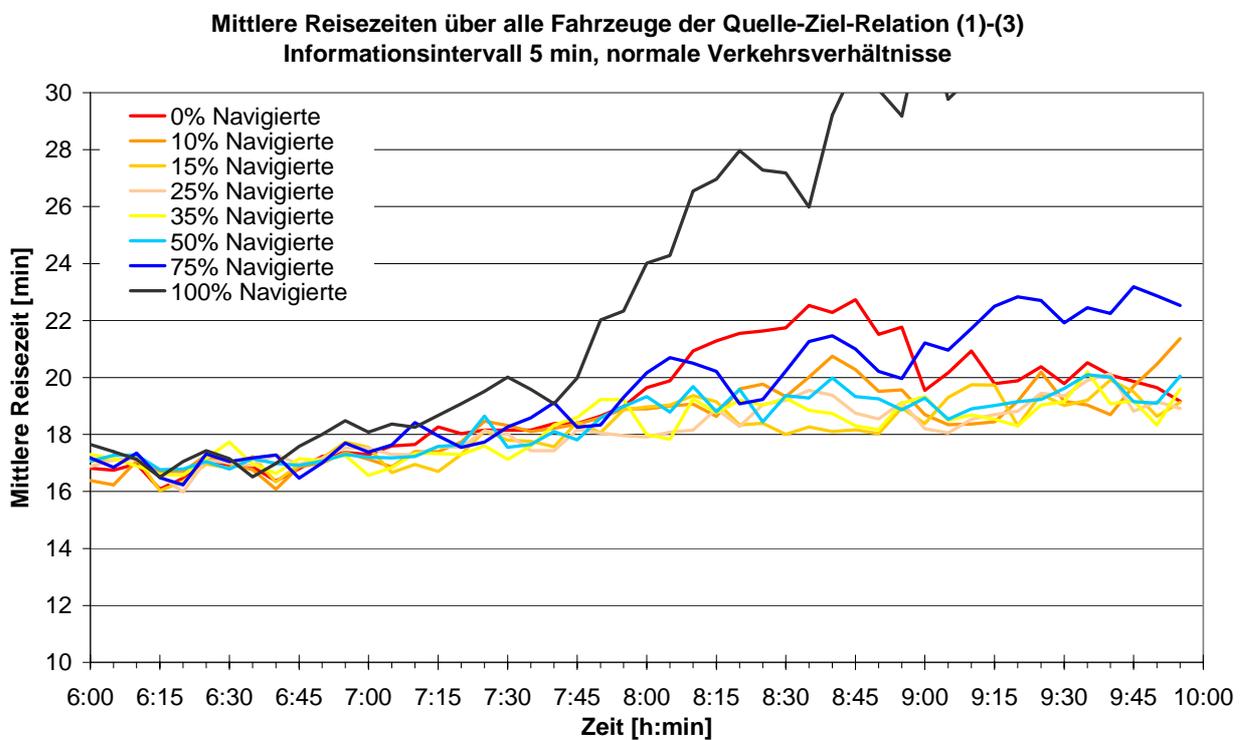
**Bild 9.12: Mittlere Reisezeiten der Fahrzeuge der Quelle-Ziel-Relation (1)-(3) bei unterschiedlichen Penetrationsraten, Informationsintervall 30 min, normale Verkehrsverhältnisse**



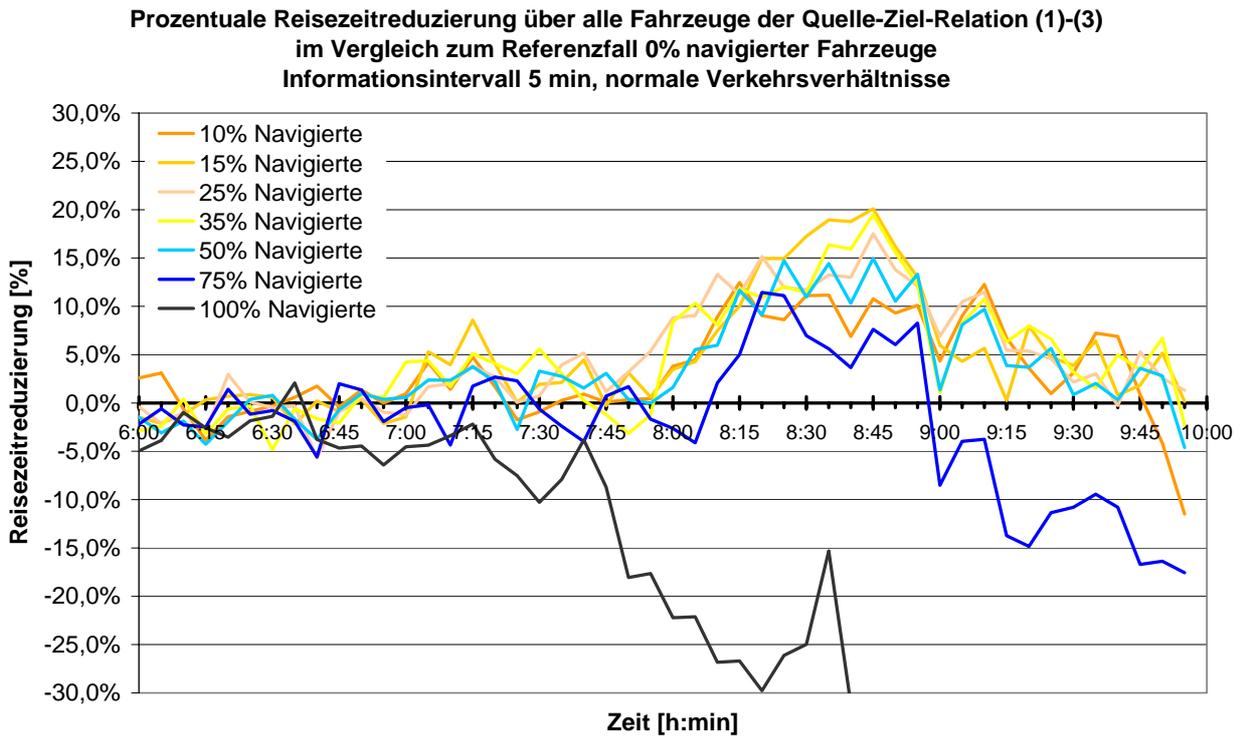
**Bild 9.13: Prozentuale Reisezeitreduzierung der Fahrzeuge der Quelle-Ziel-Relation (1)-(3) Informationsintervall 30 min, normale Verkehrsverhältnisse**



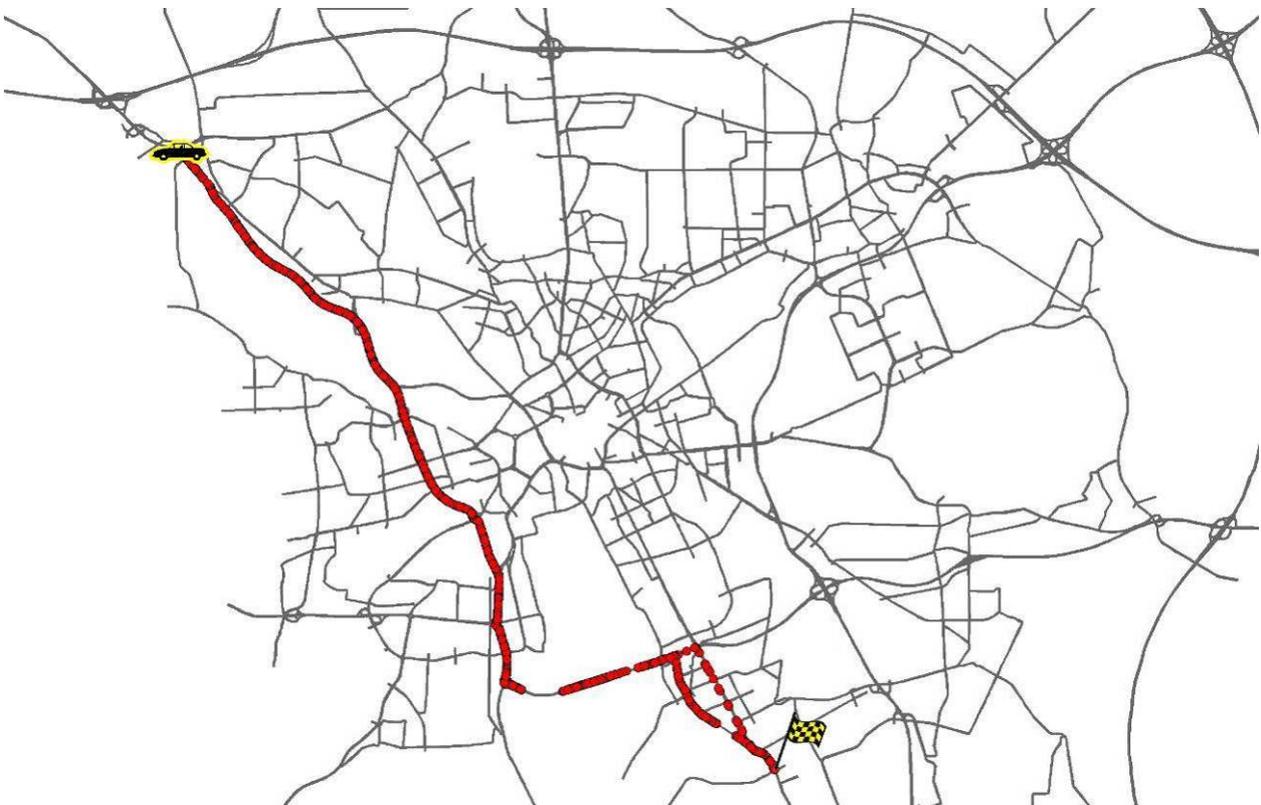
**Bild 9.14:** Reduzierung der mittlere Reisezeiten der Fahrzeuge der Quelle-Ziel-Relation (1)-(3) bei einem Informationsintervall von 15 min, normale Verkehrsverhältnisse



**Bild 9.15:** Deutliche Reduzierung der mittlere Reisezeiten der Fahrzeuge der Quelle-Ziel-Relation (1)-(3) insbesondere bei hohen Penetrationsraten, 5 min-Informationsintervall



**Bild 9.16:** Deutliche Verschiebung des Einsetzens negativer Auswirkungen in höhere Penetrationsbereiche, Quelle-Ziel-Relation (1)-(3), 5 min-Informationsintervall



**Bild 9.17:** Routen der dynamisch navigierten Pkw der Quelle-Ziel Relation (1)-(3) bei 35 % Penetrationsrate, Informationsintervall 30 min



**Bild 9.18:** Veränderungen des Bestwegs der dynamisch navigierten Pkw der Quelle-Ziel Relation (1)–(3) über die Zeit durch Verkürzung des Informationsintervalls auf 15 min



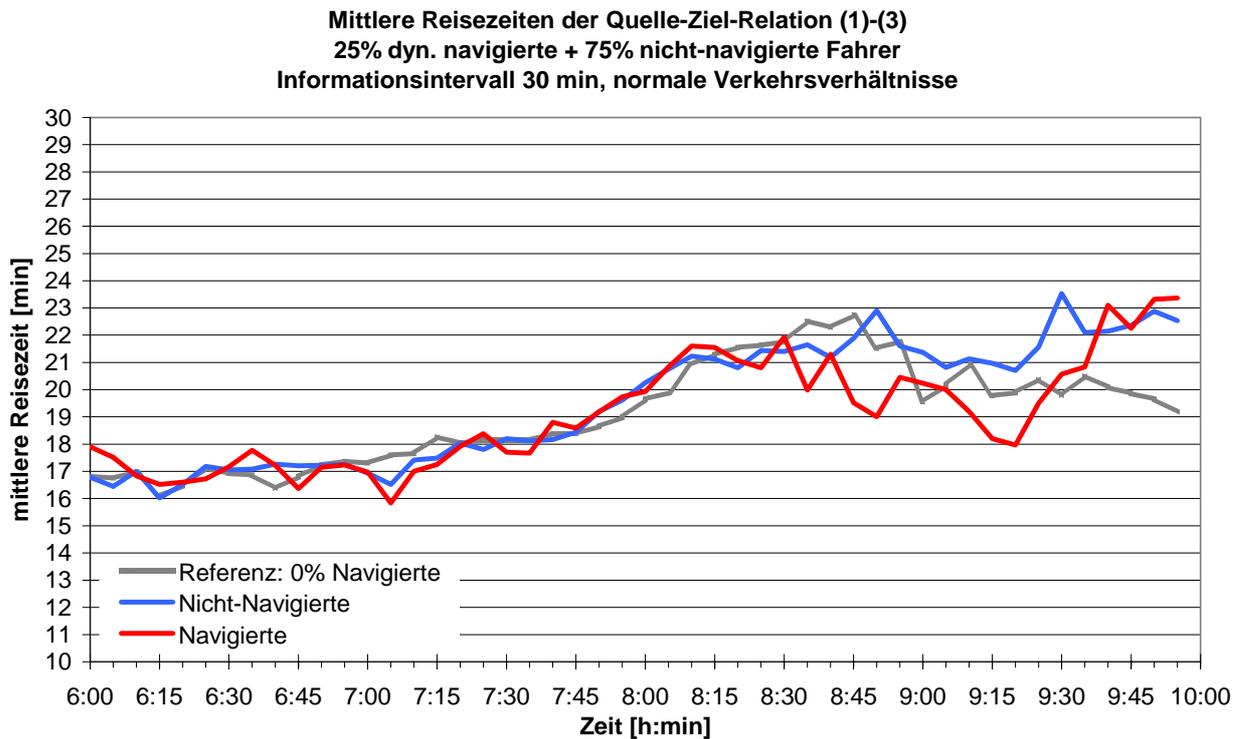
**Bild 9.19:** Veränderungen des Bestwegs der dynamisch navigierten Pkw der Quelle-Ziel Relation (1)–(3) über die Zeit durch Verkürzung des Informationsintervalls auf 5 min



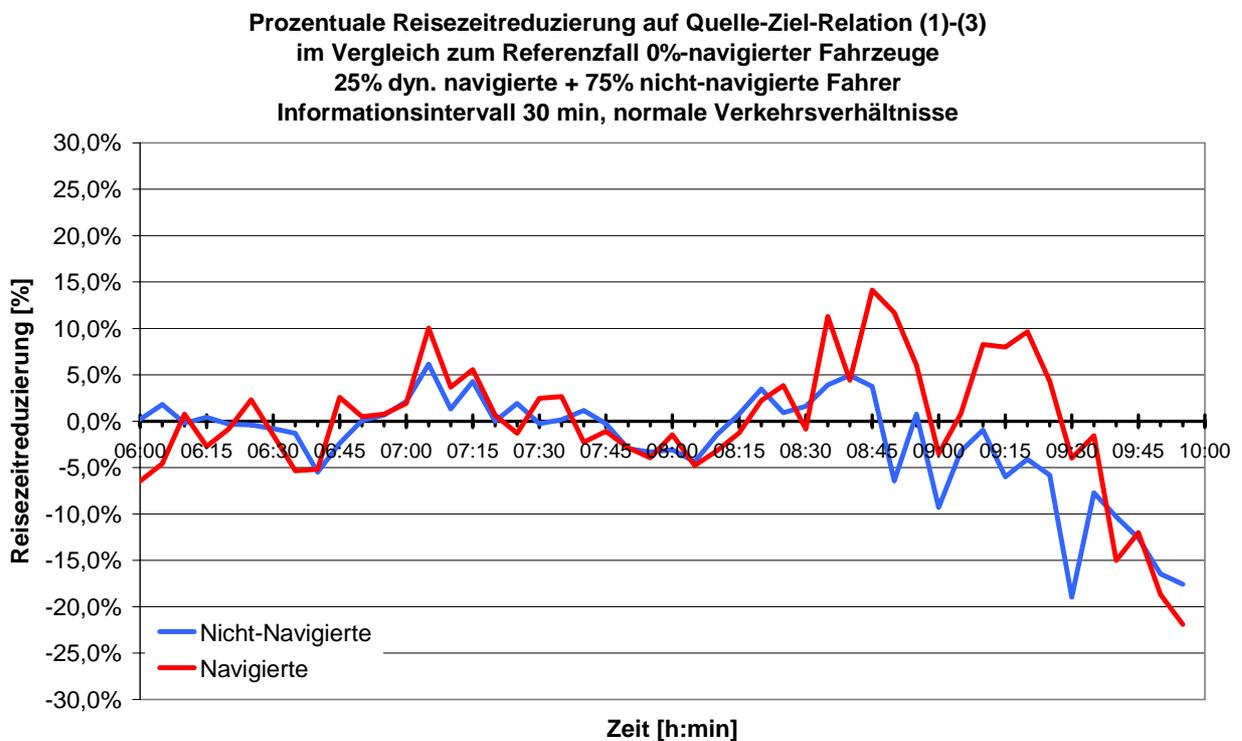
**Bild 9.20: Routen der nicht navigierten Pkw der Quelle-Ziel Relation (1)–(3)**

Differenziert man die mittleren Reisezeiten aller Fahrzeuge einer Verkehrsbeziehung in die Fahrtzeiten, die die Navigierten und die Nicht-Navigierten erleben, werden die Auswirkungen des Aktualisierungsintervalls deutlich sichtbar. Bei dem langen Intervall von 30 Minuten (siehe Bild 9.21) steigen die Reisezeiten der Navigierten mit Zunahme der Verkehrsnachfrage ab 7:45 Uhr ähnlich der der Nicht-Navigierten an. Erst stark verzögert werden die navigierten Verkehrsteilnehmer umgelenkt, so dass deren Reisezeiten ab etwa 8:30 Uhr wieder absinken, wohingegen die Nicht-Navigierten weiterhin höhere Fahrzeiten erleben. Die Navigierten erfahren dadurch einen prozentualen Reisezeitvorteil von bis zu zehn Prozent im Vergleich zum Referenzfall 0 %-navigierter Fahrzeuge, wohingegen die Nicht-Navigierten keinen Vorteil oder sogar leichte Verschlechterungen erfahren (siehe Bild 9.22).

Bei kürzeren Aktualisierungszeitschritten von 15 Minuten (siehe Bild 9.23) oder fünf Minuten (siehe Bild 9.24) erfolgt ein Umlenken rascher, so dass das Ansteigen der Reisezeiten verringert werden kann. Die Routenveränderung der Navigierten wirkt sich auch positiv auf die Nicht-Navigierten aus, da die Verkehrsdichte reduziert wird, weniger Behinderungen auftreten und somit auch die Reisezeiten der nicht navigierten Verkehrsteilnehmer um bis zu zehn Prozent unter denen liegen, die im Referenzfall 0 %-Navigierter resultieren (siehe Bild 9.25). Im Falle von fünf Minuten-Aktualisierungsintervallen kann das Ansteigen der Reisezeiten für beide Gruppen noch weiter gedämpft werden (siehe Anhang Bild E.9).

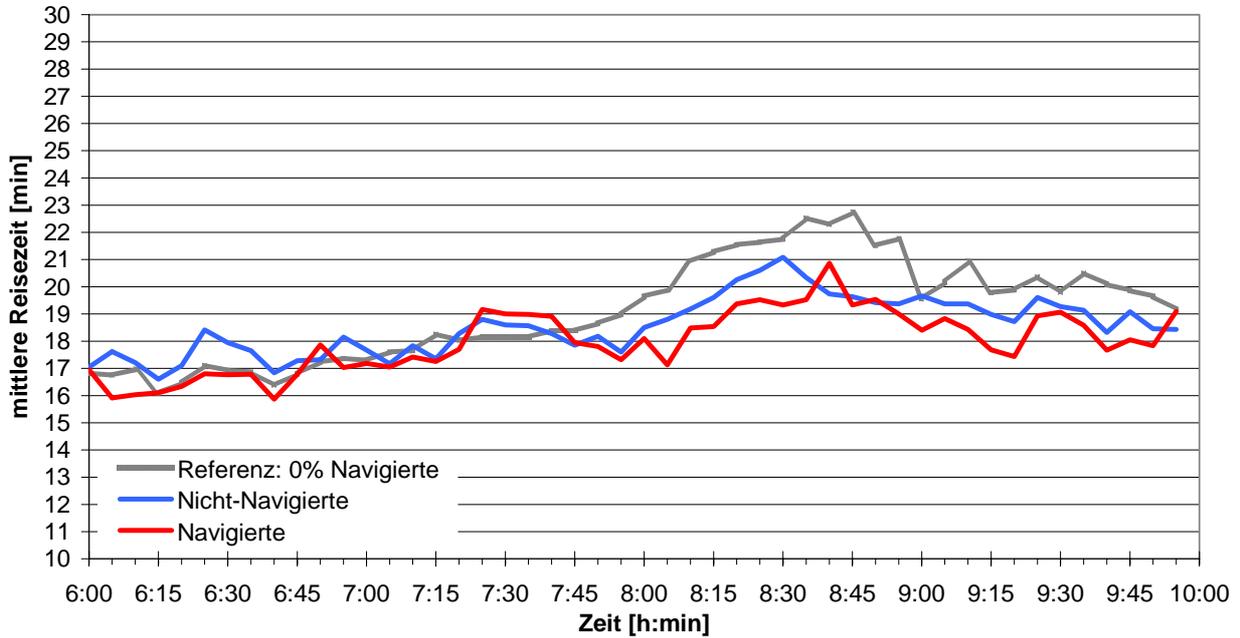


**Bild 9.21:** Sehr ähnliche mittlere Reisezeiten der Nicht-Navigierten und Navigierten der Quelle-Ziel-Relation (1)–(3) bei einem Informationsintervall von 30 min



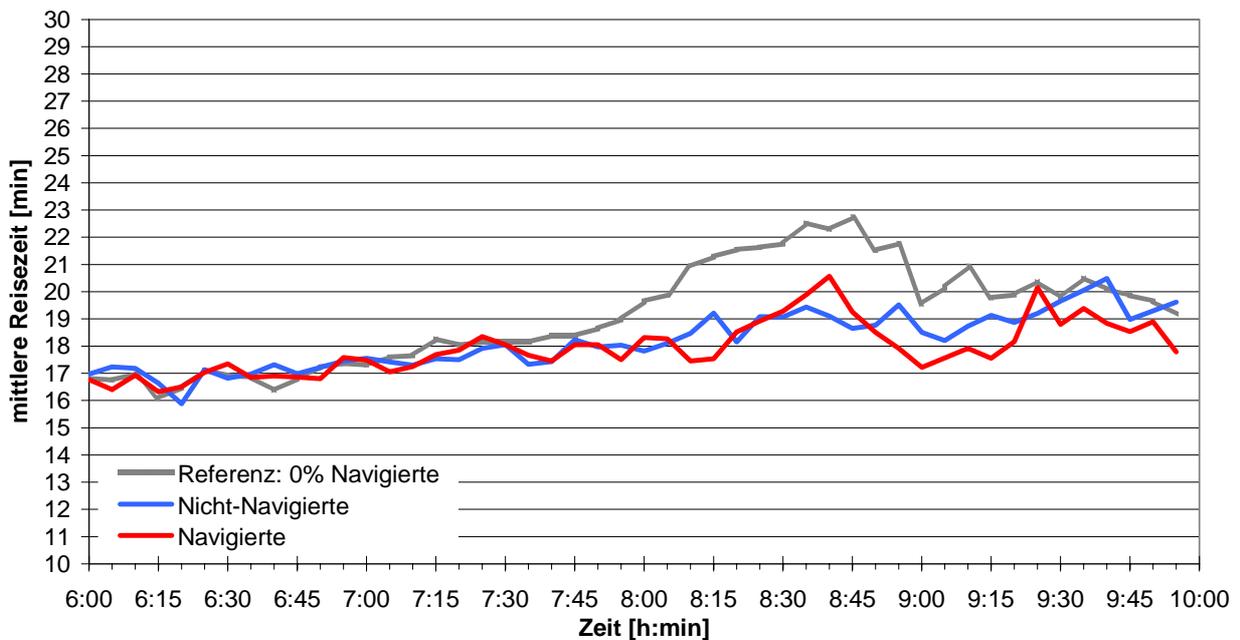
**Bild 9.22:** Prozentuale Reisezeitreduzierung der Nicht-Navigierten und Navigierten der Quelle-Ziel-Relation (1)–(3) bei einem Informationsintervall von 30 min

Mittlere Reisezeiten der Quelle-Ziel-Relation (1)-(3)  
 25% dyn. navigierte + 75% nicht-navigierte Fahrer  
 Informationsintervall 15 min, normale Verkehrsverhältnisse

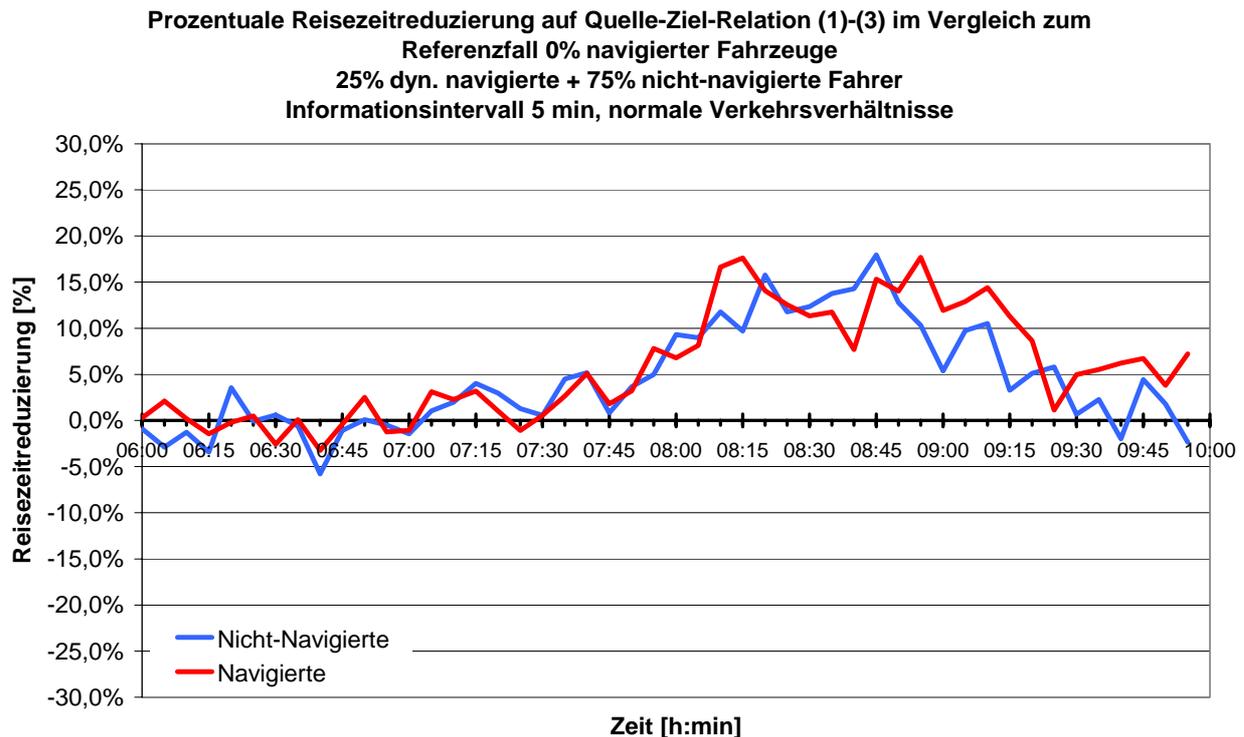


**Bild 9.23:** Rascheres Umlenken und dadurch bedingte Reduzierung der mittlere Reisezeiten bei einem kürzeren Aktualisierungsintervall von 15 min

Mittlere Reisezeiten der Quelle-Ziel-Relation (1)-(3)  
 25% dyn. navigierte + 75% nicht-navigierte Fahrer  
 Informationsintervall 5 min, normale Verkehrsverhältnisse



**Bild 9.24:** Deutliche Dämpfung des Anstiegs der mittleren Reisezeiten der Nicht-Navigierten und Navigierten bei einem Informationsintervall von 5 min



**Bild 9.25:** Deutliche prozentuale Reisezeitreduzierung für die Nicht-Navigierten wie auch für die Navigierten der Quelle-Ziel-Relation (1)–(3) bei einem Informationsintervall von 5 min

Die sich einstellenden Reisezeitvorteile ergeben sich nicht auf allen Verkehrsbeziehungen in gleicher Weise. Ist ein deutlicher Bestweg vorhanden, so dass auch die Nicht-Navigierten vornehmlich diesen befahren, lässt sich nur ein sehr geringer oder sogar kein Vorteil durch Navigation erzielen. Die Konzentration auf eine Alternative kann dabei netzbedingt sein oder auch aus der tageszeitabhängigen Verkehrsbelastung resultieren. Verläuft die Route beispielsweise entgegen des momentan vorherrschenden Richtungsbezugs (z. B. morgens aus dem Zentrum an den Stadtrand), ist die Belastung meist deutlich geringer, so dass weniger Verkehrsbehinderungen entstehen und ein zeitabhängiger Wechsel auf Ausweichrouten nicht notwendig ist. Beispiele hierfür sind von den untersuchten Verkehrsbeziehungen die Quelle-Ziel-Relationen (1)-(2) und (4)-(3), deren detaillierte Auswertung Anhang E.1 und Anhang E.5 enthält. Das Reagieren der Reisezeiten auf Veränderungen im Aktualisierungsintervall und in der Penetrationsrate ist bei diesen Quelle-Ziel-Beziehungen kaum ausgeprägt. Erst bei hohen Ausstattungsraten von 50 % und mehr werden negative Effekte deutlich.

Handelt es sich dagegen um weiter voneinander entfernte Verkehrsbeziehungen (v. a. Durchfahrten des Netzes) können die Reisezeitunterschiede sehr deutlich ausfallen. Da hier wegkurze Alternativen, die durch den städtischen Bereich führen, gegen Umfahrungen des Zentrums, die meist deutlich länger sind, konkurrieren, spielt der momentane Verkehrszustand eine entscheidende Rolle. In Abhängigkeit der Uhrzeit kann bei einer noch geringen Auslastung des Straßennetzes die Stadtroute reisezeitgünstiger sein, sobald die Verkehrsnachfrage aber ansteigt und Stauungen auftreten, eine zwar längere, dafür aber zügiger zu befahrende Route, vorteilhafter sein. Da die Ausprägungen sehr zeitvariant sind, wirkt sich einerseits das gewählte Aktualisierungsintervall deutlich aus, andererseits spielt auch die Penetrationsrate eine entscheidende Rolle, da sich bei Navigation eines größeren Anteils von Verkehrsteilnehmern die

Belastungsverteilung deutlich ändert und Verkehrsbehinderungen an anderen Stellen und in anderer Ausprägung resultieren. Die deutliche Abhängigkeit ist neben der zuvor dargestellten Quelle-Ziel-Beziehung (1)-(3) auch an den Ergebnissen der umgekehrten Richtung von (3) nach (1) abzulesen, die in Anhang E.3 dargestellt sind.

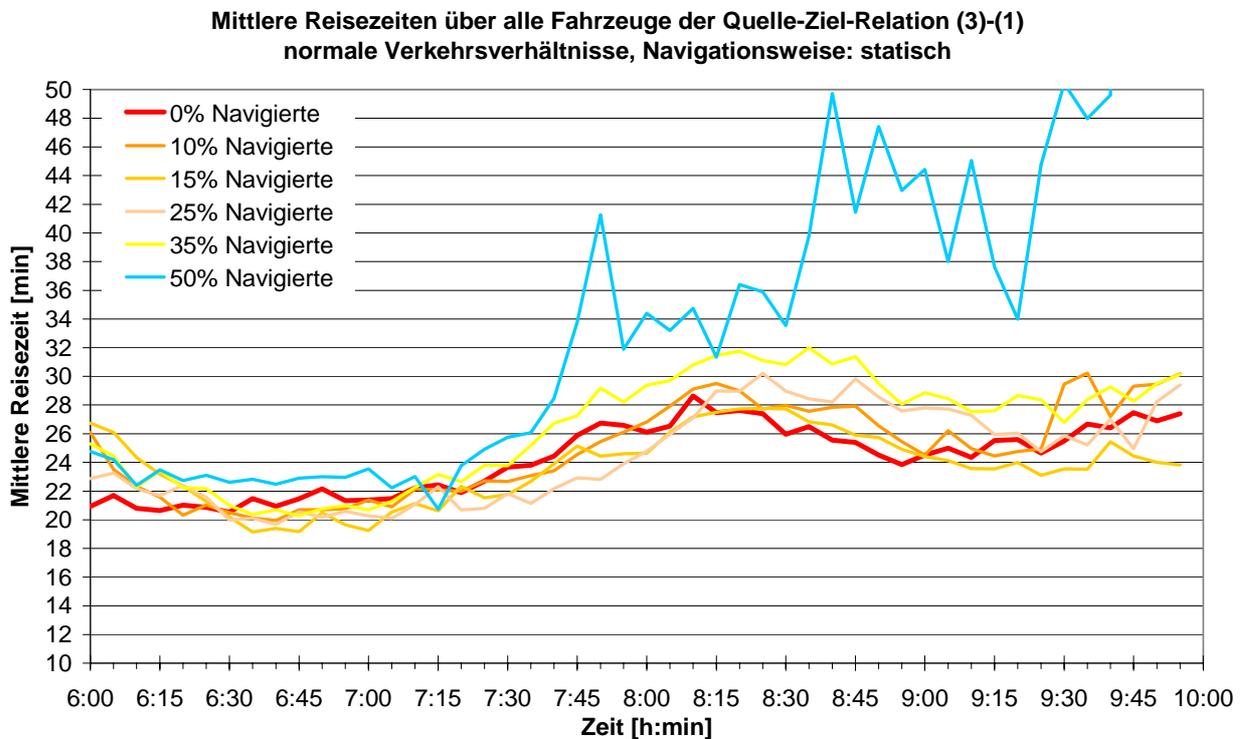
### **Statische Navigationsweise**

Zeitabhängige Veränderungen werden bei statischer Navigation nicht berücksichtigt. Umso mehr haben Konzentrationen der Verkehrsnachfrage auf einzelnen Netzabschnitten und die dadurch resultierenden Verkehrsbehinderungen einen großen Einfluss auf den Nutzen der Navigation. Ist die Nachfrage gering, vermögen die durchschnittlichen Reisegeschwindigkeiten der einzelnen Straßenklassen, auf denen die statische Navigation beruht, die realen Bedingungen widerzuspiegeln. Bei geringen Penetrationsraten lässt sich daher oftmals ein Reisezeitgewinn für die Navigierten und gegebenenfalls auch mit positiven Auswirkungen auf das gesamte Verkehrsgeschehen erzielen, da durch die Navigation der Verkehrszustand im Netz noch nicht entscheidend verändert wurde. Steigt der Anteil der Navigierten aber an, treten ein stärkeres Gleichverhalten und eine Konzentration auf vor allem höherrangigen Abschnitten auf, die bedingt durch die statischen Daten in der Navigation aber keine Berücksichtigung findet. Navigierte können dadurch sogar deutlich längere Reisezeiten erfahren als die Nicht-Navigierten, die sich auf unterschiedliche Routen aufteilen.

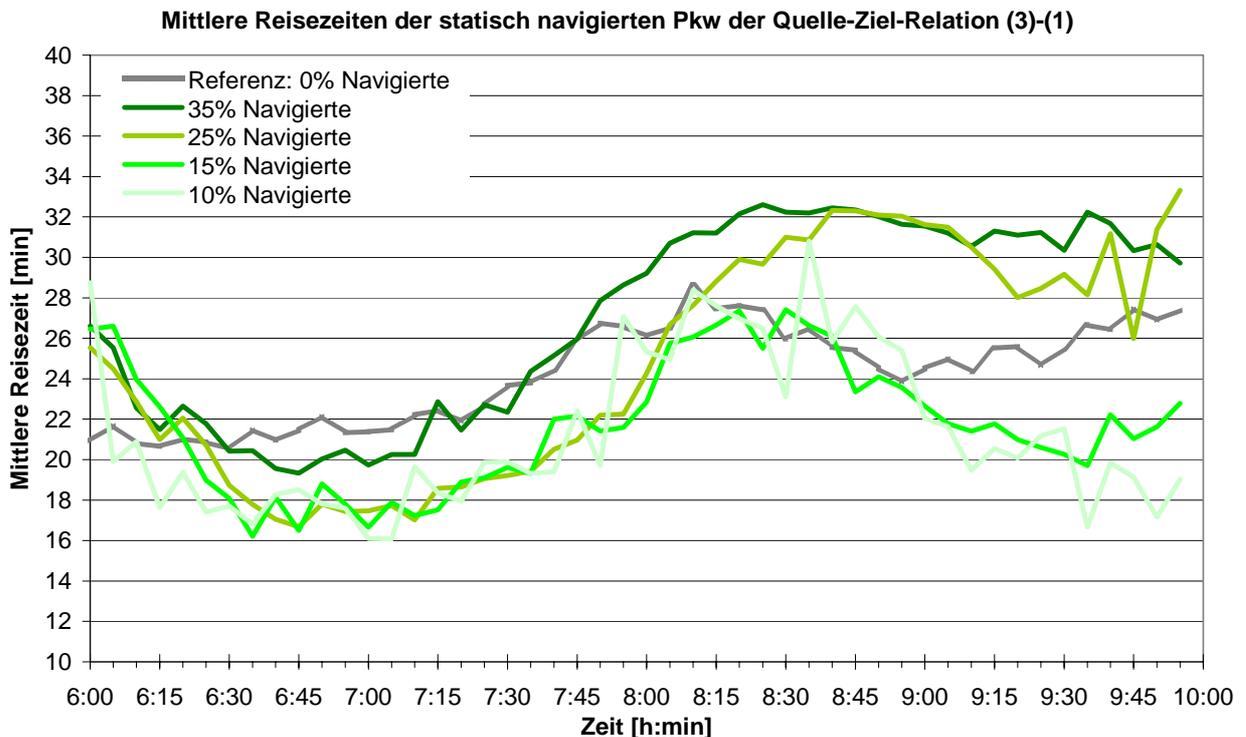
Die Auswirkungen der statischen Navigation auf die mittleren Reisezeiten über alle Fahrzeuge sind in Bild 9.26 beispielhaft für die Quelle-Ziel-Relation (3)-(1) dargestellt. Der Vergleich der Reisezeiten bei unterschiedlichen Penetrationsraten zeigt, dass im Falle von 10 % Navigierten sehr geringe Reisezeitvorteile erzielt werden, die sie sich bei einem Anteil von 15 % bereits wieder auf dem Niveau des Referenzfalls 0 %-Navigierter bewegen. Steigt die Ausstattungsrate auf 25 % oder 35 % an, verlängern sich die Reisezeiten deutlich gegenüber dem 0 %-Fall. Ein Anteil von 50 % statisch Navigierter wirkt sich bereits so negativ auf den Netzzustand aus, dass die starken Verkehrsbehinderungen die Simulation teilweise zum Erliegen bringen. Die dargestellten Werte sind daher in ihren Absolutwerten nicht mehr aussagekräftig, verdeutlichen aber, dass eine statische Navigationsweise im städtischen Bereich bei hohen Ausstattungsraten nicht mehr die eigentlich gewünschten Effekte der Navigation zu erzielen vermag und somit nicht mehr sinnvoll anwendbar ist.

Hohe Anteile statisch Navigierter wirken sich nicht nur auf die mittleren Reisezeiten über alle Fahrzeuge einer Beziehung negativ aus. Die zeitinvariante Festlegung auf eine Route bei statischer Navigation (siehe Bild 9.29 und Bild 9.30) bewirkt, dass bei niedrigen Penetrationsraten und vor allem in Zeiten geringerer Verkehrsnachfrage (vor 7:30 Uhr und nach 9:00 Uhr) die statisch Navigierten einen Reisezeitvorteil, in diesem Fall von bis zu 20 % gegenüber dem Referenzfall von 0 %-navigierten Fahrzeugen, erfahren können (siehe Bild 9.27 und Bild 9.28). Bei 25 % oder 35 % Ausstattungsrate liegen die Reisezeiten anfänglich nur noch gering unter denen des Referenzfalls. Mit dem Ansteigen der Verkehrsnachfrage (ab 7:30 Uhr) und der dadurch bedingten Konzentration auf einigen Streckenabschnitten erhöhen sich die Fahrzeiten deutlich und erreichen Werte, die um 30 % über denen des 0 %-Falls liegen können. Die entstehenden Verkehrsstörungen sind so stark und lösen sich aufgrund der festen Befolgung des statischen Bestwegs der navigierten Verkehrsteilnehmer auch nur langsam auf, dass die Reise-

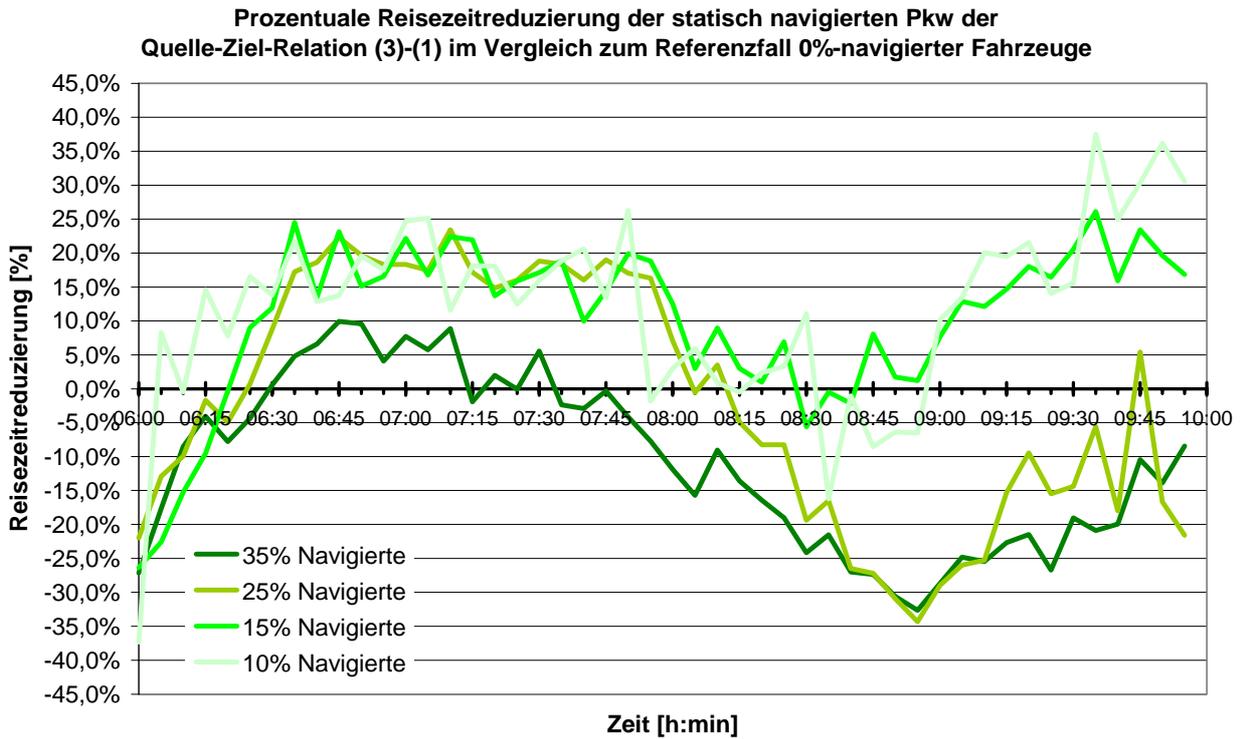
zeiten auch nach Rückgang der Verkehrsnachfrage (ab 9:00 Uhr) auf hohem Niveau bleiben und nur langsam wieder zurückgehen (siehe Bild 9.27).



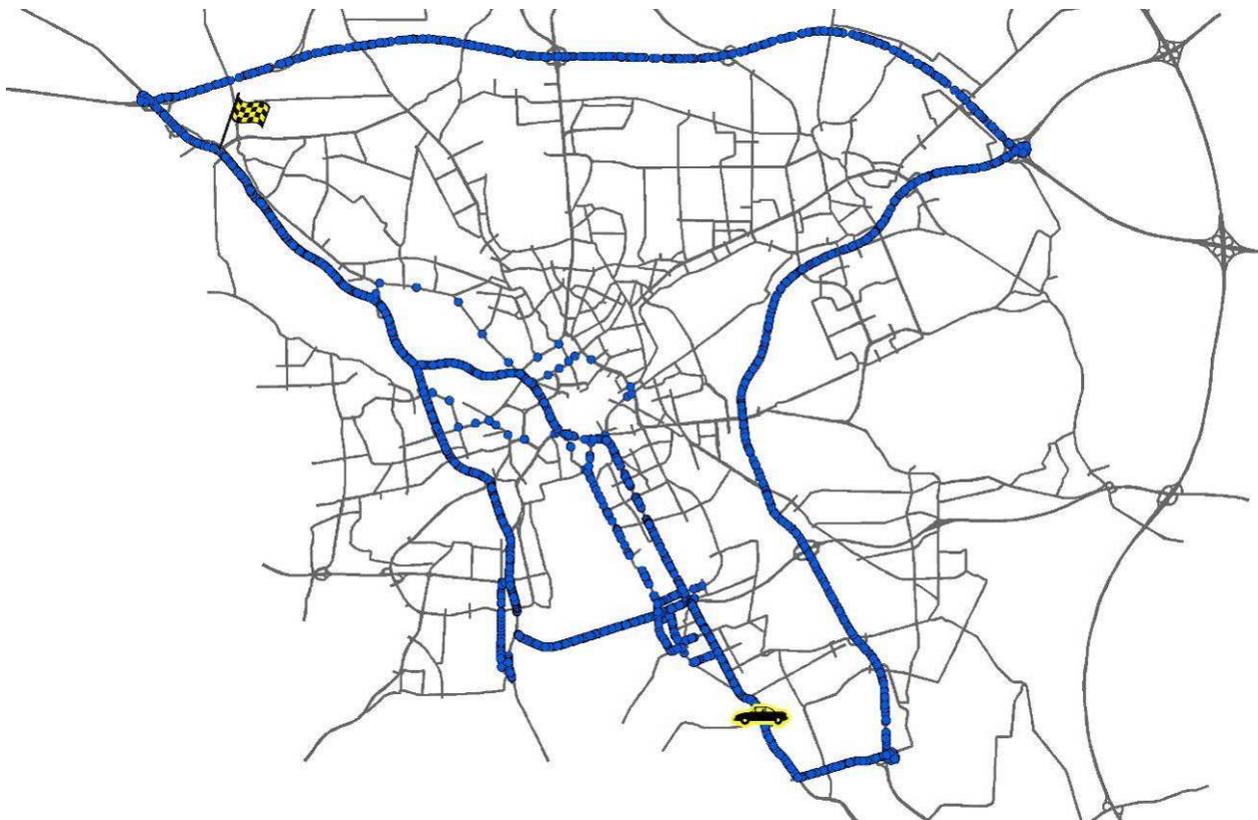
**Bild 9.26:** Mittlere Reisezeiten der Fahrzeuge der Quelle-Ziel-Relation (3)-(1) bei unterschiedlichen Penetrationsraten, normale Verkehrsverhältnisse, Navigationsweise: statisch



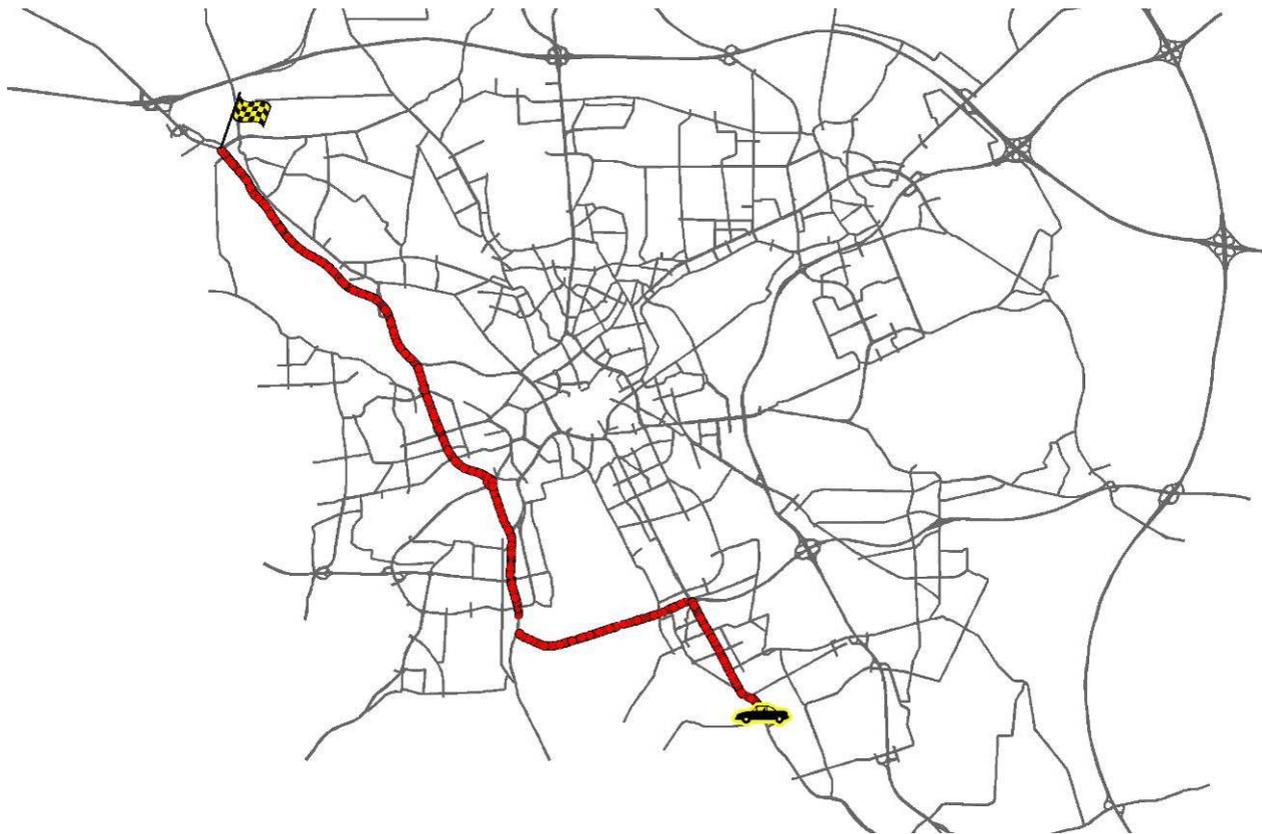
**Bild 9.27:** Deutlicher Reisezeitvorteil der statisch Navigierten bei niedrigen Ausstattungsraten im Vergleich zu starken Negativeffekten bei mittleren Penetrationsraten



**Bild 9.28:** Deutlicher Reisezeitvorteil der statisch Navigierten bei niedrigen Ausstattungsraten im Vergleich zu starken Negativeffekten bei mittleren Penetrationsraten

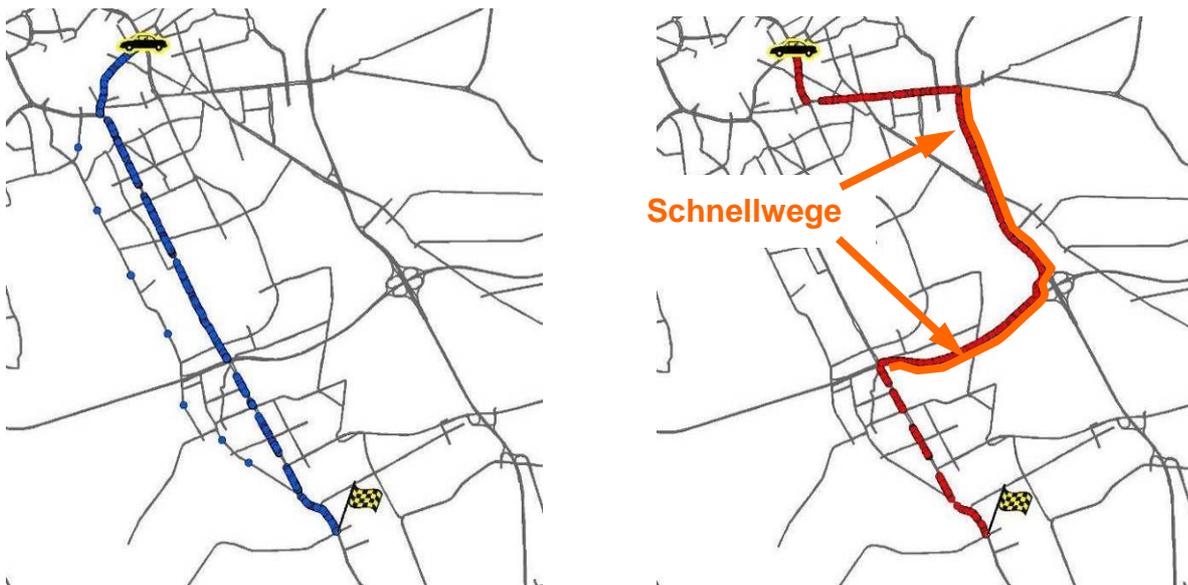


**Bild 9.29:** Routen der nicht navigierten Pkw der Quelle-Ziel Relation (3)-(1) bei 25 % Penetrationsrate



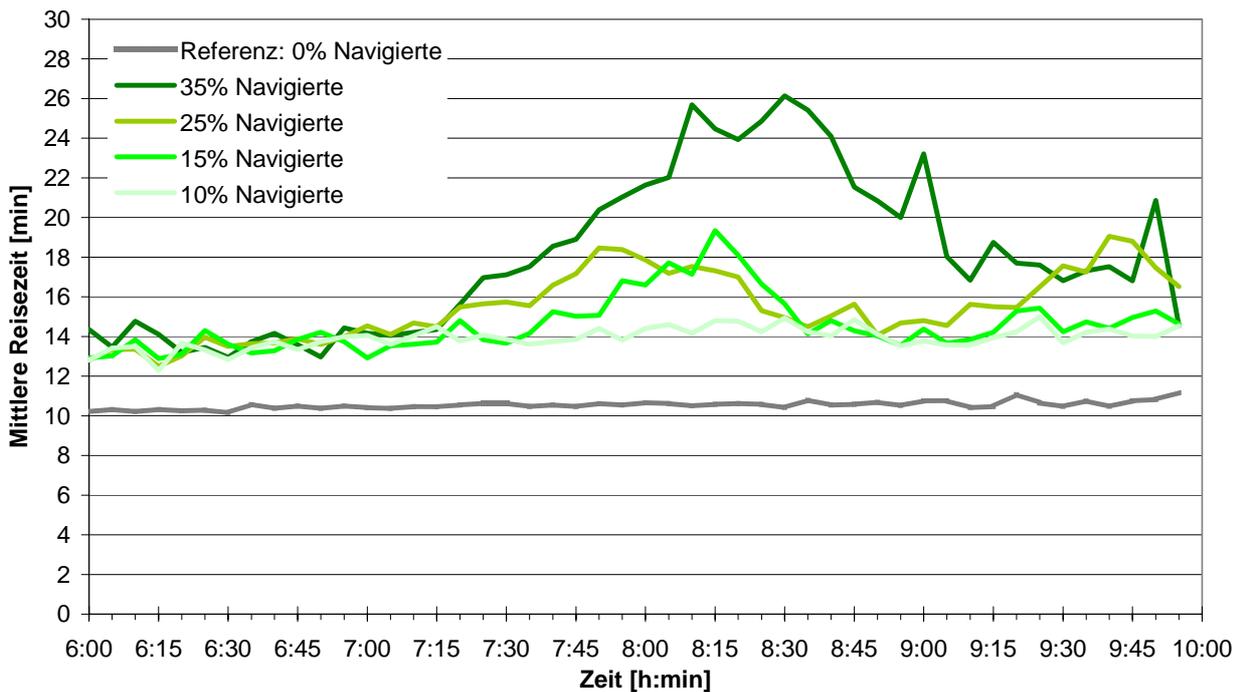
**Bild 9.30:** Route der statisch navigierten Pkw der Quelle-Ziel Relation (3)–(1)

Im Falle niedriger Penetrationsraten bewirkt die statische Navigationsweise aber nicht zwangsläufig Reisezeitvorteile der Navigierten gegenüber den Nicht-Navigierten. Die der statischen Navigation hinterlegten festen Geschwindigkeitswerte je Straßenklasse bewirken eine Präferenz höherrangiger Straßen. Bei Quelle-Ziel-Beziehung (4)-(3) beispielsweise führt der deutliche Bestweg bei normalen Verkehrsverhältnissen über die Hildesheimer Straße (Straßenklasse Hauptverkehrsstraße), der auch von den Nicht-Navigierten gewählt wird (siehe Bild 9.31 links und Anhang E.5). Die Route zwischen Quelle (4) und Ziel (3), die in Teilen über den Messe- bzw. Südschnellweg führt (siehe Bild 9.31 rechts), wird bei der statischen Navigation aber als günstiger bewertet. Sie ist zwar weglänger, da Schnellwege aber mit deutlich höheren Geschwindigkeitswerten ( $v = 80$  [km/h], siehe auch Tab. 8.1) belegt sind als Hauptverkehrsstraßen ( $v = 50$  [km/h]), fällt die Auswahl der statischen Zielführung auf diese Route. Da die tatsächlichen Reisezeiten aber von den statisch angenommenen abweichen, resultieren für die Navigierten auch bei niedrigen Ausstattungsraten höhere Reisezeiten (siehe Bild 9.32).



**Bild 9.31:** Routen der nicht navigierten (links) und der statisch navigierten Pkw (rechts) der Quelle-Ziel Relation (4)–(3) bei 35 % Penetrationsrate

**Mittlere Reisezeiten der statisch navigierten Pkw der Quelle-Ziel-Relation (4)-(3)**



**Bild 9.32:** Längere Reisezeiten der Navigierten durch unvorteilhafte statische Zielführung

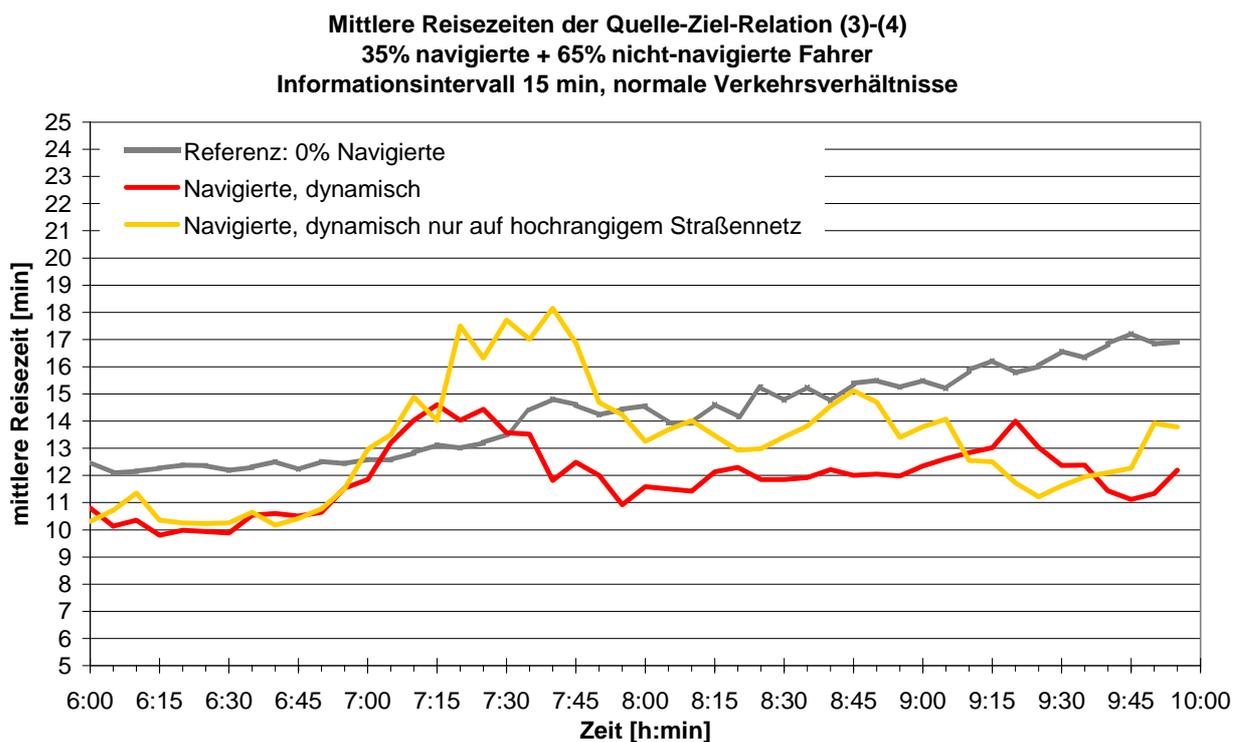
**Dynamische Navigationsweise nur auf hochrangigem Straßennetz**

Eine Zwischenstufe der vollständig dynamischen und der statischen Navigationsweise stellt die Form dar, bei der die aktuellen tatsächlichen Reisezeiten nur auf dem hochrangigen Straßennetz bis zur Straßenklassen ‚Hauptverkehrsstraße‘ vorliegen und für das untergeordnete Netz auf die statischen Werte zurückgegriffen wird.

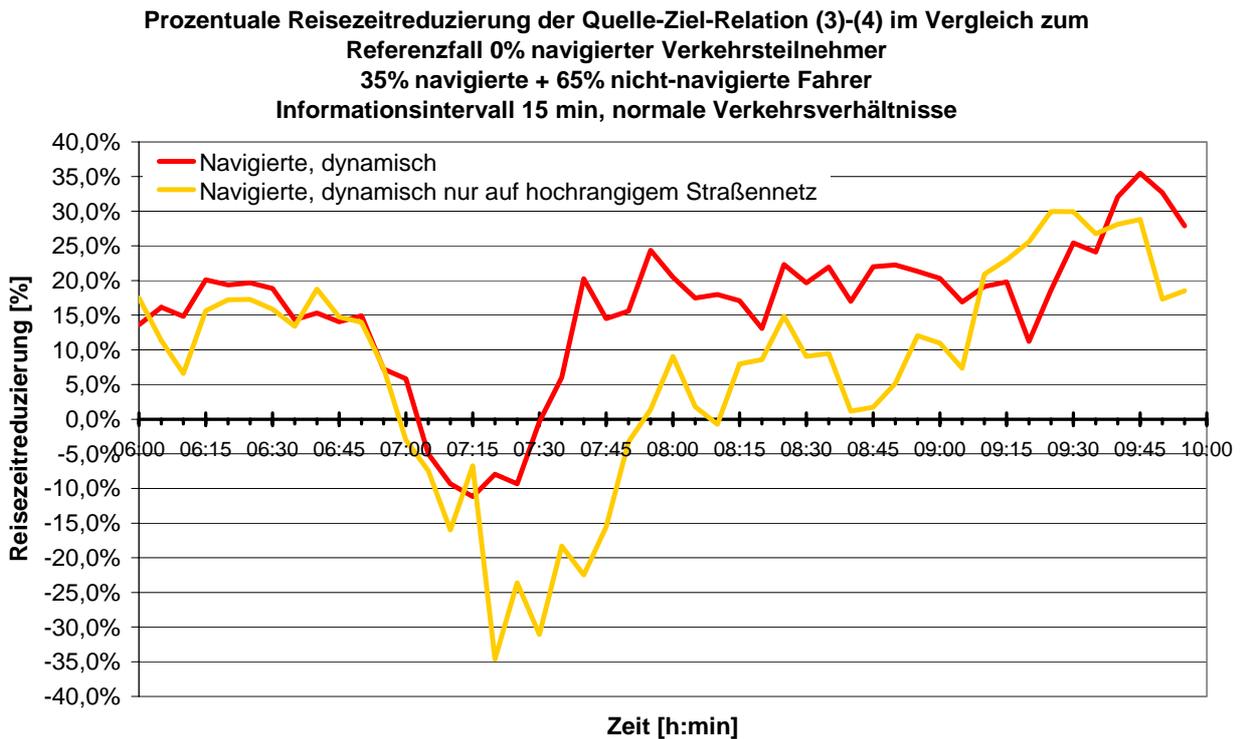
Der Vergleich der Reisezeiten bei vollständig dynamischer im Gegensatz zur der teilweisen dynamischen Navigation zeigt, dass sich auf vielen Quelle-Ziel-Beziehungen ähnliche Fahrzeiten ergeben, da die reisezeitgünstigsten Routen häufig auf dem Hauptstraßennetz verlaufen (siehe z. B. Quelle-Ziel-Relation (1)-(2), Anhang E.1 und Quelle-Ziel-Relation (4)-(5), Anhang E.6).

Starke Verdrängungserscheinungen in das untergeordnete Netz sind nicht zu erkennen, da die für Sammel- und Erschließungsstraßen angesetzten statischen Geschwindigkeitswerte (siehe Tab. 8.1) relativ niedrig sind. Routen, die über Teile des untergeordneten Netzes führen, haben folglich hohe Kosten, weshalb weniger auf sie ausgewichen wird.

Die Konzentration des Verkehrs auf das Hauptstraßennetz führt dazu, dass die Reisezeiten bei einigen Quelle-Ziel-Beziehungen (siehe Verkehrsbeziehung (3)-(4), Bild 9.33 und Bild 9.34 oder auch Relation (1)-(3), Anhang E.2) mit Ansteigen der Verkehrsnachfrage höher ausfallen als bei vollständig dynamischer Navigation und zum Teil auch als im 0 %-Fall. Dies bewirkt ein häufigeres Umlenken, so dass über die Zeit die Navigierten über unterschiedliche Routen geleitet werden (siehe Bild 9.35).



**Bild 9.33: Höhere mittlere Reisezeit der navigierten Pkw der Quelle-Ziel-Relation (3)-(4) bei Ansteigen der Verkehrsnachfrage durch Konzentration auf das Hauptstraßennetz**



**Bild 9.34:** Geringer ausfallende prozentuale Reisezeitreduzierung der navigierten Pkw der Quelle-Ziel-Relation (3)-(4) bei dynamischer Navigation nur auf dem Hauptstraßennetz



**Bild 9.35:** Routen der nicht (links), der dynamisch (Mitte) und der dynamisch nur auf dem hochrangigen Straßennetz (rechts) navigierten Pkw der Quelle-Ziel Relation (3)-(4) bei 35 % Penetrationsrate, Informationsintervall 15 min, normale Verkehrsverhältnisse

### 9.3.2 Störfälle

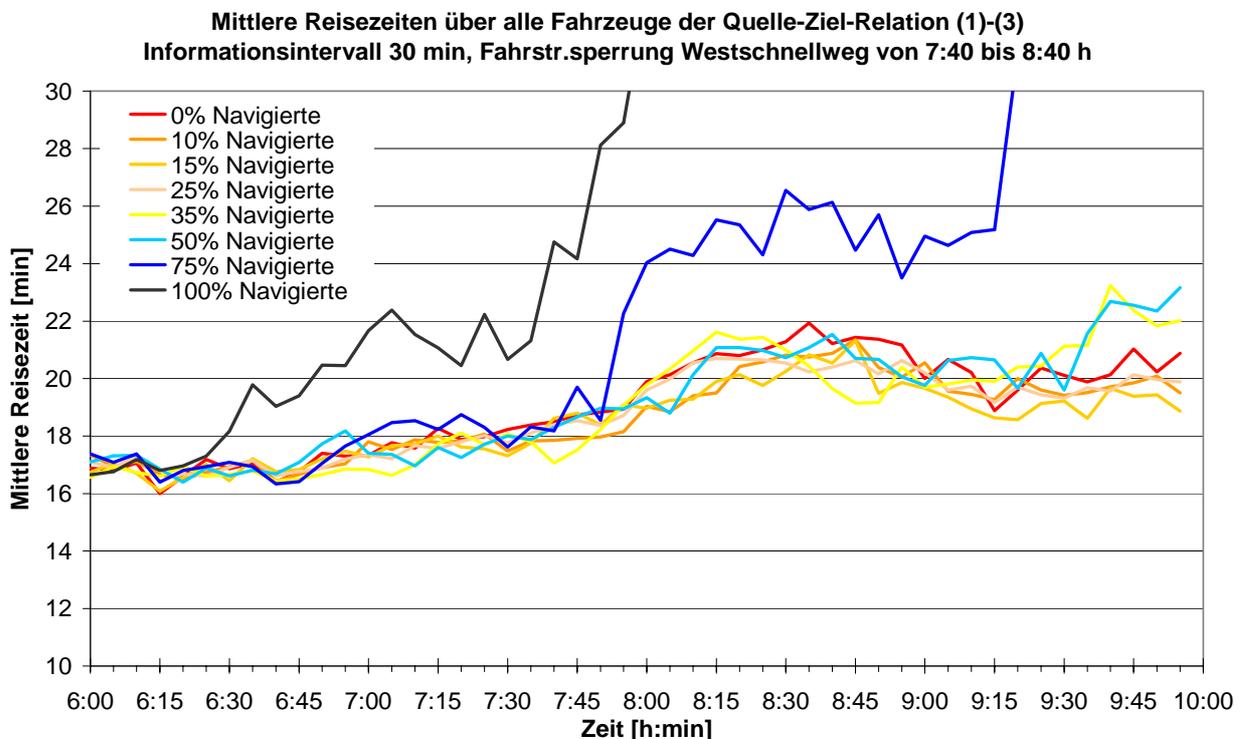
Nicht alltägliche Störfälle stellen Unterschiede im Verkehrszustand zum historischen Wissen der Verkehrsteilnehmer dar. Nicht navigierte Verkehrsteilnehmer können diese Veränderungen

wahrnehmen, sie führen aber erst bei deutlicher Verschlechterung der Reisezeiten zu einem Abweichen vom gewohnten Routenverhalten (Modellierung siehe Kapitel 7.5.2).

Die navigierten Fahrer erhalten Informationen über den aktuellen Verkehrszustand, in Abhängigkeit des Aktualisierungsintervalls werden diese entweder unmittelbar oder aber mit größeren Verzögerungen weitergegeben. Die Aggregation der Daten über das Aktualisierungsintervall und die Weiterverwendung lediglich der Mittelwerte führt dazu, dass Störungen zunächst nicht erkannt werden, wenn sie sich erst gegen Ende des Intervalls ereignen. Oder der Fall tritt ein, dass die Störung in ihrer zeitlichen Ausprägung oder von ihrem Ausmaß her gering ist, so dass sie über das Intervall gesehen „verwischt“. Das Aktualisierungsintervall ist somit entscheidend für die Wirkungsweise der Navigation.

### 9.3.2.1 Fahrstreifensperrung Westschnellweg

Die Fahrstreifensperrung des Westschnellwegs im Zeitraum von 7:40 Uhr bis 8:40 Uhr tangiert einige Routen, die die Quelle-Ziel-Beziehung (1)-(3) miteinander verbindet. In Bild 9.36 ist ein stärkerer Anstieg der mittleren Reisezeiten ab etwa 7:45 Uhr zu erkennen. Vergleich man die Ergebnisse mit den Werten bei normalen Verkehrsverhältnissen (siehe Bild 9.12), zeigen sich kaum Unterschiede. Die detaillierte Betrachtung der Störstelle macht deutlich, dass die Fahrstreifensperrung nur lokal begrenzte Verkehrsbehinderungen durch Fahrstreifenwechsel- und Verflechtungsvorgänge erzeugt. Da der Fahrstreifen nur auf einer geringen Länge (15 Meter) gesperrt ist, ist die Kapazität des Westschnellwegs nicht wesentlich verändert und die Verkehrsnachfrage kann in diesem Bereich gut bewältigt werden.



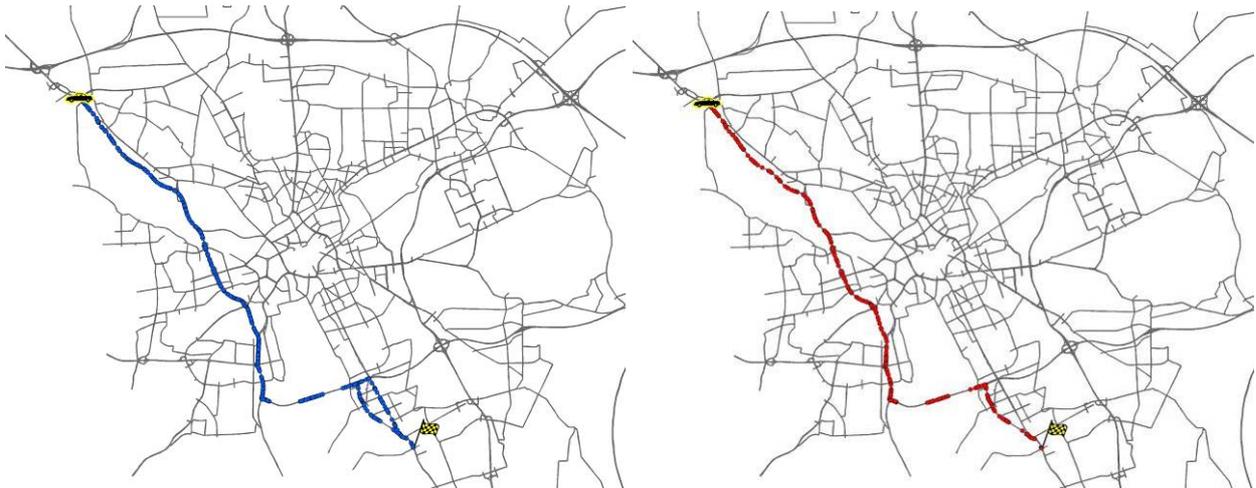
**Bild 9.36:** Ähnliche mittlere Reisezeiten der Fahrzeuge der Quelle-Ziel-Relation (1)-(3) im Störfall 1 wie bei normalen Verkehrsverhältnissen, Informationsintervall 30 min



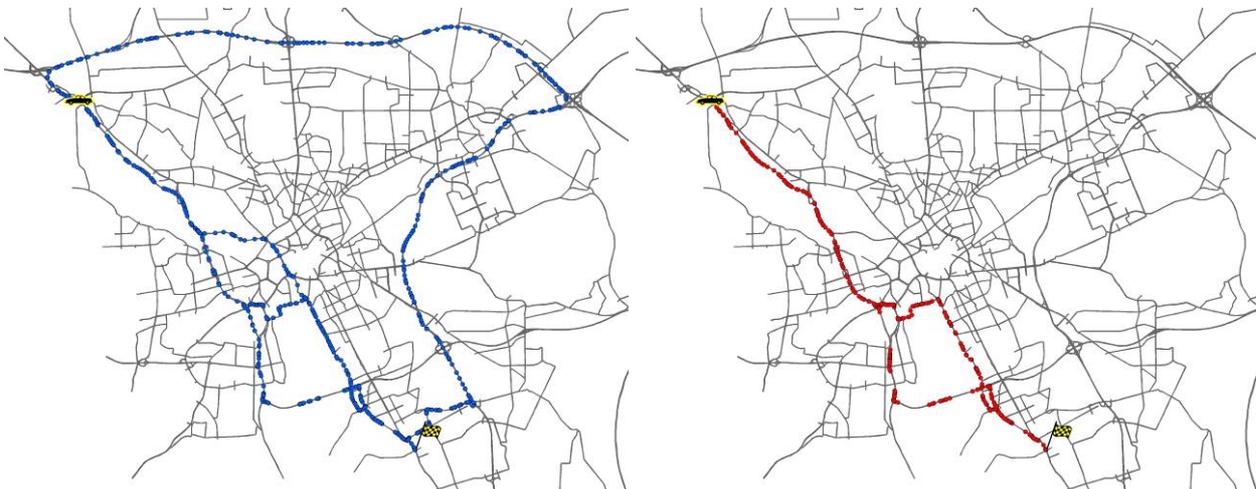
**Bild 9.37: Bereich des Westschnellwegs mit starken alltäglich wiederkehrenden Verkehrsstauungen und Lage des Störfalls 1**

Das Ansteigen der Reisezeiten ist vielmehr durch eine hohe Verkehrsdichte im südlichen Bereich des Westschnellwegs (Friedrich-Ebert-Straße und Frankfurter Allee im Bereich zwischen Deisterplatz, Ricklinger Kreisels und Landwehrkreisels, siehe Bild 9.37) bedingt. Auf diesen Streckenabschnitten treten mit Ansteigen der Verkehrsnachfrage ab etwa 7:30 Uhr Verkehrsstauungen auf, die eine deutlich größere Auswirkung auf die Reisezeiten der Verkehrsbeziehung (1)-(3) haben als die Fahrstreifensperrung. Der Störfall 1 hat ein geringeres Störungsausmaß als die alltäglich wiederkehrenden Verkehrsbehinderungen auf der Friedrich-Ebert-Straße und der Frankfurter Allee, was sich im Routenwahlverhalten widerspiegelt.

Die Routenwahl der nicht navigierten wie auch der navigierten Fahrer führt bis 7:30 Uhr entlang des Westschnellwegs über die Friedrich-Ebert-Straße und die Frankfurter Allee (siehe Bild 9.38), da dieser Weg eine relativ direkte und reisezeitgünstige Alternative auf hochrangigen Straßen darstellt. Mit Ansteigen der Verkehrsbelastung treten starke Verkehrsbehinderungen auf, die dazu führen, dass die Nicht-Navigierten auch andere, zum Teil großräumige Umfahrungen über das Autobahnnetz, wählen (siehe Bild 9.39 links). Die dynamisch Navigierten werden zunächst direkt vor dem gestauten Bereich umgeleitet (siehe Bild 9.39 rechts). Mit Zunahme der Rückstauungen führt die Navigationsroute bereits weiter im Norden beginnend vom Westschnellweg ab (siehe Bild 9.40 links). Der Rückgang der Verkehrsbelastung und der Abbau der Stauungen lässt die Navigationsroute ab 9:00 Uhr wieder über die ursprüngliche Route entlang des gesamten Westschnellwegs führen (siehe Bild 9.40 rechts).



**Bild 9.38:** Routen der nicht navigierten (links) und der dyn. navigierten Pkw (rechts) der Quelle-Ziel-Relation (1)–(3) bei 35 % Penetrationsrate im Zeitraum bis 7:30 h, Informationsintervall 30 min, Störfall 1

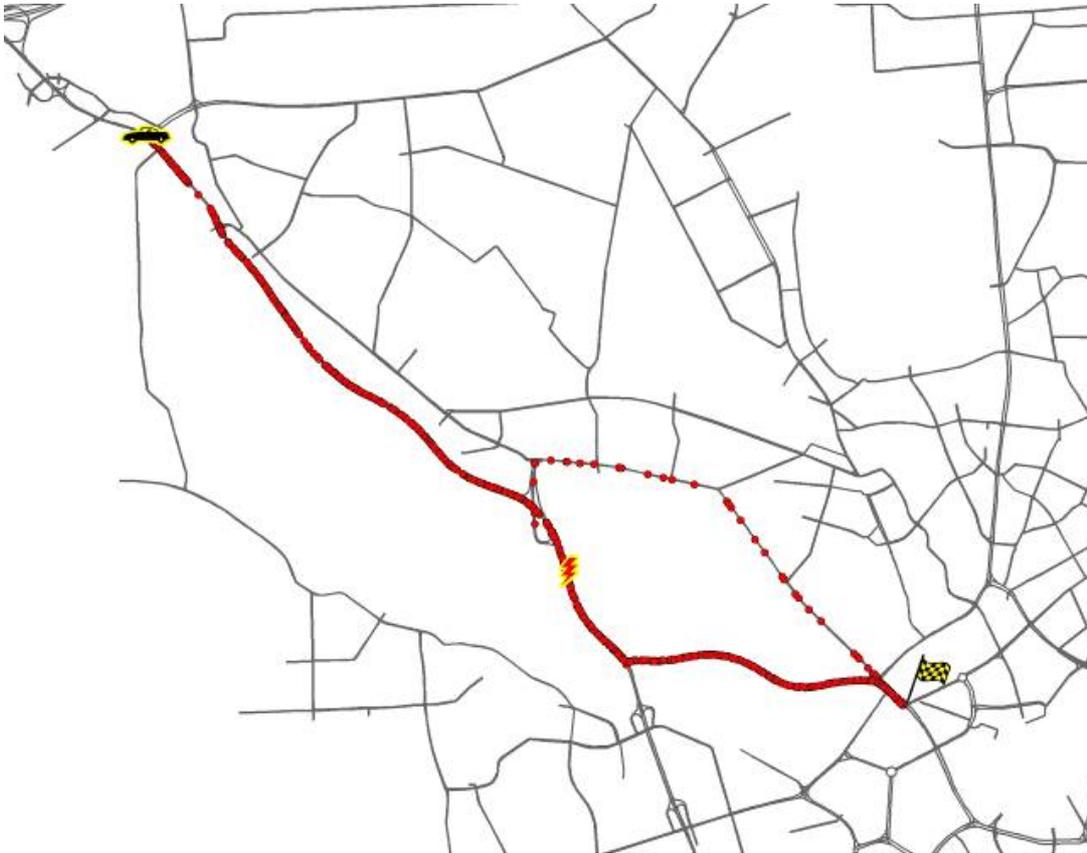


**Bild 9.39:** Weiträumige Routenalternativen der nicht navigierten Pkw (links) gegenüber Umlenkung der dyn. navigierten Pkw unmittelbar vor dem gestauten Bereich (rechts) im Zeitraum von 8:00 bis 8:30 h, Informationsintervall 30 min, Störfall 1



**Bild 9.40:** Frühzeitigeres Umlenken der dyn. navigierten Pkw mit Zunahme der Verkehrsstörung im Zeitraum von 8:30 bis 9:00 h (links) und Rückkehr zur Ausgangsrouten bei nachlassender Verkehrsnachfrage im Zeitraum von 9:00 bis 9:30 h (rechts)

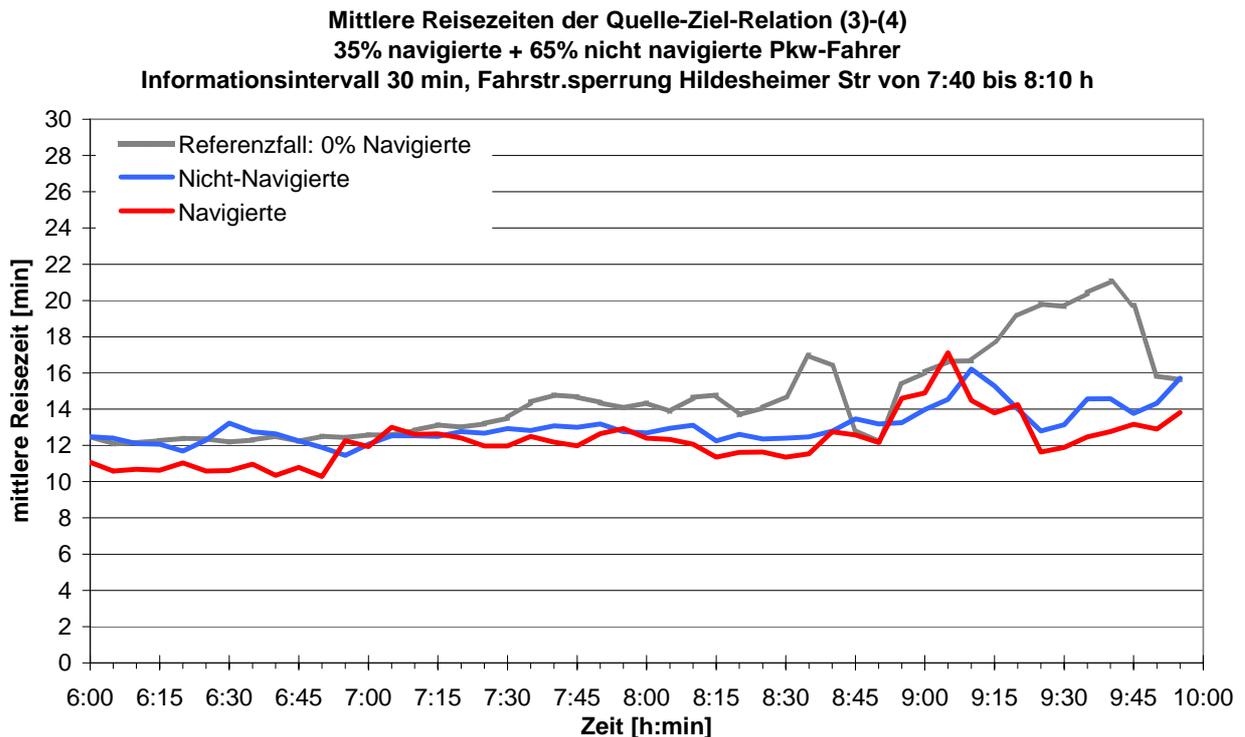
Die detaillierte Betrachtung der Routenverläufe von Quelle (1) zu Ziel (3) verdeutlicht, dass sich Störfall 1 im Vergleich zu anderen alltäglichen Verkehrsstauung kaum auf die Reisezeiten auswirkt. Insbesondere bei langen Aktualisierungsintervallen wird durch die starke Aggregation der Einfluss der lokalen Störung reduziert. Für Quelle-Ziel-Relation (1)-(2) ergibt sich beispielsweise lediglich bei einem Informationsintervall von fünf Minuten ein kurzzeitiges Umlenken der navigierten Fahrer (siehe Bild 9.41).



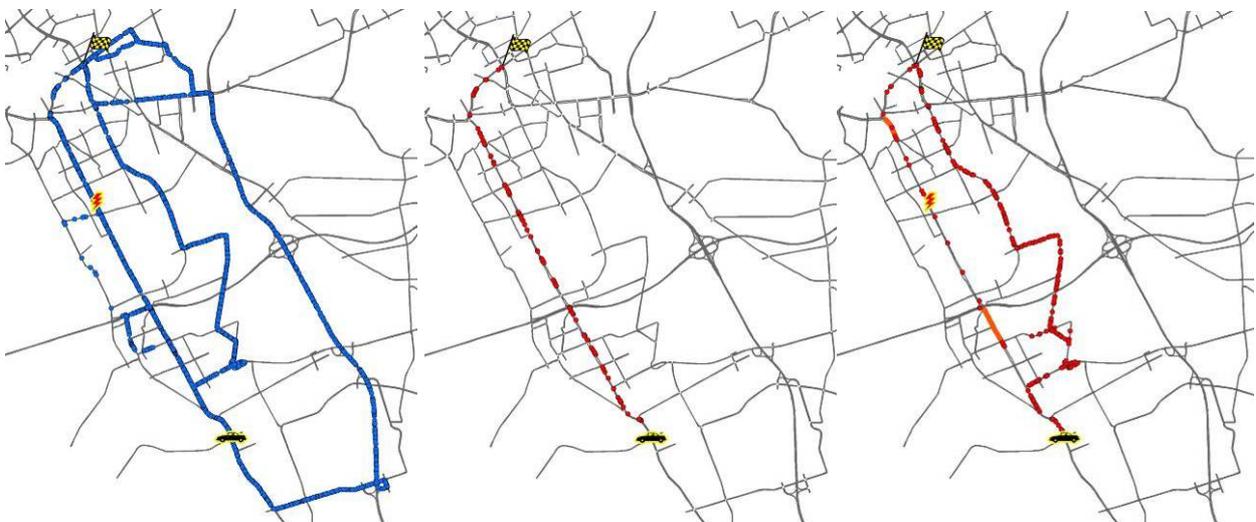
**Bild 9.41:** Routen der dyn. navigierten Pkw der Quelle-Ziel-Relation (1)-(2) bei 35 % Penetrationsrate, Aktualisierungsintervall 5 min, Störfall 1

### 9.3.2.2 Fahrstreifensperrung Hildesheimer Straße stadteinwärts

Ähnlich wie Störfall 1 ist wirkt sich die Fahrstreifensperrung auf der Hildesheimer Straße nur lokal aus. Diese Auswirkungen sind jedoch so gering, dass keine explizite Umfahrung stattfindet. Vielmehr bewirken Rückstauungen auf der Hildesheimer Straße in Höhe des Südschnellwegs und am Aegidientorplatz (siehe Markierungen in Bild 9.43 rechts), dass die Navigierten, die zunächst über die Hildesheimer Straße geführt wurden, ab 7:30 Uhr umgelenkt werden (siehe Bild 9.43 Mitte und rechts). Die Nicht-Navigierten wählen eine Vielzahl von Routen um von Quelle (3) zum Ziel (4) zu gelangen (siehe Bild 9.43 links), wobei die Fahrstreifensperrung von 7:40 Uhr bis 8:10 Uhr keine erkennbaren Reisezeitverschlechterungen mit sich bringt (siehe Bild 9.42).



**Bild 9.42:** Keine Veränderung der mittleren Reisezeiten der Quelle-Ziel-Relation (3)–(4) durch Störfall 2, 35 % Penetrationsrate, Informationsintervall 30 min

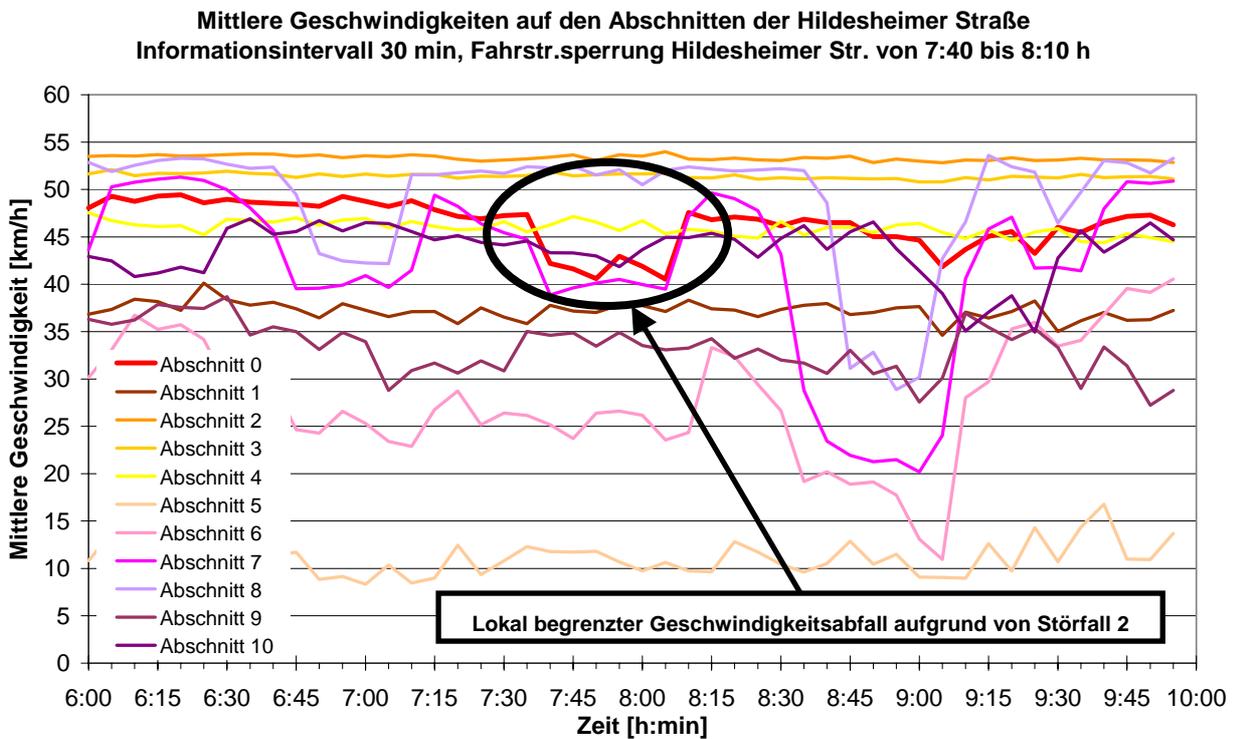


**Bild 9.43:** Routen der nicht navigierten (links) und der dyn. navigierten Pkw im Zeitraum von 7:00 bis 7:30 h (Mitte) und von 7:30 bis 8:00 h (rechts) der Quelle-Ziel Relation (3)–(4) bei 35 % Penetrationsrate, Störfall 2

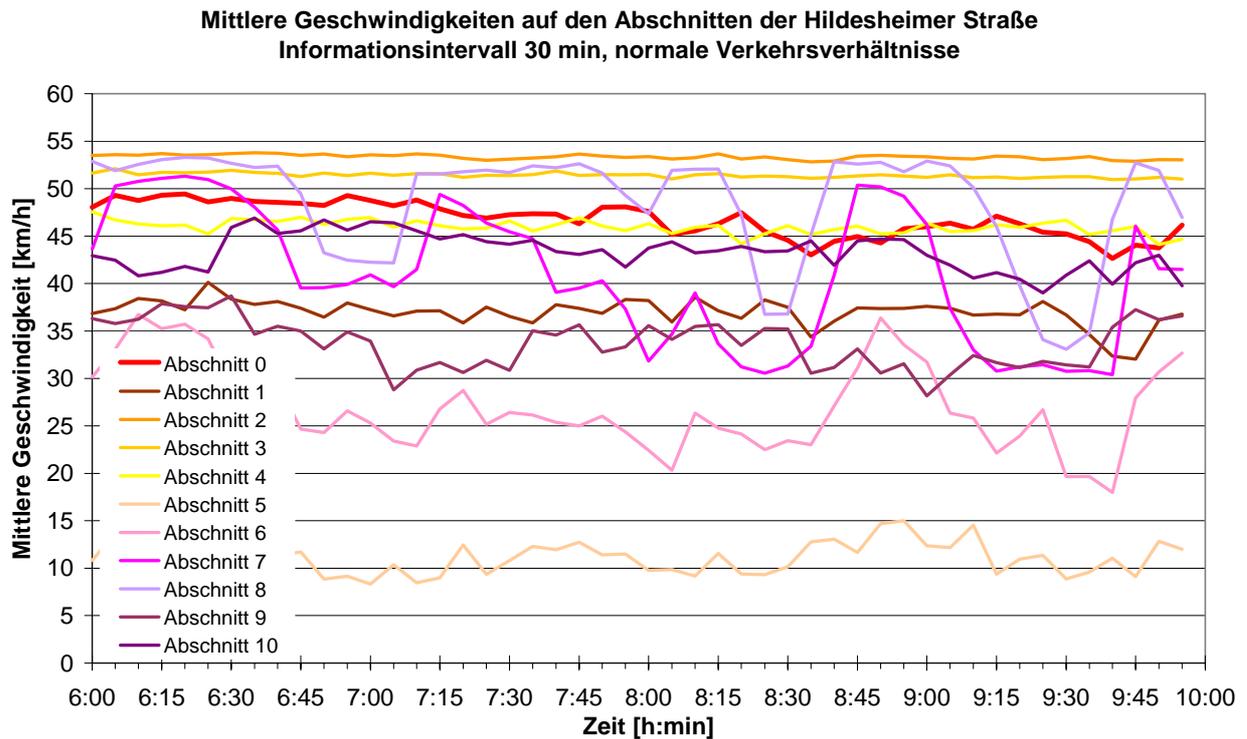
Entsprechendes gilt auch für die resultierenden Reisezeiten auf den Routen der Quelle-Ziel-Beziehung (3)-(4), die zu großen Anteilen über die Hildesheimer Straße führen (siehe Bild 9.47). Hier ist ein Umlenken der Navigierten ebenfalls durch Störungen hervorgerufen, die auch bei normalen Verkehrsverhältnissen auftreten. Die Fahrstreifensperrung bewirkt nur lokal einen Geschwindigkeitsabfall (siehe Bild 9.44, Bild 9.45), wirkt sich aber nicht auf die stromaufwärts gelegenen Streckenabschnitte aus, so dass sich entlang der Hildesheimer Straße ähnliche Geschwindigkeitsganglinien einstellen, wie bei normalen Verkehrsverhältnissen (siehe Bild 9.46).



**Bild 9.44: Analyzierte Einzelabschnitte der Hildesheimer Straße**



**Bild 9.45: Entwicklung der mittleren Geschwindigkeiten auf der Hildesheimer Straße**  
 Informationsintervall 30 min, 35 % Penetrationsrate, Störfall 2



**Bild 9.46:** Ähnlicher Verlauf der mittleren Geschwindigkeiten auf der Hildesheimer Straße bei normalen Verkehrsverhältnissen, Informationsintervall 30 min, 35 % Penetrationsrate

Eine unvorhergesehene Störung ist nicht besonders zu berücksichtigen, wenn sie von ihrem Störungsausmaß im Verhältnis zu alltäglich wiederkehrenden Verkehrsbehinderungen in umliegenden Bereichen geringer ist. Die Erfassung der Verkehrslage sollte demnach darauf ausgerichtet sein, Verkehrsbehinderungen in gleicher Weise nach ihrem Schweregrad zu erfassen und nicht die wiederkehrenden Stauungen, wie es heute zum Teil bei der Generierung von TMC-Meldungen der Fall ist, geringer werten.



**Bild 9.47:** Routen der nicht navigierten (links) und der dyn. navigierten Pkw (rechts) der Quelle-Ziel Relation (3)–(2) bei 35 % Penetrationsrate, Störfall 2

### 9.3.2.3 Fahrtrichtungssperrung Vahrenwalder Straße stadteinwärts

#### Dynamische Navigationsweise

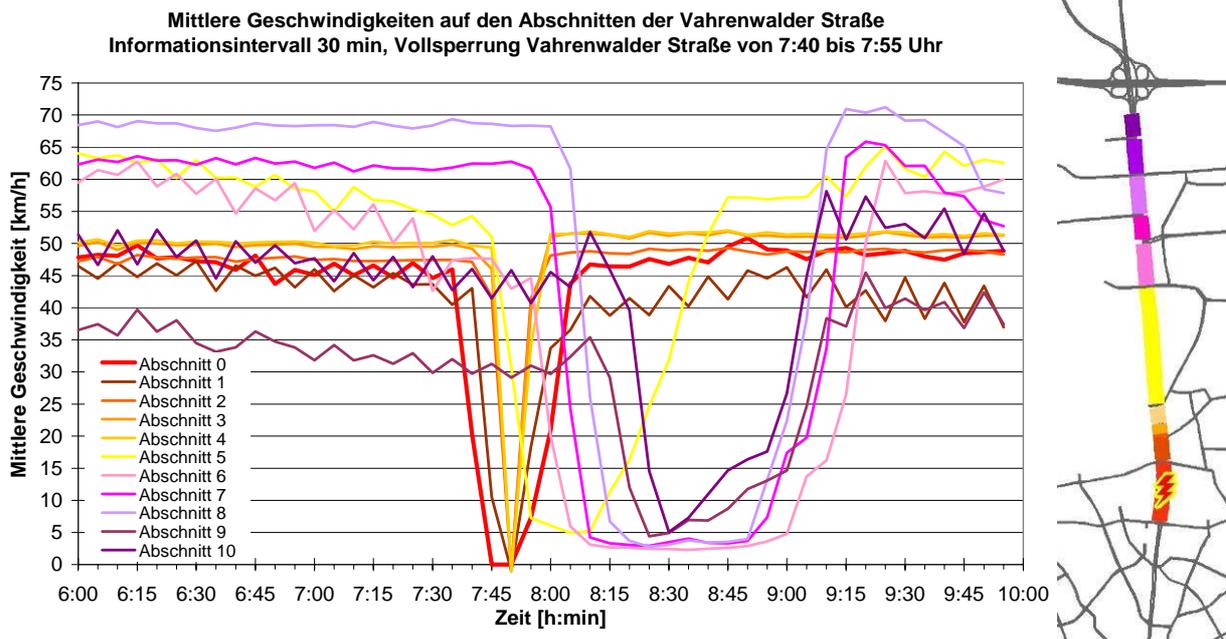
Die vollständige Blockierung der Vahrenwalder Straße in südlicher Richtung von 7:40 Uhr bis 7:55 Uhr stellt eine starke Verkehrsbehinderung dar, da es sich um eine wichtige Verkehrsachse von Norden ins Stadtzentrum handelt.

Die dynamisch navigierten Pkw der Quelle-Ziel-Relation (5)-(4) werden im ungestörten Zustand über die Vahrenwalder Straße zu ihrem Ziel geführt (siehe Bild 9.52 rechts). Tritt wie im Störfall 3 auf dieser Route eine Verkehrsbehinderung auf, sind zunächst alle Navigierten davon betroffen. Die nicht navigierten Fahrer der Beziehung (5)-(4) verteilen sich über mehrere Routen (siehe Bild 9.52 links), so dass nicht alle von der unvorhergesehenen Störung betroffen sind. Diese unterschiedliche Konzentration bzw. Verteilung hat zur Folge, dass bei Betrachtung der mittleren Reisezeiten der Quelle-Ziel-Relation (5)-(4) die navigierten Fahrer nach Störungsbeginn zunächst höhere Fahrtzeiten erleben, was eine Reisezeitverschlechterung im Mittel über die Navigierten der Relation (5)-(4) von bis zu 60 % im Vergleich zum Fall, dass keine Fahrzeug navigiert ist, bedeutet (siehe Bild 9.49 und Bild 9.55).

Zum Verständnis sei erläutert, dass der im Vergleich zum Auftreten der Störung erst zeitlich verzögert einsetzende Reisezeitanstieg durch die Auswertemethodik bedingt ist. Die einzelnen Fahrzeuge werden dann mit ihren statistischen Werten erfasst, wenn sie ihr Ziel erreichen. Dementsprechend werden die mittleren Reisezeiten aus den innerhalb der letzten fünf Minuten eintreffenden Fahrzeugen gebildet. Die stark von der Störung betroffenen Fahrzeuge stauen sich oder werden umgeleitet und treffen entsprechend verzögert ein.

Im nächsten Aktualisierungsintervall (8:00 Uhr bis 8:30 Uhr) werden die navigierten Fahrzeuge um die Störstelle geleitet (siehe Bild 9.53), wobei zunächst auf eher kleinräumige Umfahrungen geführt wird. Die Bildung eines starken Rückstaus auf der Vahrenwalder Straße, der sich nach Norden ausbreitet (siehe Bild 9.48), führt dazu, dass die nun umgelenkten Fahrzeuge immer noch behindert werden, da das noch ansteigende Störungsausmaß bei der Ermittlung der Alternativroute nicht berücksichtigt worden ist und die Umfahrung nicht großräumig genug angelegt war.

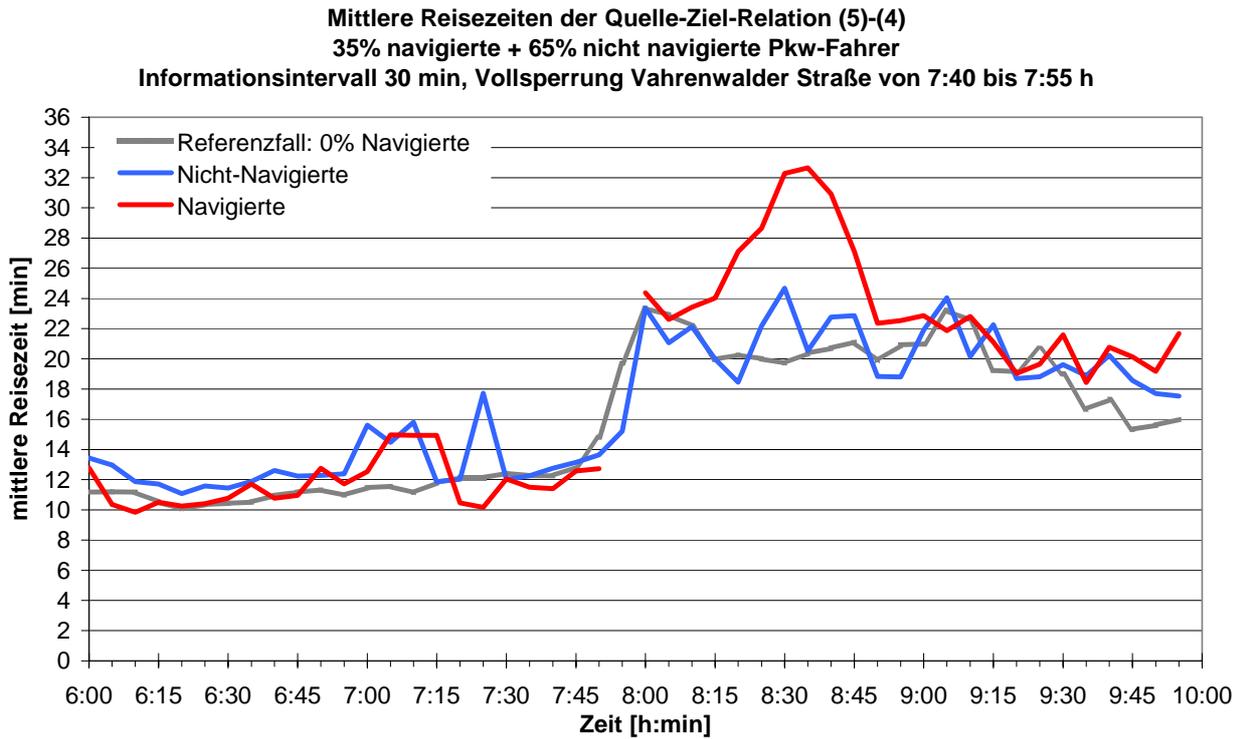
Die abfallenden Geschwindigkeiten auf den einzelnen Abschnitten der Vahrenwalder Straße (siehe Bild 9.48) verdeutlichen die Ausbreitung der Störung nach Norden. Auf der gesperrten Strecke und den direkt dahinter liegenden Kanten fallen die Geschwindigkeiten für den Zeitraum der Blockierung auf Null ab, steigen nach Ende aber recht schnell auf ihr Ausgangsniveau an. Die Störung breitet sich stromaufwärts fort, so dass mit zeitlicher Verzögerung die Geschwindigkeiten auch auf den weiter nördlich liegenden Streckenabschnitten abfallen und zunehmend länger auf niedrigem Niveau bleiben.



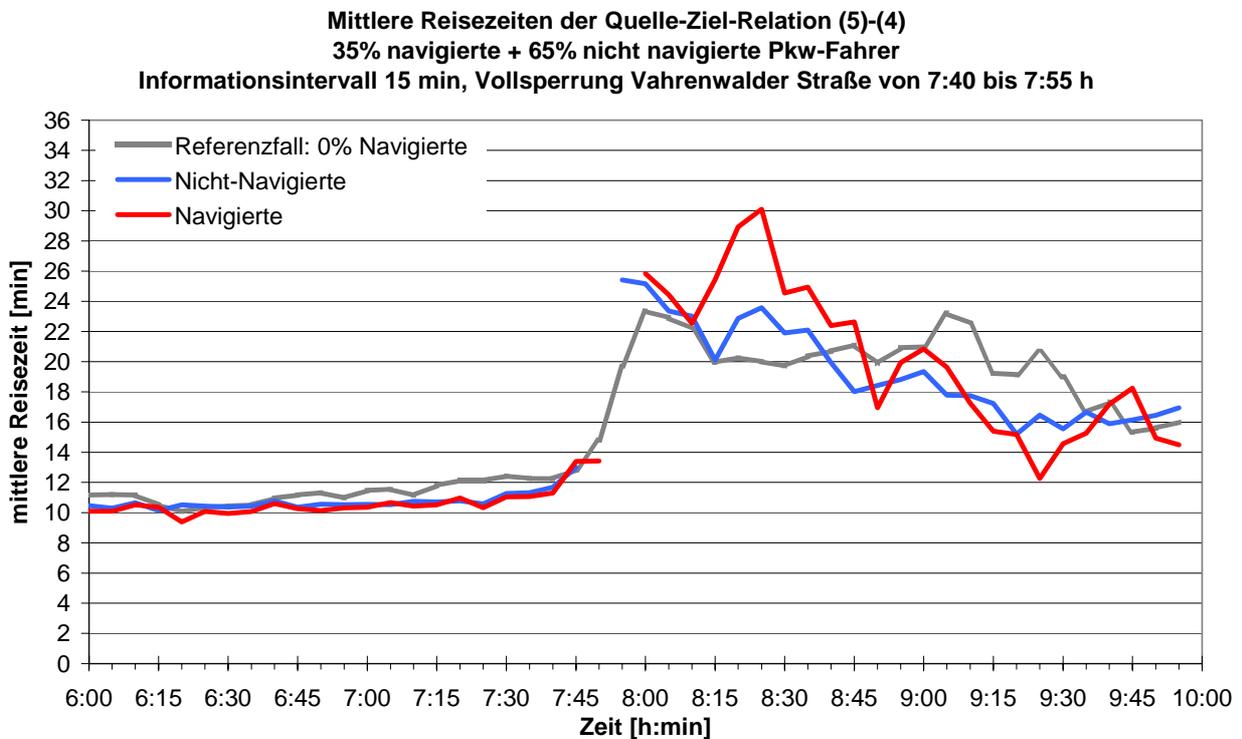
**Bild 9.48: Geschwindigkeitsabfall durch Störfall 3 und Ansteigen des Störungsmaßes stromaufwärts, Informationsintervall 30 min, 35 % Penetrationsrate**

Erst ab 8:30 Uhr werden die navigierten Fahrzeuge bereits vom Einspeisungspunkt der Quelle (5) ab auf eine großräumige Alternative geführt (siehe Bild 9.53). Die Störung ist von ihrem Ausmaß so groß, dass auch die nicht navigierten Fahrer reagieren und vermehrt Wege wählen, die nicht über die Vahrenwalder Straße führen (siehe Bild 9.53, Bild 9.54). Die Verkehrsbehinderungen bauen sich erst langsam wieder ab, so dass ab 9:30 Uhr die Navigierten wieder über die Ausgangsrouten geführt werden (siehe Bild 9.54).

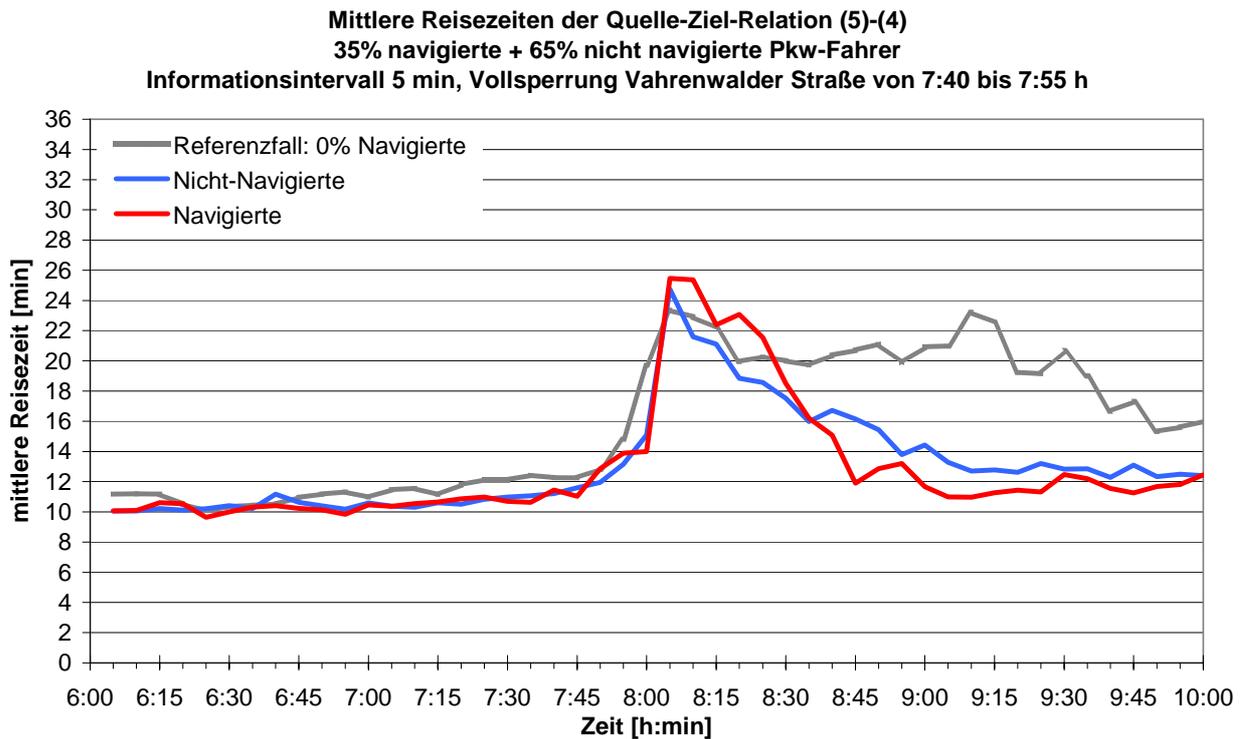
Die Aktualisierung in großen Zeitabständen von 30 Minuten führt dazu, dass die mittleren Reisezeiten der Fahrzeuge gegenüber dem Referenzfall von 0 %-Navigierten nicht verbessert werden können, sich sogar eher negative Auswirkungen einstellen und somit auch kein positiver Effekt für das Gesamtsystem erzielt werden kann (siehe Anhang Bild E.21 und Anhang Bild E.22).



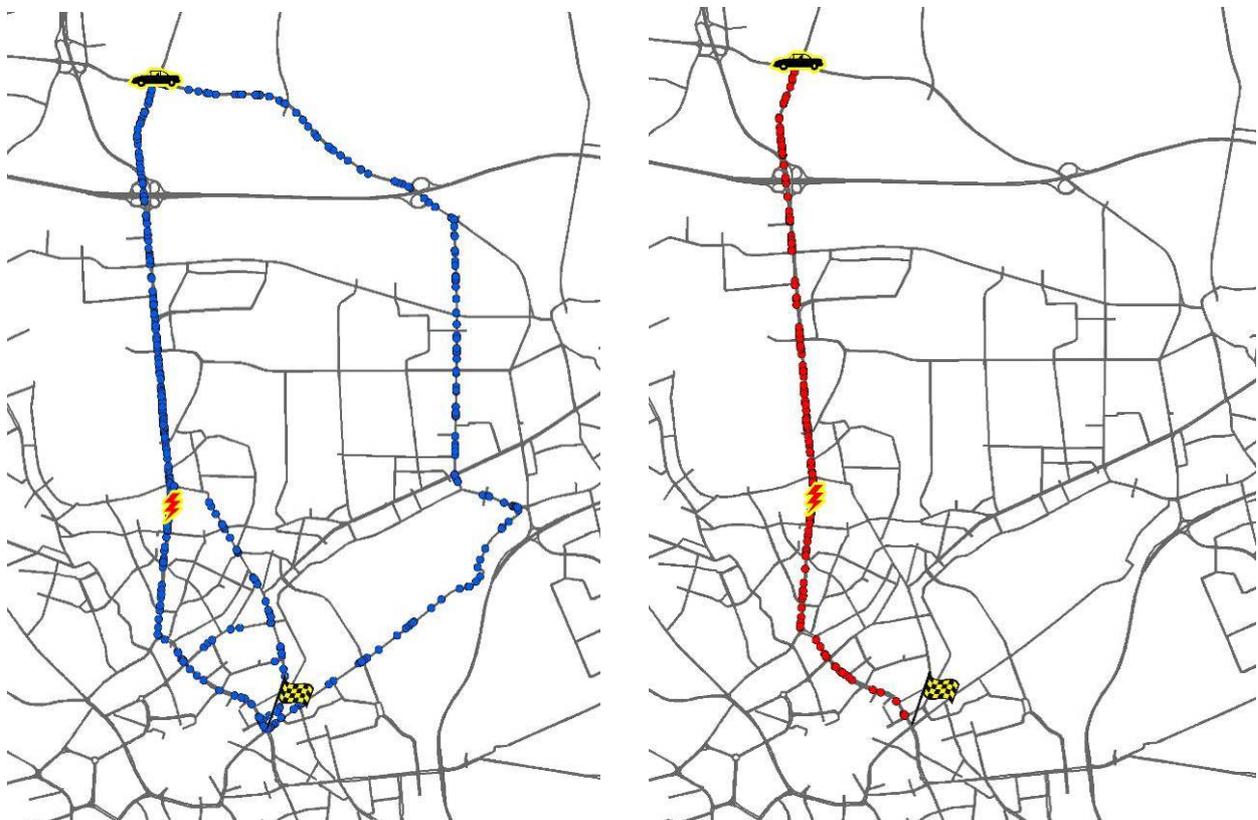
**Bild 9.49:** Starkes Ansteigen der mittlere Reisezeiten der navigierten Pkw der Quelle-Ziel-Relation (5)-(4) durch Störfall 3, 35 % Penetrationsrate, Informationsintervall 30 min



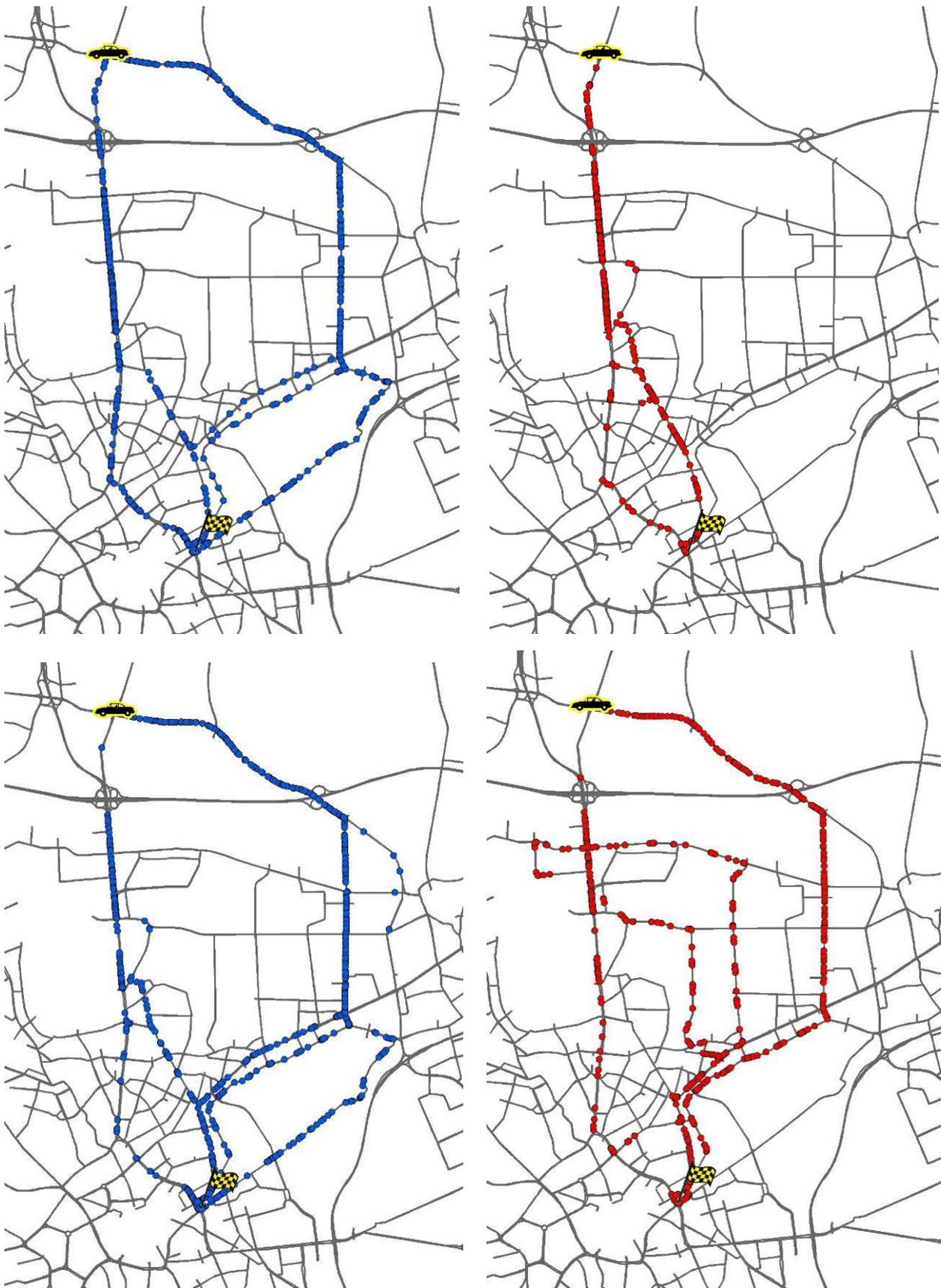
**Bild 9.50:** Rascheres Abklingen der Reisezeiterhöhung bei einem Aktualisierungsintervall von 15 min, 35 % Penetrationsrate, Störfall 3



**Bild 9.51:** Deutliche Reduzierung der mittlere Reisezeiten der Quelle-Ziel-Relation (5)–(4) durch zeitnahes Umlenken bei einem Aktualisierungsintervall von 5 min



**Bild 9.52:** Routen der nicht navigierten (links) und der dyn. navigierten Pkw (rechts) der Quelle-Ziel-Relation (5)–(4) bei 35 % Penetrationsrate im Zeitraum von 7:30 bis 8:00 h, Informationsintervall 30 min, Störfall 3

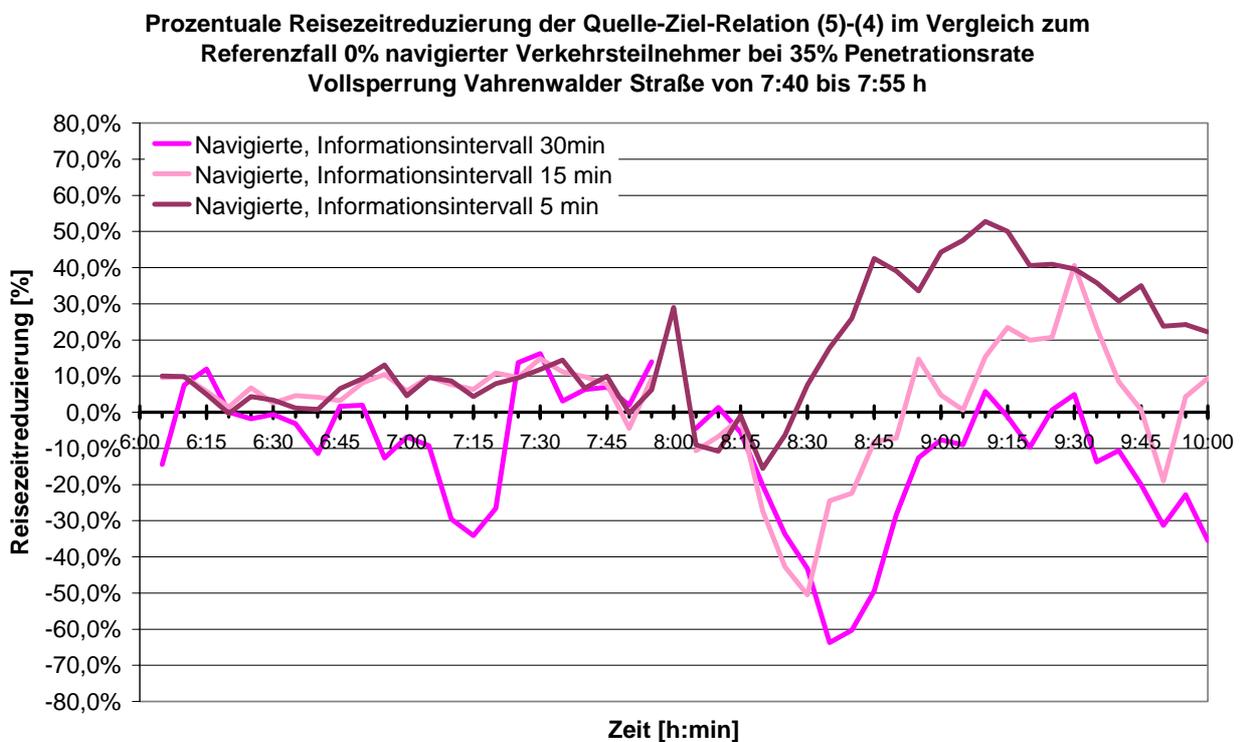


**Bild 9.53:** Verteilung der nicht navigierten Pkw über mehrere Routen (links) und kleinräumige Umleitung der dyn. navigierten Pkw (rechts) im Zeitraum von 8:00 bis 8:30 h (oben) und weiträumig bereits ab Quelle (5) im Zeitraum von 8:30 bis 9:00 h (unten)

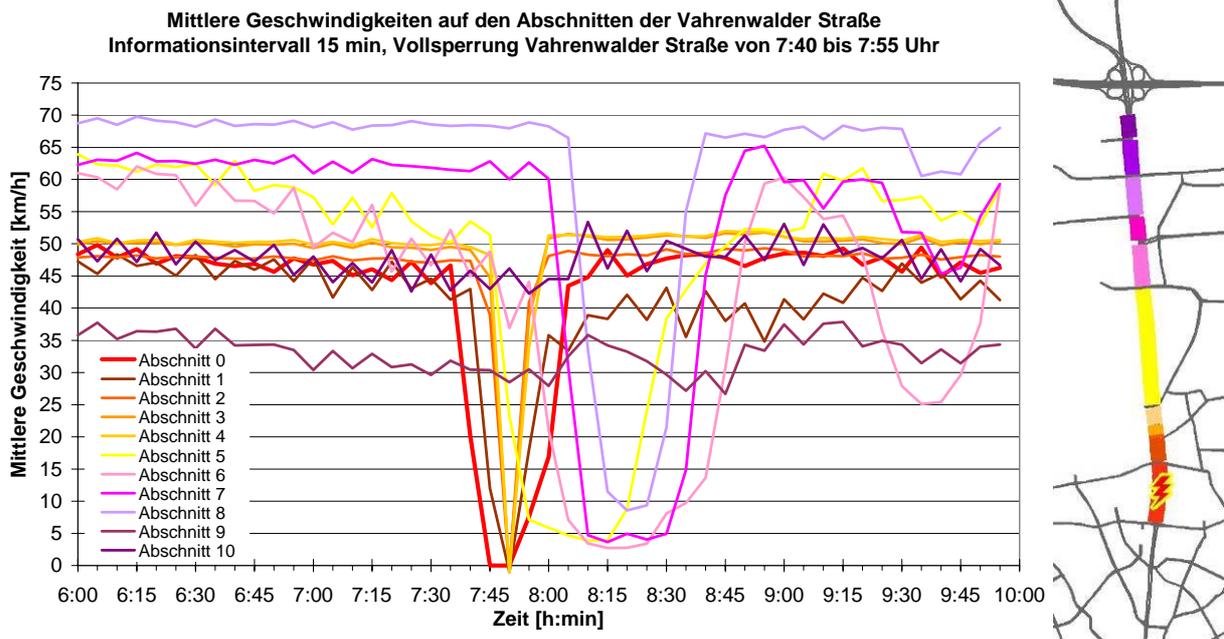


Verkürzt man das Aktualisierungsintervall, werden die Fahrzeuge schneller um den gestörten Bereich gelenkt, wodurch das Störungsausmaß reduziert werden kann (siehe Bild 9.50, Bild 9.51 und Anhang Bild E.23, Bild E.24). Insbesondere bei einem kurzen Informationsintervall von fünf Minuten resultieren für die navigierten Fahrzeuge zunächst noch geringfügig längere Reisezeiten nach Störungseintritt, die jedoch schnell wieder auf das Ausgangsniveau zurückgeführt werden können. Im Vergleich zum Fall, dass kein Fahrzeug navigiert ist, können Reisezeitreduzierungen von 40 % bis 50 % erreicht werden, wohingegen sich im Fall eines langen Informationsintervall von 30 Minuten Reisezeitverlängerungen in dieser Größenordnung durch zu verzögertes Reagieren ergeben (siehe Bild 9.55).

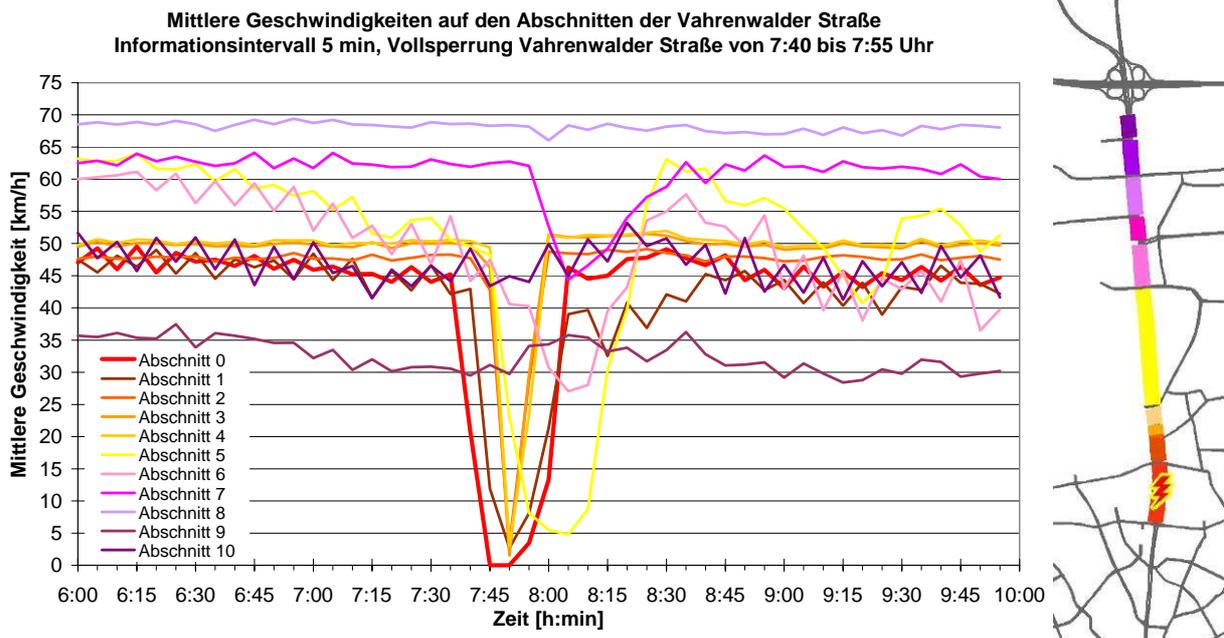
Hier erfahren die Navigierten auch einen Vorteil gegenüber den Nicht-Navigierten, wobei die Reduzierung des gesamten Störungsausmaßes sich deutlich positiv auf alle Verkehrsteilnehmer auswirkt, so dass sich rascher wieder normale Verkehrszustände einstellen (siehe Bild 9.56 und Bild 9.57).



**Bild 9.55:** Deutliche Reisezeitreduzierung der Navigierten auf Relation (5)-(4) bei einem Informationsintervall von 5 min im Vergleich zum Intervall von 15 min oder 30 min



**Bild 9.56: Verringerung des Geschwindigkeitsabfalls und der Störungsausbreitung auf der Vahrenwalder Straße bei einem Aktualisierungsintervall von 15 min**

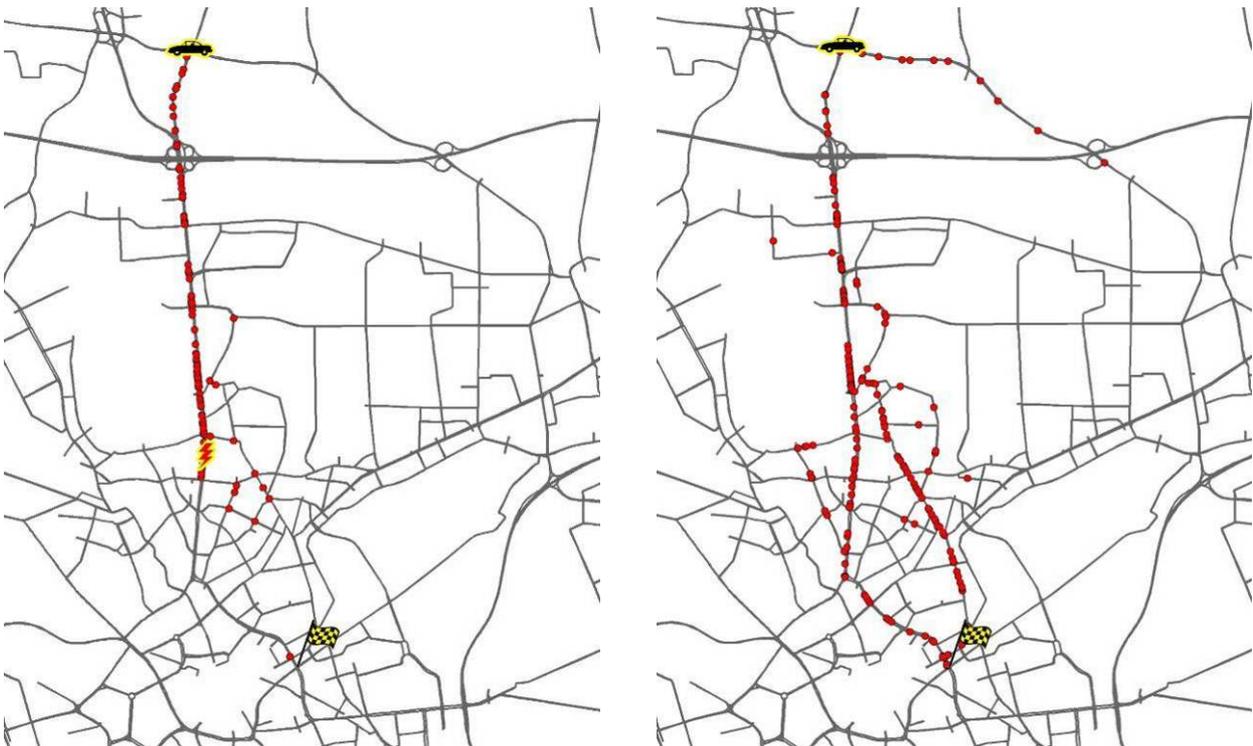


**Bild 9.57: Deutliche Verringerung des Geschwindigkeitsabfalls und der Störungsausbreitung auf der Vahrenwalder Straße bei einem Aktualisierungsintervall von 5 min**

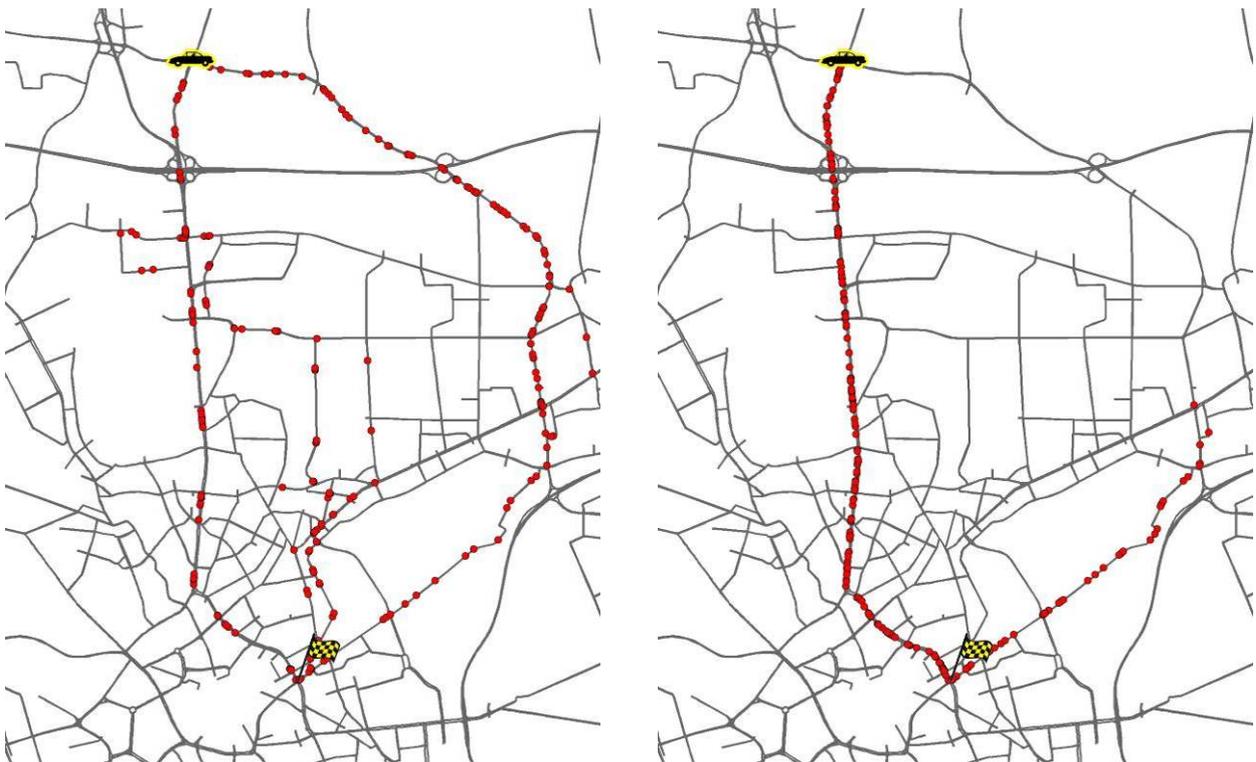
Die kurzen Aktualisierungszyklen ermöglichen ein Ausweichen um den gestörten Bereich kurz nach Störungsbeginn (siehe Bild 9.58, links). Das Re-Routing in 5-Minuten-Intervallen bewirkt eine breitere Verteilung der Fahrzeuge auf unterschiedliche Alternativen (siehe Bild 9.58, Bild 9.59). Die Wege führen im Vergleich zu den Alternativrouten bei größeren Aktualisierungsintervallen häufig auch über Straßenabschnitte des untergeordneten Netzes. Die feinteligere Routenbestimmung führt nämlich dazu, dass unmittelbarer auch auf kurzzeitige Überlastungen der höherrangigen Alternativroute reagiert wird und sofort auf angrenzende Strecken ausgewichen

wird. Insgesamt wird eine gleichmäßigere Verteilung der Nachfrage über das Netz erreicht, wobei aber auch das untergeordnete Netz häufiger zu Umfahrungen genutzt wird, was aus verkehrsplanerischer Sicht in vielen Fällen nicht zu befürworten ist.

Die schnellere Verteilung des Verkehrs im Netz bewirkt allerdings auch eine Reduzierung des Störungsausmaßes und ein schnelleres Zurückkehren zu normalen Verkehrsverhältnissen. Dies verdeutlicht die Führung der navigierten Fahrer der Quelle-Ziel-Relation (5)-(4), die bereits wieder ab etwa 8:30 Uhr über die Vahrenwalder Straße geleitet werden (siehe Bild 9.59, rechts), was bei einem 30 Minuten-Informationsintervall erst wieder ab 9:30 Uhr der Fall ist (siehe Bild 9.54, unten rechts).



**Bild 9.58:** Routen der dyn. navigierten Pkw der Quelle-Ziel Relation (5)-(4) bei 35 % Penetrationsrate im Zeitraum von 7:45 bis 8:00 h (links) und rasche Umleitung der Navigierten im Zeitraum von 8:00 bis 8:15 h (rechts), Informationsintervall 5 min, Störfall 3



**Bild 9.59:** Großräumige Umfahrung des Störbereichs der dyn. navigierten Pkw der Quelle-Ziel Relation (5)–(4) im Zeitraum von 8:15 bis 8:30 h (links) und Rückkehr zur ursprünglichen Route bereits ab 8:30 h (rechts), Informationsintervall 5 min

### Dynamische Navigationsweise erst nach Überschreiten eines Schwellwerts

Die Vorgehensweise, erst dann dynamische Informationen zur Zielführung zu nutzen, wenn die Reisezeit auf einem Link um 60 % die Reisezeit des unbehinderten Zustands überschreitet, bewirkt eine leicht veränderte Routenwahl gegenüber der vollständig dynamischen Navigationsweise. Im Intervall unmittelbar nach Auftreten von Störfall 3 entspricht die Umfahrung der Störstelle für Fahrer der Quelle-Ziel-Beziehung (5)-(4) der im vollständig dynamischen Fall (siehe Bild 9.35). Das starke Störungsausmaß bewirkt bei beiden Navigationsweisen in Folge eine großräumige Umfahrung. Dabei wählt die Zielführung der Schwellwertnavigation eine Alternative auf dem hochrangigen Straßennetz (über die Autobahn A2 und den Messeschnellweg) (siehe Bild 9.61 und Bild 9.62, jeweils rechts), wobei bei gänzlich dynamischer Navigation nur auf kürzeren Abschnitten das Autobahnnetz befahren wird und mehr auf Hauptverkehrsstraßen umgeleitet wird (siehe Bild 9.61 und Bild 9.62, jeweils links). Dies rührt daher, dass das für die großräumige Umfahrung zur Verfügung stehende Netz überwiegend nicht so hoch belastet ist und die Reisezeiten noch unterhalb des Schwellwerts liegen. Daher werden die statischen Geschwindigkeitswerte zur Routenbestimmung herangezogen. Vergleicht man die dazu angesetzten Werte (siehe Tab. 8.1), wird ersichtlich, dass das niedrigklassigere Straßennetz mit sehr hohen Widerständen angenommen wird, so dass es zu einer Bevorzugung höherer Straßenklassen kommt.



**Bild 9.60:** Routen der dynamisch (links) und der dynamisch ab einem Schwellwert (rechts) navigierten Pkw der Quelle-Ziel Relation (5)–(4) bei 35 % Penetrationsrate im Zeitraum von 8:00 bis 8:15 h, Informationsintervall 15 min, Störfall 3



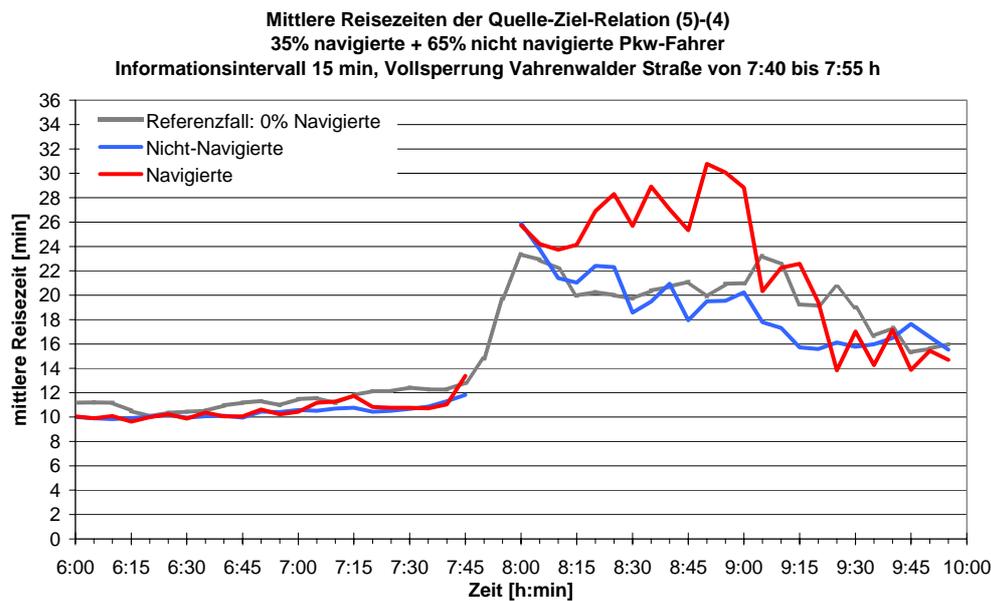
**Bild 9.61:** Routen der dynamisch (links) und der dynamisch ab einem Schwellwert (rechts) navigierten Pkw der Quelle-Ziel Relation (5)–(4) bei 35 % Penetrationsrate im Zeitraum von 8:15 bis 8:30 h, Informationsintervall 15 min, Störfall 3



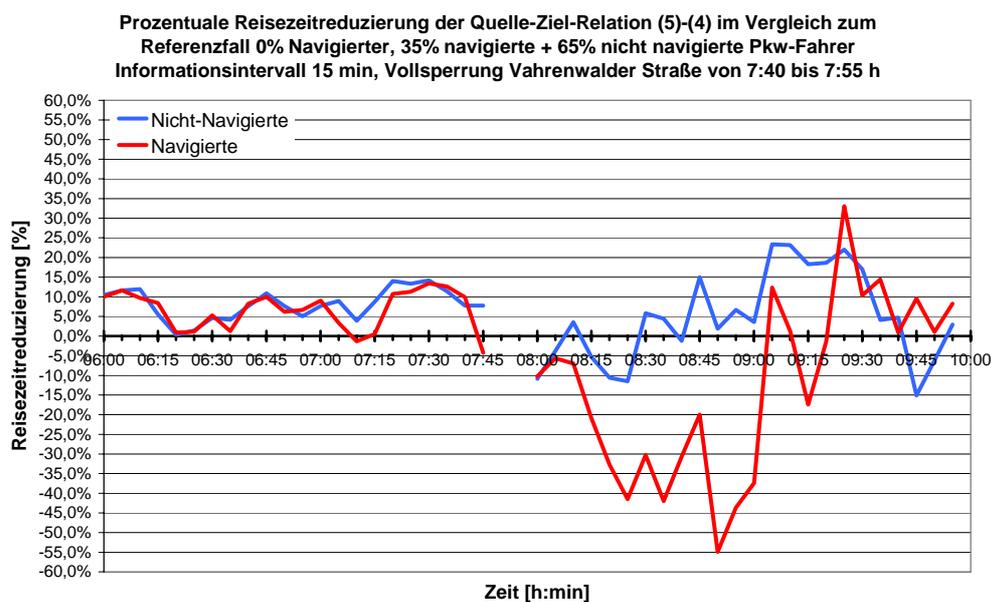
**Bild 9.62:** Routen der dynamisch (links) und der dynamisch ab einem Schwellwert (rechts) navigierten Pkw der Quelle-Ziel Relation (5)–(4) bei 35 % Penetrationsrate im Zeitraum von 8:30 bis 8:45 h, Informationsintervall 15 min, Störfall 3

Die Führung auf dem eher hochrangigen Straßennetz führt dazu, dass längere Wege zurückgelegt werden, die für die navigierten Fahrer mit größeren Reisezeiten verbunden sind (siehe Bild 9.63). Die Rückkehr zu einem Reisezeitniveau wie bei ungestörten Verkehrsverhältnissen dauert länger (siehe Bild 9.63 und Bild 9.64 im Vergleich zu Bild 9.50), was insbesondere bei hohen Penetrationsraten entscheidend wird (siehe Anhang Bild E.25).

Durch Herabsetzung des Schwellwerts könnte der beschriebene Effekt jedoch verringert werden. Es wird aber auch deutlich, dass eine heute übliche Störungsmeldung über RDS-TMC erst ab etwa der verwendeten Schwelle, für eine Reisezeit reduzierende Zielführung in städtischen Straßennetzen nicht feinfühlig genug ist.



**Bild 9.63: Mittlere Reisezeiten der Quelle-Ziel-Relation (5)-(4), 35 % Penetrationsrate, Informationsintervall 15 min, Störfall 3, Navigationsweise: Dynamisch ab Schwellwert**



**Bild 9.64: Deutliche prozentuale Reisezeiterhöhung bei Navigation erst ab einem Schwellwert 35 % Penetrationsrate, Informationsintervall 15 min, Störfall 3**

#### 9.4 Rückschlüsse für die Anwendung von Navigation im städtischen Bereich

Die dargestellten Reisezeit- und Routenveränderungen liefern die Grundlage für die folgenden Rückschlüsse hinsichtlich der Auswirkungen unterschiedlicher Navigationsweisen und der Anforderungen an Verkehrsinformationen zur Zielführung in städtischen Straßennetzen. Für die Simulationsuntersuchungen wurde das Straßennetz von Hannover abgebildet, wobei versucht wurde, die Analysen nicht netzspezifisch durchzuführen, sondern allgemein gültige Zusammenhänge bei Vorliegen typischer städtischer Randbedingungen zu identifizieren. Als Hinweis sei gegeben, dass das simulierte Netz in vielen Teilen noch Kapazitätsreserven und häufig auch alternative Routenmöglichkeiten aufweist. In Netzen, die bereits flächendeckend überlastet sind oder keinerlei Ausweichalternativen vorliegen, kann Navigation nicht Reisezeit reduzierend wirken, weshalb in diesen Fällen die Übertragung der hier gezogenen Rückschlüsse nicht mehr gültig ist.

Eine vollständig dynamische Navigationsweise, also die Zielführung unter Heranziehung aktueller Reisezeiten verfügbar im gesamten Netz, stellt die höchsten Ansprüche an benötigte Verkehrsdaten, lässt aber auch die größten Reisezeitersparnisse erzielen. Maximal sind dabei Reduzierungen von rund 5 % der Gesamtreisezeit aller Fahrzeuge bezogen auf den Fall, dass kein Fahrzeug im Netz navigiert ist, erreichbar. Als Datengrundlage sind dazu jedoch zeitlich fein aufgelöste Informationen in 5 Minuten-Intervallen notwendig. Bei Vergrößerung der Aktualisierungsschritte auf 15 Minuten oder 30 Minuten verringern sich die resultierenden Gesamtreisezeitgewinn und liegen dann maximal bei 4 % bzw. 3 %.

Für die Reisezeiten einzelner Quelle-Ziel-Beziehungen kann eine Reisezeitreduzierung von etwa 10 % bei einem langen Aktualisierungsintervall von 30 Minuten und normalen Verkehrsverhältnissen erzielt werden. Wird das Intervall zur Sendung neuer Informationen auf fünf Minuten reduziert, sind größere Reduzierungen von 15 % bis 20 % möglich, wobei sich die positiven Auswirkungen auch für die Nicht-Navigierten ergeben.

Die stärksten positiven Effekte dynamischer Navigation wurden bei Auftreten einer unvorhergesehenen Störung mit starkem Ausmaß beobachtet. In diesem Fall können bei zeitnaher Information und Umleitung der Fahrzeuge die Verkehrsstauungen reduziert werden und schneller wieder zu normalen Verkehrsverhältnissen zurückgekehrt werden. Somit profitieren nicht nur die navigierten Verkehrsteilnehmer, sondern alle Fahrer. Auf einzelnen Quelle-Ziel-Relationen ergeben sich für die navigierten Verkehrsteilnehmer Reisezeitreduzierungen von bis zu 50 % bei einem 5 Minuten-Informationsintervall, wobei sich aber bei langen Aktualisierungsintervallen von 30 Minuten auf gleichen Relationen in entsprechender Größenordnung negative Auswirkungen ergeben können, da die Umleitung zu verzögert erfolgt.

Unvorhergesehene Störungen geringeren Ausmaßes können zwar lokale Verkehrsbehinderungen bewirken, in Hinblick auf die Reisezeiten einzelner Verkehrsbeziehungen aber im Vergleich zu alltäglich wiederkehrenden Störstellen gering ausfallen. Eine Meldungsbeschränkung lediglich auf nicht alltägliche Ereignisse ist daher nicht ausreichend. Vielmehr ist das Störungsausmaß entscheidend, da es die weitere räumliche Ausbreitung von Störungen im Netz beeinflusst. Dies spielt vor allem für die möglichst rechtzeitig einzusetzende großräumige Umfahrung eine Rolle, weshalb eine Kurzfristprognose hilfreich wäre. Weil dieser Blick in die Zukunft meist nur schwer zu bestimmen ist, ist ein kurzes Aktualisierungsintervall umso entscheidender, da dann zwar nur ein Reagieren möglich ist, dies aber zeitnah auf die sich verändernden Zustände

erfolgen kann und einem bloßen Verlagern der Stauung auf eine Alternativroute entgegenewirkt werden kann.

Aktualisierungsintervalle in der Größenordnung von einer Viertel- bis halben Stunde mögen für die Navigation auf dem übergeordneten und hochrangigen Straßennetz ausreichend sein, für die Anwendung im städtischen Bereich, in dem die Fahrdauer einer Beziehung etwa in diesem Bereich liegt, werden hoch aufgelöste und aktuelle Daten in Zeitschritten nicht größer als fünf Minuten benötigt. Werden größere Zeitschritte verwendet, erfolgt die Meldung meist zu verzögert, so dass es sogar vorkommen kann, dass die navigierten Verkehrsteilnehmer gegenüber den nicht navigierten längere Reisezeiten erleben, da sie weiterhin über eine Route geführt werden, die zuvor den Bestweg darstellte, durch die veränderten Bedingungen nun aber nicht mehr die günstigste ist.

Eine sehr feine zeitliche Auflösung von einer Minute kann allerdings vor allem bei höheren Penetrationsraten (sie wird im Rahmen dieser Arbeit gleich der Nutzungsrate angenommen) ein zu unruhiges Navigationsverhalten hervorrufen, wie bei Tests an einem städtischen Netzausschnitt festgestellt wurde (siehe [Matschke, 2005]). Eine Mittelung erfasster Werte und Weitergabe dieser Informationen in 5 Minuten-Intervallen scheint daher eine angemessene Aktualisierungsrate zu sein, um einerseits statistische Schwankungen zu beseitigen und andererseits systematische Einflüsse zu identifizieren.

Neben der zeitlichen Aktualität offerierter Verkehrsinformationen wirkt sich auch die Penetrationsrate mit navigierten Fahrzeugen entscheidend auf den Verkehrszustand aus. Bei Annahme eines 100 %-igen Befolgungsgrads der zielführenden Anweisungen stellt sich ab bestimmten Durchdringungsgraden eine zu hohe Konzentration der Verkehrsnachfrage auf bestimmte Strecken ein, so dass Störungen erzeugt werden. Die gegenseitigen Behinderungen wirken sich wiederum negativ auf die Reisezeiten aus, so dass die bei noch geringeren Penetrationsraten erzielten Reduzierungen geringer ausfallen oder sich keine Verbesserung einstellt und sich bei sehr hohen Ausstattungsraten Reisezeitverlängerungen ergeben.

Der Penetrationsbereich, bei dem sich die größten Reisezeitreduzierungen ergeben, variiert in Abhängigkeit des Aktualisierungsintervalls. Bei großen Zeitschritten von 30 Minuten ist der Maximalbereich bereits bei 15 % Ausstattungsrate erreicht und fällt danach wieder, wobei sich bei 50 % wieder das Niveau des Referenzfalls 0 %-Ausstattungsquote einstellt. Bei Verwendung kürzerer Informationsintervalle erhöht sich nicht nur der erzielbare Reisezeitgewinn, sondern verschiebt sich auch in höhere Penetrationsraten zwischen 35 % bis 50 %. Präzise Aussagen zu Wirkungen in den sehr hohen Ausstattungsbereichen sind mittels des verwendeten simulativen Modellansatzes nicht möglich.

Mit dynamischer Navigation lässt sich eine Verbesserung des Verkehrszustands in Bezug auf eine Reisezeitreduzierung erreichen, wobei die Gewinne größer ausfallen (bis zu 20 % bei normalen Verkehrsverhältnissen und bis zu 40 % Reisezeitvorteil für die Navigierten auf bestimmten Relationen bei unvorhergesehenen Störfällen), wenn das Aktualisierungsintervall kurz ist und die Penetration geringe bis mittlere Raten (bis 35 %) aufweist. Danach einsetzende Negativeffekte (z. T. mehr als Verdoppelung der Reisezeiten) machen deutlich, dass bei den heute aktuellen Ausstattungsraten mit Navigationsgeräten in Deutschland positive Einflüsse auf das Verkehrsgeschehen in städtischen Straßennetzen erzielbar sind, vorausgesetzt, die benötigte Datenaktualität und -qualität wird auf großen Teilen des Netzes verfügbar. Mittelfristig ist

jedoch eine Weiterentwicklung der Zielführungsstrategien (z. B. gespreizte Aufteilung auf unterschiedliche Routen, vorausblickende Navigation durch Berücksichtigung einer Prognose) notwendig, um den sich einstellenden negativen Wirkungen bei hohen Penetrationsraten entgegenwirken zu können.

Die Reisezeitgewinne werden allerdings auch durch Umleiten des Verkehrs in das untergeordnete Straßennetz erzielt, was aus verkehrsplanerischer Sicht nicht erwünscht ist. Dieser Fall tritt vor allem dann auf, wenn kurze Aktualisierungsintervalle verwendet werden, da hier eine stärkere Verteilung der Fahrzeuge durch zeitnahes Umleiten auch um kleinere Störbereiche erfolgt. Diesem Phänomen kann dadurch entgegengewirkt werden, dass lediglich das Hauptstraßennetz für die dynamische Navigation zur Verfügung steht und das untergeordnete Netz mit entsprechend hohen Widerständen belegt wird, so dass nur in Ausnahmefällen und im direkten Zielbereich deren Befahrung erfolgt. Der hohe Anspruch an eine vollständige netzweite Verkehrszustandserfassung kann dadurch verringert und auf einen unter heutigen Gesichtspunkten denkbaren Realisierungsbereich, nämlich der Erfassung des Verkehrszustands nur auf dem Hauptstraßennetz, reduziert werden. Unter diesen Umständen vermindert sich allerdings auch der maximal erzielbare Reisezeitgewinn, ist aber immer noch so groß, dass dies einen guten Kompromiss darstellt.

Eine statische Navigation, wie es die Basis heute gängiger Navigationssysteme ist, mag für die Zielführung in unbekanntem Gebieten und für Fernverbindungen ausreichend sein, da hier die zuverlässige Führung zum Zielort als Navigationsaufgabe im Vordergrund steht. In städtischen Bereichen ist jedoch aufgrund der größeren Anzahl alternativer Routen und des komplexen Verkehrsgeschehens eine differenziertere Behandlung notwendig. Bei der statischen Navigation wird die Auswahl einer Route nur auf Basis fester Geschwindigkeitswerte differenziert nach Straßenklassen getroffen, weshalb keine Zielführung erfolgen kann, die die aktuellen und ortsspezifischen Gegebenheiten berücksichtigt. Bei geringen Penetrationsraten bis 15 % Anteil Navigierter kann mit dieser Vorgehensweise noch ein Reisezeitvorteil, der für die Navigierten einer Quelle-Ziel-Relation bis zu 20 % gegenüber dem Fall, dass keiner navigiert ist, betragen kann, bewirkt werden, da sich durch die Zielführung Einzelner der gesamte Verkehrszustand nicht wesentlich verändert und die der Navigation hinterlegten Annahmen weitgehend zutreffen. Steigt der Anteil Navigierter auf 25 % bis 35 % Penetrationsrate an, haben sich die Verkehrszustände bereits so weit gegenüber den in den statischen Werten angenommenen verändert und die Navigierten werden als Folge ungünstig geleitet, so dass sich auf entsprechenden Quelle-Ziel-Relationen eine Reisezeitverschlechterung für die Navigierten von bis zu 30 % ergibt.

Die statische Navigation tendiert zur Auswahl höherrangiger Straßen, weshalb die navigierten Fahrer in einigen Fällen auf Routen gelenkt werden, die nicht nur weglänger sind, sondern bei normalen Verkehrsverhältnissen auch reisezeitungünstiger sind. Es kann daher auch bereits bei niedrigen Penetrationsraten eintreten, dass der Navigierte gegenüber einem Ortskundigen, der keine Zielführung verwendet, einen Nachteil erfährt. In ungünstigen Fällen kann dies auf bestimmten Relationen zu einer Verdopplung der Reisezeit der Navigierten gegenüber der der Nicht-Navigierten führen.

Die statische Navigation trifft auch dann an ihre Grenzen, wenn unvorhergesehene Ereignisse eintreten oder die Ausstattungsraten über 15 % bis 25 % steigt, da nicht auf den veränderten Zustand reagiert wird, was zu einer deutlichen Verschlechterung der Reisezeiten für den Einzelnen und auch in Hinblick auf das Gesamtsystem führt.

Störungen können alltäglich wiederkehrend sein oder Sonderereignisse darstellen. Inwieweit diese bei der Navigation Berücksichtigung finden bzw. finden sollten, ist abhängig vom Störungsausmaß, da es entscheidend dafür ist, ob eine Umfahrung sinnvoll ist. Die Erfassung der Verkehrslage sollte demnach darauf ausgerichtet sein, Verkehrsbehinderungen in gleicher Weise nach ihrem Schweregrad zu erfassen und nicht die wiederkehrenden Stauungen weniger zu beachten, wie es heute zum Teil bei der Generierung von TMC-Meldungen der Fall ist. Zur Sicherstellung einer gleichmäßigen Bewertung ist daher eine automatische Erfassung und Zuordnung anzustreben und nicht eine individuelle und händisch durchgeführte Störungsmeldung vorzunehmen, wie es heute vielmals üblich ist.

Auf kleinste Veränderungen muss nicht eingegangen werden, allerdings ist eine dynamische Navigation erst bei Überschreiten eines Schwellwerts, der heutzutage gängig in der Größenordnung von 60 % Reisezeitverlängerung gegenüber dem unbehinderten Zustands liegt, für das städtischen Verkehrsgeschehen nicht feinfühlig genug. Die Bestimmung einer optimalen Schwelle konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht erfolgen, weshalb keine differenzierten Empfehlungen gegeben werden können und weiterführend Untersuchungen durchgeführt werden sollten.

Zusammengefasst zeigen die Simulationsuntersuchungen, dass in Hinblick auf den Einsatz von Navigation in städtischen Straßennetzen

- Gesamtreisezeitgewinne von maximal 4 % bis 5 % mit dynamischer Navigation erreichbar sind,
- individuelle Reisezeitvorteile für die dynamisch navigierten Verkehrsteilnehmer vor allem bei geringen bis mittleren (bis 35 %) Penetrationsraten erzielbar sind (Reisezeitreduzierung der Navigierten von bis zu 20 % bei normalen Verkehrsverhältnissen und bei unvorhergesehenen Störungen von bis zu 40 % auf bestimmten Quelle-Ziel-Relationen), allerdings nur bei Vorliegen kurzer Aktualisierungsintervalle von fünf Minuten; dadurch stellen sich auch positive Wirkungen für die Nicht-Navigierten ein (bis zu 15 %);
- lange Aktualisierungsintervalle von 15 Minuten oder 30 Minuten und hohe Penetrationsraten (größer 35 %) zu einer Verschlechterung des Verkehrsgeschehen gegenüber dem Fall, dass kein Verkehrsteilnehmer navigiert ist, führen können (z. T. mehr als Verdoppelung der Reisezeiten),
- dynamische Informationen, erhältlich auf dem gesamten Netz, zur Erzielung der höchsten Reisezeitgewinne zwar wünschenswert wären, eine Konzentrierung auf das Hauptstraßennetz ausreichend ist, solange die Penetrationsrate mit navigierten Fahrzeugen noch nicht hoch (nicht größer als 35 %) ist,
- das Aktualisierungsintervall nicht größer als fünf Minuten sein sollte,
- bei einem kurzen Aktualisierungsintervall von fünf Minuten sich die Verkehrsnachfrage stärker im Netz verteilt, dadurch aber häufiger auf das untergeordnete Straßennetz ausgewichen wird,
- Verdrängungserscheinungen ins untergeordnete Netz dadurch entgegengewirkt werden kann, dass lediglich auf dem Hauptstraßennetz dynamisch navigiert wird und das untergeordnete Netz mit statischen Werten belegt wird, die allerdings einen so hohen Widerstand erzeugen, dass nur in gravierenden Fällen und im direkten Umfeld des Zieles diese Straßenklassen befahren werden,

- mit statischer Navigation auch bei normalen Verkehrsverhältnissen Reisezeitvorteile nur bei Penetrationsraten bis 15 % und zum Teil bis 25 % erzielbar sind (Reisezeitreduzierung für die Navigierten um bis zu 20 % auf einer Quelle-Ziel-Relation, bei höheren Ausstattungsraten negative Auswirkungen bis zu 30 % Reisezeiterhöhung) und
- das Einsetzen einer dynamischen Navigation erst nach Überschreiten einer bestimmten Reisezeiterhöhung sinnvoll ist, diese Schwelle aber deutlich niedriger als der heute gängige Werte von 60 % Reisezeiterhöhung sein sollte, um die Feinfühligkeit zu erhöhen, da sich sonst negative Reisezeitverlängerungen von bis zu 50 % auf bestimmten Relationen für die Navigierten ergeben können.

Die dargestellten Analysen und die gezogenen Rückschlüsse fokussieren den volkswirtschaftlichen Aspekt der Reisezeitersparnis. Die aus den Ergebnissen ablesbaren maximalen Gesamt-reisezeitgewinne von etwa fünf Prozent mögen zunächst gering erscheinen, bei Berücksichtigung, dass gerade Veränderungen in der Spitze oft am meisten spürbar sind, ist es ein nicht zu vernachlässigender Wert. Navigation kann aber nur dann in Hinsicht auf eine Reisezeitreduzierung und eine Staureduzierung wirksam werden, wenn im Netz Kapazitätsreserven und Ausweichrouten vorhanden sind. Dem Anspruch, Verkehrsproblemen allein durch Navigation der Fahrzeuge entgegenwirken zu können, können diese Systeme somit nicht gerecht werden.

Die Versorgung der Verkehrsteilnehmer mit aktuellen Verkehrsdaten sollte aber noch aus einem anderen Blickwinkel, auf den im Rahmen dieser Arbeit nicht näher eingegangen werden konnte, betrachtet werden, nämlich dem Komfortgewinn durch einen Informationsvorteil. Wird ein Verkehrsteilnehmer über den aktuellen Verkehrszustand informiert, kann daraus nicht nur eine Umfahrung abgeleitet werden, sondern zu einem entspannteren und dadurch aus sichereren Fahren beitragen.

## 10 Zusammenfassung und Ausblick

Rund zehn Jahre nach Markteinführung individueller Navigationssysteme für den Straßenverkehr in Deutschland haben diese Systeme den Durchbruch erreicht und werden damit zur beeinflussenden Größe des Verkehrszustands. Stellten Navigationsgeräte in den ersten Jahren ein Luxusgut dar, das nur sehr wenige Verkehrsteilnehmer zur Verfügung hatten, führt vor allem der Boom der portablen Systeme dazu, dass die Penetrationsrate rasch steigt. Damit haben Navigationssysteme das Potenzial, zur beeinflussenden Größe des Verkehrs zu werden, wobei die letztendliche Nutzungsrate von der angebotenen Servicequalität abhängt, und somit von der Penetrationsrate abweichen kann.

Die Ausstattungsquote zugelassener Fahrzeuge mit einem Navigationsgerät beträgt in Deutschland heute bereits etwa 14 %, bei Neuwagen sogar 25 % [Blaupunkt GmbH, 2006]. Der vornehmliche Anwendungsfall liegt bei Fahrten in ortsfremden Gebieten und bei weiträumigeren Fahrten mit großem Anteil des hochrangigen Netzes. Genaue Aussagen zur Nutzungsrate in den für den Nutzer bekannten städtischen Gebieten können nicht gemacht werden, liegen aber wohl noch deutlich unter der Penetrationsrate. Die stark wachsende Verbreitung portabler Geräte, deren neueste Generation nun auch in der Lage ist, aktuelle Verkehrsmeldungen zu empfangen, lässt eine deutliche Veränderung erwarten. Die steigende Anzahl an Navigationsgeräten, für die bis zum Jahre 2010 im Vergleich zur heutigen Lage eine Verdopplung bis Verdreifachung prognostiziert wird [Blaupunkt GmbH, 2006], führt dazu, dass bereits mittelfristig Zustände erreicht werden, für die die Systemkonzeption bisheriger Navigationsgeräte, nämlich die Bestimmung und Führung entlang des individuellen Bestwegs unabhängig von den anderen Verkehrsteilnehmern, nicht ausgelegt ist. Verhalten sich viele Verkehrsteilnehmer bedingt durch die Navigationsanweisung in gleicher Weise, kann der zunächst erzielbare Vorteil für den einzelnen Verkehrsteilnehmer, aber auch für das Gesamtverkehrsgeschehen, abgeschwächt werden oder sogar zu negativen Wirkungen führen.

Navigation verändert die Routenwahl des einzelnen Verkehrsteilnehmers, so dass sich mit zunehmender Ausstattungsrate bzw. Nutzungsrate die Belastungsverteilung und der gesamte Netzzustand verändert. Aufgrund der Abhängigkeiten von Routenwahl, Belastungsverteilung im Netz und daraus wiederum resultierender Entscheidung des einzelnen Verkehrsteilnehmers über seine Route hängt die Wirkung der Information über den Verkehrszustand in hohem Maße von ihrem Inhalt und ihrer Art und Aktualität, in der sie bereitgestellt wird, ab.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Analyse des Einflusses von Verkehrszustandsinformation und Zielführung auf die Routenwahl und deren Wirkung auf den Verkehrszustand. Der Fokus liegt auf der Identifizierung netzweiter Zusammenhänge speziell in städtischen Bereichen, da sich hier aufgrund der feinteiligen Struktur und der Überlagerung unterschiedlicher Einflüsse die Anwendung von Informations- und Leitsystemen als schwierig erweist. Die Analyse der Wirkungen von Navigation in diesen Gebieten liefert die Basis zur Identifizierung notwendiger Anpassungen der Systeme an die anderen örtlichen und verkehrlichen Randbedingungen, um darauf aufbauend die Richtung für effektive Weiterentwicklungen ableiten zu können.

Die Untersuchungen basieren auf einer modellmäßigen Betrachtung mittels mikroskopischer Simulation, wobei das Straßennetz von Hannover als Beispiel eines typisch städtischen Umfelds abgebildet wurde. Um möglichst realitätsnahe Verhaltensweisen in der Simulation zu erzeugen, wurden die unterschiedlichen Verhaltensweisen und Einflüsse, wie variierende Wahrnehmungen, Empfindungen und Bewertungen von Alternativen und Lernverhalten der Verkehrsteilnehmer, durch differenzierte Kosten- und Routenwahlansätze modelliert.

Um die Wirkung von Navigation abzustecken, wurden Szenarien generiert, die eine Variation der Aktualisierungsrate der Information und der Penetrationsrate navigierter Verkehrsteilnehmer vornehmen, wobei der Einfluss sowohl bei normalen Verkehrszuständen wie auch bei unvorhergesehenen Störfällen getestet wurde. Im Rahmen dieser Arbeit wurde davon ausgegangen, dass die Penetrationsrate mit Navigationsgeräten auch ihrer Nutzungsrate entspricht, so dass alle navigierten Verkehrsteilnehmer die Anweisungen vollständig befolgen. Zudem wurde unterstellt, dass die Navigation für alle ausgestatteten Verkehrsteilnehmer in gleicher Weise funktioniert, was bedeutet, dass Unterschiede in den Geräten und den individuellen Konfigurationen vernachlässigt wurden. Bei der Einordnung der Ergebnisse und der Übertragung auf Zeiträume, in denen die jeweiligen untersuchten Situationen relevant werden, sind daher der Unterschied zur tatsächlich vorhandenen Nutzungsrate und die Variationen in den Geräten zu berücksichtigen.

Die durchgeführten Simulationsuntersuchungen zeigen den Rahmen auf, in welchem Maße die Zielführung von Verkehrsteilnehmern auf den Netzzustand und die resultierenden Reisezeiten Einfluss nehmen kann. Es zeigt sich, dass sich positive Wirkungen nicht nur für einzelne Verkehrsteilnehmer oder -gruppen erzielen lassen, sondern sich über das Gesamtnetz gesehen Reisezeitreduzierungen einstellen. Es wird zudem deutlich, dass die Fragestellung der Zielführung nicht unabhängig von dem vorliegenden Störereignis, dessen Dauer und der verfügbaren Erfassungsgenauigkeit betrachtet werden darf bzw. die Erfassung und Datenweitergabe auch daraufhin ausgelegt werden muss.

Für die Navigation in städtischen Bereichen werden hoch aufgelöste und aktuelle Daten in Zeitschritten nicht größer als fünf Minuten benötigt. Unter Voraussetzung dieser feinen zeitlichen Auflösung und einer flächendeckenden Erfassung des aktuellen Verkehrszustands lässt sich eine Gesamtreisezeitreduzierung von maximal fünf Prozent erzielen. Die Verkehrsnachfrage verteilt sich dann stärker im Netz, wobei auch häufiger das untergeordnete Netz befahren wird. Auf einzelnen Quelle-Ziel-Relationen können Reisezeitreduzierungen von bis zu 20 % bei normalen Verkehrsverhältnissen und bei unvorhergesehenen Störungen von bis zu 40 % für die Navigierten erzielt werden, wobei sich auch deutliche positive Auswirkungen für die Nicht-Navigierten ergeben.

Bei größeren Intervallen von 15 Minuten oder 30 Minuten ist die Reaktion auf Störungen zu verzögert, so dass sich kein oder nur ein geringer Reisezeitvorteil ergibt. Unter diesen Bedingungen lassen sich positive Reisezeitveränderungen von nur noch drei bzw. vier Prozent bezogen auf das Gesamtnetz erreichen. Auf einzelnen Verkehrsbeziehungen kann die Aktualisierung der Information in diesen großen Zeitabständen zu einer Verschlechterung des Verkehrsgeschehens mit zum Teil Reisezeitverdoppelungen gegenüber dem Fall, dass keiner navigiert ist, führen.

Die Penetrationsrate ist eine weitere Einflussgröße, die den sich einstellenden Verkehrszustand beeinflusst. Individuelle Reisezeitvorteile für die navigierten Verkehrsteilnehmer stellen sich vornehmlich bei niedrigen bis mittleren Ausstattungsraten von maximal 35 % ein. Abhängig vom Aktualisierungsintervall resultieren maximale Reisezeitreduzierungen bei dynamischer Navigationsweise bei einer Penetrationsrate von 35 %, bei statischer dagegen bereits bei 15 % bis 25 %, wobei sie auch nicht so deutlich ausgeprägt sind. Bei höheren Raten setzt durch das zu gleichmäßige Verhalten der Fahrzeuge ein gegenseitiges Behindern ein, so dass die Gesamt-reisezeiten wieder ansteigen und oftmals kein positiver Effekt mehr bei hohen und sehr hohen Prozentsätzen Navigierter (50 % und mehr) erzielt werden kann. Dieses Phänomen zeigt sich auch bei Betrachtung einzelner Quelle-Ziel-Relationen, auf denen die bei geringen und mittleren Penetrationsraten erzielbaren deutlichen Reisezeitgewinne mit zunehmenden Anteil Navigierter abnehmen oder sogar negativ (bis zu Reisezeitverdoppelungen) im Vergleich zum Fall, dass kein Verkehrsteilnehmer navigiert ist, ausfallen.

Der Penetrationsbereich, in dem maximale Gesamtreisezeitgewinne erzielt werden, und der Umkehrbereich, ab dem sich sogar negative Auswirkungen für das Gesamtsystem ergeben, da der Anteil navigierter Fahrer zu groß wird und ein zu identisches Verhalten einsetzt, variiert stark in Abhängigkeit der Navigationsweise.

Die dynamische Navigation, der im Rahmen dieser Arbeit eine Zielführung auf Basis flächendeckender Erfassung des Verkehrs zugrunde liegt, lässt die größten Reisezeitgewinne erzielen und ist bei einem kurzen Aktualisierungsintervall auch noch bei sehr hohen Ausstattungsraten von 75 % in der Lage, mit positiven Auswirkungen für das Gesamtsystem zu wirken. Liegen aktuelle Informationen nur auf dem Hauptstraßennetz vor, verringert sich der Reisezeitgewinn. Bei Penetrationsraten bis zu 35 % ist der positive Effekt aber noch so deutlich, dass diese Einschränkung unter Berücksichtigung des sich deutlich reduzierenden Erfassungsaufwands als sinnvoll eingestuft wird. Gleiches gilt auch für eine dynamische Navigation erst bei Überschreitung einer bestimmten Reisezeiterhöhung, wobei für den Einsatz in städtischen Netzen eine deutlich niedrigere Schwelle als der in den Simulationen untersuchte Wert von 60 % Reisezeiterhöhung gegenüber der unbehinderten Reisezeit angenommen werden sollte, um feinfühlig reagieren zu können.

Um den idealisierten Zuständen einer flächendeckenden dynamischen Navigation heute reale gegenüberstellen zu können, wurden Simulationsexperimente durchgeführt, die die heute gängigen Navigation auf Basis durchschnittlicher statischer Geschwindigkeitswerte abbilden.

Die statische Navigation vermag nicht auf ortsspezifische Gegebenheiten und unvorhergesehene Störungen zu reagieren, weshalb nur bei geringen Penetrationsraten bis etwa 15 % ein Reisezeitvorteil bewirkt werden kann (Reisezeitreduzierungen um bis zu 20 % auf bestimmten Quelle-Ziel-Relationen). Größere Ausstattungsraten führen zu einer deutlichen Verschlechterung.

rung der Reisezeiten im Vergleich zum Referenzszenario, bei dem kein Fahrzeug navigiert ist, sowohl für den einzelnen Verkehrsteilnehmer (bis zu 30 % Reisezeiterhöhung) wie auch in Hinblick auf das Gesamtsystem (mehr als 6 % Reisezeiterhöhung).

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass Navigation in städtischen Gebieten dazu beitragen kann, Reisezeiten zu reduzieren. Die maximal erzielten Minderungen von etwa fünf Prozent in Bezug auf das Gesamtsystem mögen relativ gering erscheinen. Absolut betrachtet handelt es sich dabei um eine nicht zu vernachlässigende Größe von rund 2500 Fahrzeug-Stunden bezogen auf den betrachteten Zeitraum von 6:00 Uhr bis 10:00 Uhr. Navigation kann aber nur dann in Hinsicht auf eine Reisezeitreduzierung und eine Staureduzierung wirksam werden, wenn im Netz Kapazitätsreserven und Ausweichrouten vorhanden sind. Dem Anspruch, Verkehrsproblemen allein durch Navigation der Fahrzeuge entgegenwirken zu können, können diese Systeme somit nicht gerecht werden.

Aus den Untersuchungen wird auch erkennbar, dass mit zunehmender Beliebtheit und entsprechend ansteigender Penetrationsrate bzw. Nutzungsrate von Navigationssystemen eine entscheidende Weiterentwicklung der Zielführungssysteme notwendig wird. Dies betrifft zum einen die Datenbasis, die der Navigation zur Verfügung gestellt wird und zum anderen die Strategie der Routenauswahl des Navigationssystems selbst.

Die Zielführung des Einzelnen erfolgt bisher unabhängig von den anderen Verkehrsteilnehmern und basiert auf statischen oder dynamischen Geschwindigkeitswerten auf den einzelnen Netzteilen. Um Kapazitätsreserven des Netzes nutzen zu können, reicht die individuelle und autonome Bestimmung eines Bestwegs für alle Navigierten in gleicher Weise nicht mehr aus, wenn sie den gleichen Streckenabschnitt trotz unterschiedlicher Ziele wählen, der bei noch geringerer Verkehrsbelastung die günstigste Alternative darstellen würde.

In Abhängigkeit des Störungsausmaßes ist eine Umfahrung zu finden, die nicht zwangsläufig möglichst kleinräumig um den Staubereich herumführt, sondern den Verkehr gleichmäßig auf die vorhandenen Alternativen aufteilt, wobei die individuellen Fahrrelationen (kleinräumig - großräumig, Ziel in oder in direkter Umgebung des Störbereichs oder weiter entfernt) berücksichtigt werden. Um dem dabei möglichen, als kritisch zu bewertenden Ausweichen auf das untergeordnete Straßennetz entgegen wirken zu können, ist eine Anreicherung der Datengrundlagen mit Attributen notwendig, die die verkehrsplanerischen Aspekte wiedergeben. Die derzeit bei der Navigation verwendeten digitalen Netze beruhen auf einer Klassifizierung durch den Kartenhersteller, die von einer verkehrsplanerischen Einstufung abweichen kann. Bei der Erstellung der digitalen Grundlagen wäre eine Einbeziehung der zuständigen regionalen Gebietskörperschaften anzustreben, da diese in der Lage sind, differenzierte Netzbewertungen vorzunehmen und hier oftmals bereits Leitstrategien ausgearbeitet worden sind, die ein Umlenken im Störfall ohne Befahrung sensibler Gebiete ermöglichen, und somit auch bei der individuellen Navigation Berücksichtigung finden könnten.

Eine intelligente Zielführung kann aber nur dann resultieren, wenn eine differenzierte Kenntnis über den aktuellen und möglichst auch den zukünftigen Verkehrszustand vorliegt und eine Kommunikation mit den Fahrzeugen bzw. der Fahrzeuge untereinander stattfindet. Dies setzt voraus, dass Verkehrsdaten in feiner zeitlicher Auflösung möglichst flächendeckend vorliegen. Die Erfassung dieser Daten durch infrastrukturseitige Aufrüstung mit Detektoren ist sehr kostspielig, weshalb der Weg zu einer flächendeckenden Erfassung gerade in städtischen Berei-

chen darin gesehen wird, die Fahrzeuge selbst als Messsonden – so genannte Floating Cars - zu nutzen. Dies hätte den Vorteil, in einem erweiterten Schritt auch bidirektional die Kommunikation von einer Zentrale zum Fahrzeug aufnehmen und differenzierte Strategien umsetzen zu können. Die mittels der Floating Cars bestimmte Verkehrslage könnte dem einzelnen Verkehrsteilnehmer zur Verfügung gestellt werden, damit er seine Routenwahl autonom vornehmen kann. Sollten sich Verkehrsstörungen ergeben oder auch weitere Kontrollgrößen wie Wetter- und Umweltdaten (bspw. Schadstoffkonzentrationen) ermittelt werden, die ein Eingreifen der Zentrale notwendig machen, könnten die reinen Informationen durch Lenkungsempfehlungen ergänzt oder sogar durch Vorgaben (insbesondere bei Vorliegen mautpflichtiger Strecken umsetzbar) ersetzt werden. Verfahren zur Generierung von Floating Car Data sind bereits entwickelt, für einen flächendeckenden und standardmäßigen Einsatz im städtischen Bereich sind sie aber noch nicht genügend, vor allem in Hinblick auf ein umsetzbares Betreiber- und Geschäftsmodells, ausgereift. Für Kommunikationsstrategien vom Fahrzeug mit der Infrastruktur und zwischen den Fahrzeugen sind Ansätze vorhanden, befinden sich allerdings noch am Anfang.

Als geeignetes Kommunikationssystem wird ein Mobilfunksystem gesehen, da damit die Verteilung großer Informationsmengen erfolgen kann und bereits eine flächendeckende Infrastruktur vorhanden ist. Um die individuelle Navigation des Straßenverkehrs zukunftsfähig zu machen, sind die Entwicklungen auf diesen Gebieten zu berücksichtigen und eine Zusammenführung und Abstimmung von Navigationssystemen, Datenerfassungssystemen und Kommunikationskonzepten herzustellen.

Eine intelligente Zielführung der Zukunft sollte vorausschauend agieren, da nicht der aktuelle Verkehrszustand an einem bestimmten Abschnitt für die Routenwahl entscheidend ist, sondern der Zustand zu dem Zeitpunkt, an dem das Fahrzeug dort ankommt, weshalb Kurzfristprognosen notwendig werden. Hierbei liegt die entscheidende Aufgabe in der Verkehrsmodellierung. Vor allem verhaltenspsychologische Aspekte der Routenwahl zeigen noch Erkenntnisdefizite auf, die zukünftige Forschungsarbeiten in der Verkehrswissenschaft zu lösen haben werden. In der vorliegenden Arbeit wurde versucht, das Verkehrsverhalten durch Einbeziehung mehrerer die Routenwahl beeinflussender Komponenten differenzierter nachzubilden. Dies kann jedoch nur als eine Annäherung an die komplexen Zusammenhänge verstanden werden.

Erst fortführende detaillierte empirische Untersuchungen werden ermöglichen, die Modellvalidität weiter zu entwickeln und so ein Instrumentarium zu schaffen, mit dem die individuelle Entscheidungstiefe der Routenwahl in ihrer Dynamik und in den netzweiten Zusammenhängen in höherer Genauigkeit verstanden und daraufhin abgebildet werden kann.

Navigationsgeräte der Zukunft werden wohl über ihre heutige Aufgabe der Zielführung zwischen definierbaren Orten hinaus ein weitreichenderes System darstellen. Ideen gehen dahin, dass es sich zu einer Plattform entwickelt, die dem Nutzer nicht nur Unterstützung bei der Bewegung im Straßenraum liefert, sondern bei den Besorgungen im Alltag hilft. Der dem Gerät mitgeteilte Wunsch des Fahrers beispielsweise zum Kauf eines Rasierschaums wird durch das System als Suche nach einer Drogerie übersetzt, zu der dann möglichst direkt geführt wird. Hat der Fahrer mehrere Erledigungen zu tätigen, kann das System eine optimale Wegekette entwerfen. Die Navigation erfolgt durch Einblendung von Fahrhinweisen in einer dreidimensionalen Darstellung des realen Umfelds, das mit zusätzlichen Informationen bis hin zu Werbung angereichert sein kann.

Bevorzugte Handlungsabläufe und individuelle Fahr- und Wegevorlieben lernt das System und vermag sich den spezifischen Eigenheiten des Fahrers anzupassen. Die tatsächlich erlebten Reisezeiten werden analysiert und mit den digitalen Kartendaten verglichen, so dass bei wiederholtem Befahren eine Anpassung der Grunddaten erfolgen kann, wobei auch eine zeitliche Differenzierung erfolgen kann. Die angereicherten Daten dienen der Verbesserung der Navigation des einzelnen Fahrers, können aber auch an eine Zentrale weitergegeben werden, die die verbesserten Daten den weiteren Verkehrsteilnehmern zu Verfügung stellt.

Es besteht noch großer Entwicklungsbedarf zur Erreichung eines solchen Systems, wobei zu testen ist, ob sich eine Verarbeitung direkt im Gerät oder nach Anfrage und Übermittlung der Daten in einer Zentrale als sinnvoller erweist. Der rasante Verkaufsanstieg der zurzeit auf dem Markt befindlichen Geräte zeigt aber die wachsende Nutzerbereitschaft und das steigende Vertrauen in Navigationsgeräte. Für die zukünftige Wirkung auf das Verkehrsgeschehen wird entscheidend sein, in welchem Maße und wie gut verkehrsplanerische Aspekte in solch einem System integriert sein werden. Die Herausforderung besteht darin, ein System zu entwickeln, das die Übertragung von Verkehrsinformationen in Verbindung mit dynamischer Navigation, Verkehrlenkungsstrategien und – sollte die politische Entscheidung dahin gehen – auch die Mautgebührenerhebung kombiniert. Der Vorteil der Zusammenführung der unterschiedlichen Funktionen liegt darin, dass Redundanzen von Komponenten, wie beispielsweise Kommunikations- und Ortungseinrichtungen, vermieden werden könnten und dadurch die Rahmenbedingungen für einen wirtschaftlichen Betrieb und ein entsprechendes Geschäftsmodell geschaffen werden könnten.





## Literatur

- ABDEL-ATY, M. & ABDALLA, F. (2004): Understanding drivers' route choice under long-term pretrip and short-term en-route traffic information using generalized estimating equations. *Journal of Transportation Engineering-Asce*, 130: 777-786.
- ABDEL-ATY, M., KITAMURA, R. & JOVANIS, P. (1997): Using stated preference data for studying the effect of advanced traffic information on drivers' route choice. *Transportation Research Part C - Emerging Technologies*, 5: 39-50.
- AIMSUN 5.0 Microsimulator - User's Manual 5.0.5*, (2005): Barcelona, Spain, TSS - Transportation Simulation Systems.
- AIMSUN API Manual 5.0.4*, (2005): Barcelona, Spain, TSS - Transportation Simulation Systems.
- AIMSUN NG - User Manual 0.9*, (2005): Barcelona, Spain, TSS - Transportation Simulation Systems.
- AIMSUN Version 4.2 - User Manual*, (2004): Barcelona, Spain, TSS - Transportation Simulation Systems.
- BECKMANN, K. J., BECKMANN, B., WEHMEIER, T., DÜSTERWALD, M., SERWILL, D. & SPRINGSFELD, C. (2001): *Verkehrstechnische Effekte kollektiver und individueller Zielführung*, Bonn, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 815, herausgegeben vom Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abteilung Straßenbau.
- BEN-AKIVA, M., DE PALMA, A. & KAYSI, I. (1991): Dynamic Network Models and Driver Information Systems. *Transportation Research Part A - Policy and Practice*, 25: 251-266.
- BENSHOOF, J. A. (1970): Characteristics of drivers' route selection behaviour. *Traffic Engineering and Control*, 11 (12) April 1970: 604-606, 609.
- BLAUPUNKT GMBH (2005): Anzahl von innerstädtischen TMC-Locations in Deutschland, interne Untersuchung, nicht veröffentlicht.
- BLAUPUNKT GMBH (2006): Marktentwicklung Navigationsgeräte, interne Untersuchung, nicht veröffentlicht.
- BORGMANN, R. (2006): Ermittlung von Motiven und Ausprägungen der Routenwahl mittels Befragungen. Projektarbeit am Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau der Universität Hannover.
- BOVY, P. H. L. & STERN, E. (1990): *Route Choice: Wayfinding in Transport Networks*, Dordrecht, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers.

- BRAUN, J. & WERMUTH, M. (Eds.) (1973): *VPS 3 - Konzept und Programmsystem eines analytischen Gesamtverkehrsmodells*, München, Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsplanung und Verkehrswesen der TU München.
- BRÄUTIGAM, K.-R., HALBRITTER, G. & KUPSCH, C. (2003): Simulationsrechnungen zu einigen Telematiktechniken und -diensten. *Internationales Verkehrswesen*, 55: 149-155.
- BUNDESANSTALT FÜR STRAßENWESEN - BAST (2006): *TMC-Location Tabelle Deutschland Version 5.01*, Bergisch Gladbach.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, B.-U. W. (2004): *Verkehr in Zahlen 2004/2005*, Hamburg.
- BUSSIEK, T. (1998): *Telematische Systeme im Personenverkehr - ein synergetisches Modell der Verkehrsmittelwahlentscheidung*, Wiesbaden, Deutscher Universitäts-Verlag.
- CASCETTA, E. (2001): *Transportation systems engineering : theory and methods*, Dordrecht [u.a.], Kluwer Acad. Publ.
- CASCETTA, E., NUZZOLO, A., RUSSO, F. & ANTONINO, V. (1996a): A Modified Logit Route Choice Model Overcoming Path Overlapping Problems. Specification and some Calibration Results for Interurban Networks. *13th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*. Lyon, France.
- CASCETTA, E., NUZZOLO, A., RUSSO, F. & ANTONINO, V. (1996b): A modified Logit model for route choice with explicit path enumeration. *4th Meeting of the EURO Working Group on Transportation*. University of Newcastle, U. K.
- CONQUEST, L., SPYRIDAKIS, J., HASELKORN, M. & BARFIELD, W. (1993): The effect of motorist information on commuter behaviour: classification of drivers into commuter groups. *Transportation Research Part C - Emerging Technologies*, 1: 183-201.
- CREMER, M. & LUDWIG, J. (1986): A Fast Simulation Model for Traffic Flow on the Basis of Boolean Operations. *Mathematics and Computers in Simulation*, 28: 297-303.
- DAGANZO, C. (1994): The cell transmission model: A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory. *Transportation Research Part B*, 28: 269-287.
- DAGANZO, C. (1995): The cell transmission model, Part II: Network traffic. *Transportation Research Part B*, 29: 79-93.
- DIJKSTRA, E. W. A. (1959): Note on two problems in connexion with graphs. *Journal of Numerical Mathematics*, 1: 269-271.
- DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (2004): *DIN EN ISO 14819-3: 2004-08 Verkehrs- und Reiseinformationen (TTI) - TTI-Meldungen über Verkehrsmeldungscodierung - Teil 3: Ortskodierung für ALERT-C (ISO 14819-3: 2004); Englische Fassung EN ISO 14819-3: 2004*, Berlin, Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 14819-1:2005-06 Verkehrs- und Reiseinformationen (TTI) - TTI-Meldungen über Verkehrsmeldungscodierung - Teil 1: Meldungsschlüssel für den digitalen Radio-Verkehrsnachrichtenkanal (RDS-TMC) unter Verwendung von ALERT-C (ISO 14819-1: 2003); Englische Fassung EN ISO 14819-1: 2003 + AC: 2004*, (2005): Berlin, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 14819-2: 2005-06 Verkehrs- und Reiseinformationen (Traffic and Traveller Information; TTI) - TTI-Meldungen über Verkehrsmeldungscodierung - Teil 2: Codiervorschrift für das Radio Data System - Verkehrsmeldungskanal (RDS-TMC) (ISO 14819-2: 2003); Englische Fassung EN ISO 14819-2: 2003*, (2005): Berlin, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH.

- DIN EN ISO 14819-3: 2004-08 Verkehrs- und Reiseinformationen (TTI) - TTI-Meldungen über Verkehrsmeldungscodierung - Teil 3: Ortskodierung für ALERT-C (ISO 14819-3: 2004); Englische Fassung EN ISO 14819-3: 2004, (2004): Berlin, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH.
- DIOS ORTÚZAR, J. D. & WILLUMSEN, L. G. (1997): *Modelling transport*, Chichester [u.a.], Wiley.
- FRANK, M. & WOLFE, P. (1956): An Algorithm for Quadratic Programming. *Naval Research Logistics Quarterly*, 3: 95-110.
- FREIESLEBEN, H.-C. (1976): *Geschichte der Navigation*, Wiesbaden.
- FRIEDRICH, M. (2002): Analyse und Optimierung von Verkehrsnetzen im IV und ÖV. *Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrs- und Stadtplanung, Heft 14, Technische Universität München*.
- FRIEDRICH, M. & SCHLEUPEN, G. (2006): Wege in Verkehrsnetzen. [www.optiv.de](http://www.optiv.de), Access Date 20.11.2006.
- FRIEDRICH, M. & VORTISCH, P. (2005): Verfahren zur dynamischen Verkehrsumlegung - ein methodischer Überblick. *Heureka'05*. Karlsruhe, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.
- GFK MARKETING SERVICES (2006): Portable Navigationsgeräte gefragter denn je. [https://gfkcms.gfk.com/group/press\\_information/press\\_release/00801/index.de.html](https://gfkcms.gfk.com/group/press_information/press_release/00801/index.de.html), Access Date 11.09.2006.
- GIPPS, P. G. (1981): A Behavioral Car-Following Model for Computer-Simulation. *Transportation Research Part B - Methodological*, 15: 105-111.
- GIPPS, P. G. (1986a): A Model for the Structure of Lane-Changing Decisions. *Transportation Research Part B-Methodological*, 20: 403-414.
- GIPPS, P. G. (1986b): Multisim - A Model for Simulating Vehicular Traffic on Multilane Arterial Roads. *Mathematics and Computers in Simulation*, 28: 291-295.
- HALL, R. W. (1996): Route Choice and Advanced Traveler Information Systems on a Capacitated and Dynamic Network. *Transportation Research Part C - Emerging Technologies*, 4: 289-306.
- HELLING, U. (2006): Fahrtzeit- und Informationsvorteile durch Dynamische Zielführung, Der Einfluß der Verkehrsmeldungsqualität unter Beachtung von Netzauslastung und Alternativrouten. *Dissertation am Institut für Verkehrswesen und Verkehrsbau der Universität Duisburg-Essen*. Essen.
- HU, T. Y. & MAHMASSANI, H. S. (1997): Day-to-day evolution of network flows under real-time information and reactive signal control. *Transportation Research Part C - Emerging Technologies*, 5: 51-69.
- JANSEN, G. R. M. & DEN ADEL, D. N. (1987): *Routekeuze van Automobilisten: een Onderzoek naar Kwalitatieve Keuzefactoren*. Delft, Delft University Press.
- KAYTON, M. (1990): *Navigation - Land, Sea, Air, & Space*, New York, U.S.A.
- KHATTAK, A., POLYDOROPOULOU, A. & BEN-AKIVA, M. (1996): Modeling revealed and stated pretrip travel response to advanced travel information systems. *Transport Research Record*, 1537.
- KIM, K. & VANDEBONA, U. (2002): Understanding route change behaviour - a commuter survey in South Korea. *81st Annual Meeting*. Washington D.C., Transportation Research Board.

- KÜHNE, R., NEUMANN, L. & ET AL. (1998): Auswirkungen von telematischer Beeinflussung verkehrsinfrastruktureller Kapazitäten auf die volkswirtschaftliche Rentabilität von Projekten der Bundesverkehrswegeplanung - Zwischenbericht. Bonn, Untersuchung im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr.
- LANDESMELDESTELLE NIEDERSACHSEN (2006): Auszug ausgestrahlter TMC-Meldungen im Zeitraum zwischen 11.01.2005 und 16.06.2006.
- LEONARD, D. R., POWER, P. & ET AL. (1989): *CONTRAM: structure of the model*, Crowthorn, Transportation Research Laboratory.
- LIU, Y. & MAHMASSANI, H. (1998): Dynamic aspects of departure time and route decision behavior under advanced traveler information systems (ATIS): modeling framework and experimental results. *Transportation Research Record*, 1645: 111-119.
- MAHMASSANI, H. S. & JAYAKRISHNAN, R. (1991): System Performance and User Response Under Real-Time Information in a Congested Traffic Corridor. *Transportation Research Part A - Policy and Practice*, 25A: 293-307.
- MAHUT, M. (2001): A multi-lane extension of the Space-Time Queue Model of Traffic Dynamics. *TRISTAN IV*. Azores Islands, Portugal.
- MATSCHKE, I. (2005): The Impact of Dynamic Navigation on the Travel Times in Urban Networks. *Proc. of the 10th EURO Working Group on Transportation*, 13. - 16. September. Poznan, Poland.
- MOORE, E. F. (1957): The Shortest Path Through a Maze. *Proceedings of the International Symposium on the Theory of Switching, The Annals of the Computing Laboratory of Harvard University 30, Part II*. Harvard, Harvard University Press.
- NAGEL, K. (2005): Multi-agent transportation simulation. <http://www.matsim.org/>, Access Date 12.12.2006.
- NAGEL, K. & SCHRECKENBERG, M. (1992): A cellular automaton model for freeway traffic. *Journal de Physique I*, 2: 2221-2225.
- PAPAGEORGIU, M. (1991): *Concise encyclopedia of traffic & transportation systems*, Oxford [u.a.], Pergamon Press.
- PAPAGEORGIU, M. (1998): Some remarks on macroscopic traffic flow modelling. *Transportation Research Part a-Policy and Practice*, 32: 323-329.
- POHL, J. & JANSSEN, S. (2004): Schneller Zugriff auf Verkehrszählungen - Eine Oracle-Datenbank in der Region Hannover. *Straßenverkehrstechnik*, 48: 453-458.
- POLYDOROPOULOU, A., BEN-AKIVA, M., KHATTAK, A. & LAUPRETE, G. (1996): Modeling revealed and stated en-route travel response to advanced traveler information systems. *Transportation Research Record*, 1537.
- PROGNOS AG & KELLER, H. (2001): *Wirkungspotentiale der Verkehrstelematik zur Verbesserung der Verkehrsinfrastruktur- und Verkehrsmittelnutzung*, Basel/ München, Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, FE-Nr. 96584/1999.
- RAMMING, M. S. (2002): Network Knowledge and Route Choice. *Department of Civil and Environmental Engineering*. Massachusetts Institute of Technology.
- REISS, R. A., GARTNER, N. H. & COHEN, S. L. (1991): Dynamic Control and Traffic Performance in a Freeway Corridor: a Simulation Study. *Transportation Research Part A - Policy and Practice*, 25: 267-276.
- ROBERT BOSCH GMBH (1995): *Bessere Verkehrsinformation (BEVEI) : Phase II ; BEVEI RDS TMC ; Kurzfassung des gemeinsamen Abschlußberichtes der Projektpartner*, [Stuttgart], R. Bosch GmbH.

- SCHNABEL, W., LOHSE, D. & LÄTZSCH, L. (1997): *Verkehrsplanung*, Berlin, Verlag für Bauwesen.
- SCHÜTT, H. (1991): Entwicklung und Erprobung eines sehr schnellen, bitorientierten Verkehrssimulationssystems für Straßennetze. *Schriftenreihe der AG Automatisierungstechnik der TU Hamburg-Harburg*. Hamburg.
- SERWILL, D. (1994): DRUM - Modellkonzept zur dynamischen Routensuche und Umlegung. *Institut für Stadtbauwesen*. Aachen, RWTH Aachen.
- SHEFFI, Y. (1985): *Urban Transportation Networks - Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods*, Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall Inc.
- STEIERWALD, G. & KÜNNE, H.-D. H. (1994): *Stadtverkehrsplanung : Grundlagen, Methoden, Ziele*, Berlin [u.a.], Springer.
- STERN, E. & LEISER, D. (1988): Levels of Spatial Knowledge and Urban Travel Modeling. *Geographical Analysis*, 20: 140-155.
- TORDAY, A. (2004): Elaboration d'un système de navigation auto-alimente (SNA) et évaluation de ses performances. *Section de genie civil ecole polytechnique federale de Lausanne*. Lausanne, ecole polytechnique federale de Lausanne.
- TORDAY, A. & DUMONT, A.-G. (2003): Accuracy of probe vehicles-based link travel time estimation for dynamic route guidance systems. *10th World Congress on Intelligent Transport Systems and Services*. Madrid.
- WARDROP, J. G. (1952): Some theoretical aspects of road traffic research. London, Institute of Civil Engineers.
- WERMUTH, M. (1994): Modellvorstellungen zur Prognose. in STEIERWALD, G. & KÜNNE, H.-D. (Eds.) *Stadtverkehrsplanung : Grundlagen, Methoden, Ziele*. Berlin [u.a.], Springer.
- WERMUTH, M., SOMMER, C. & WULFF, S. (2004): Erhebung der individuellen Routenwahl zur Weiterentwicklung von Umlegungsmodellen. Braunschweig, Institut für Verkehr und Stadtbauwesen der Technischen Universität 'Carolo Wilhelmina' zu Braunschweig, Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen.
- WIEDEMANN, R. (1974): Simulation des Straßenverkehrsflusses. *Heft 8 der Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe*. Karlsruhe.
- ZACKOR, H. & GROKE, R. (2003): *Stand der Verkehrstelematik in Deutschland im europäischen Vergleich*, Kassel, Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, FE-Nr. 96.0703/2001.
- ZACKOR, H. & KELLER, H. (1999a): *Entwurf und Bewertung von Verkehrsinformations- und -leitsystemen unter Nutzung neuer Technologien*, Bergisch Gladbach, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen - Verkehrstechnik, Heft V70.
- ZACKOR, H. & KELLER, H. (1999b): Entwurf und Bewertung von Verkehrsinformations- und -leitsystemen unter Nutzung neuer Technologien. *Straßenverkehrstechnik*, 9: 417-427.
- ZACKOR, H., KÜHNE, R. & STEIERWALD SCHÖNHARTING UND PARTNER (1993): *Pro-General Hauptphase : Ergebnisbericht (Phase II, 1989-92)*, Stuttgart,.
- ZIBUSCHKA, F. (1981): Die Routenwahl des Strassengüterverkehrs: netzspezifische Modellansätze für die Verkehrsumlegung. Wien, Bundesministerium für Bauten und Technik.



## Abbildungsverzeichnis

Bild 1.1: Beeinflussung des Verkehrszustands durch Verkehrsinformation/ Navigation.....	2
Bild 4.1: Lage der TMC-Locations in Hannover (nach TMC-Location-Tabelle Version 5.01 [Bundesanstalt für Straßenwesen - BASt, 2006]) .....	21
Bild 4.2: Absatz portabler Navigationsgeräte im Jahr 2005 [GfK Marketing Services, 2006] ...	23
Bild 4.3: Entwicklung und Prognose verkaufter Navigationsgeräte in Westeuropa von 1995 bis 2014 [Blaupunkt GmbH, 2006].....	23
Bild 4.4: Entwicklung und Prognose des Anteils zugelassener Fahrzeuge mit Navigationssystem [Blaupunkt GmbH, 2006].....	24
Bild 4.5: Pkw-Bestand in Deutschland differenziert nach dem Jahr der ersten Zulassung (Stand 01.01.2005) [Blaupunkt GmbH, 2006].....	25
Bild 6.1: Beispiel einer Netzdarstellung in AIMSUN NG .....	46
Bild 6.2: Darstellung des entsprechenden Netzes bei der Routenberechnung [AIMSUN 5.0, 2005] .....	46
Bild 7.1: Klassifizierung von Einflussfaktoren auf das individuelle Verkehrsverhalten (nach Bovy und Stern [1990]) .....	50
Bild 7.2: Beeinflussung des Routenwahlprozesses durch Verkehrsinformationen .....	50
Bild 7.3: Anzahl bekannter und genutzter Routen der 57 Befragten.....	55
Bild 7.4: Befahrene Routen der Probanden .....	56
Bild 7.5: Routenalternativen der Simulation, Startpunkt Podbielskistraße/ Walderseestraße in Höhe Raffaelstraße Richtung Ziel Universität.....	57
Bild 7.6: Routenalternativen der Simulation, Startpunkt Stresemannallee/ Altenbekener Damm Richtung Ziel Universität .....	57
Bild 7.7: Routenalternativen der Simulation, Startpunkt Hildesheimer Straße/ Wirkenburger Straße (L389) Richtung Ziel Universität .....	58
Bild 7.8: Befragungsergebnisse einer Untersuchung von Wermuth et al. [2004] zu den Motiven der Routenwahl analysiert nach Art der Aktivität (Mehrfachnennungen möglich).....	59
Bild 7.9: Befragungsergebnisse einer Untersuchung von Wermuth et al. [2004] zu den Motiven der Routenwahl analysiert nach Routentyp (Mehrfachnennungen möglich).....	60
Bild 7.10: Motive der Routenwahl der Befragten (Mehrfachnennungen möglich).....	61
Bild 7.11: Anteile der Reisezeitbeaufschlagung der Widerstandskomponente $FLC_{a,VT,v}^{STOPS}$ in Abhängigkeit des Gewichtungsfaktors $\phi_{VT}$ .....	64

Bild 7.12: Anteile der Reisezeitbeaufschlagung der Widerstandskomponente $FLC_{a,vT,v}^{RT}$ in Abhängigkeit des Gewichtungsfaktors $\mu_{vT}$ .....	66
Bild 7.13: Beispiele für den Verlauf des Widerstandsfaktors in Abhängigkeit des Fahrzeugtyps, der Straßenklasse und der Anzahl der Halte .....	68
Bild 7.14: Modellschema der Routenwahl und Routenbeeinflussung .....	71
Bild 7.15: Testnetz und Detailausschnitt eines Knotenpunkts im Testnetz .....	72
Bild 7.16: Überlappung der Routen .....	73
Bild 7.17: Veränderung der Routenwahlwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit des Skalierungsfaktors $\theta$ mit $\beta = 0,15$ und $\gamma = 1,0$ .....	74
Bild 7.18: Routenwahlwahrscheinlichkeit von Route I in Abhängigkeit der Skalierungsfaktors $\theta$ und des Gewichtungsparmeters $\beta$ .....	75
Bild 7.19: Straßenklassen des Testnetzes im Fall 3 .....	78
Bild 7.20: Schema der Routenwahl der nicht navigierten Verkehrsteilnehmer .....	81
Bild 7.21: Iterationsprozess zur Erzeugung des historischen Profils .....	82
Bild 7.22: Iterationsprozess der Simulationsstudie am Untersuchungsnetz Hannover .....	83
Bild 7.23: Schema der Routenwahl der navigierten Verkehrsteilnehmer .....	84
Bild 7.24: Routenwahlablauf der nicht navigierten und der dynamisch bzw. statisch navigierten Verkehrsteilnehmer .....	85
Bild 7.25: Routenwahl der navigierten Fahrzeuge, Ausstattungsrate 15 %, Aktualisierungsintervall 15 min .....	86
Bild 7.26: Lage der Störung im Testnetz .....	87
Bild 7.27: Routenkosten und Routenwahl der navigierten Fahrzeuge, Störung von 0:20 - 0:35 h Ausstattungsrate 15 %, Aktualisierungsintervall 15 min .....	88
Bild 7.28: Routenkosten und Routenwahl der navigierten Fahrzeuge, Störung von 0:20 - 0:35 h Ausstattungsrate 15 %, Aktualisierungsintervall 5 min .....	89
Bild 7.29: Routenkosten und Routenwahl der navigierten Fahrzeuge, Störung von 0:20 - 0:35 h Ausstattungsrate 15 %, Aktualisierungsintervall 1 min .....	90
Bild 7.30: Mittlere Reisezeiten der Quelle-Ziel-Beziehung, Störung von 0:20- 0:35 h Ausstattungsrate 15 %, Aktualisierungsintervall 15 min .....	90
Bild 7.31: Abnahme der mittlere Reisezeiten der Navigierten der Quelle-Ziel-Beziehung durch Reduzierung des Aktualisierungsintervalls auf 5 min Störung von 0:20- 0:35 h, Ausstattungsrate 15 % .....	91
Bild 7.32: Deutliche Reduzierung der mittleren Reisezeiten der Navigierten durch zeitnahes Umleiten bei einem Informationsintervall von 1 min Störung von 0:20- 0:35 h, Ausstattungsrate 15 % .....	91
Bild 7.33: Mittlere Reisezeit und Anzahl der nicht navigierten Verkehrsteilnehmer Störung, Ausstattungsrate 15 %, Aktualisierungsintervall 15 min .....	92
Bild 7.34: Mittlere Reisezeit und Anzahl der navigierten Verkehrsteilnehmer Störung, Ausstattungsrate 15 %, Aktualisierungsintervall 15 min .....	93
Bild 7.35: Mittlere Staulänge auf den Kanten, Störung von 0:20- 0:35 h Ausstattungsrate 15 %, Informationsintervall 15 min .....	94
Bild 7.36: Mittlere Staulänge auf den Kanten, Störung von 0:20- 0:35 h Ausstattungsrate 15 %, Informationsintervall 5 min .....	94

Bild 7.37: Mittlere Staulänge auf den Kanten, Störung von 0:20 - 0:35 h Ausstattungsrate 15 %, Informationsintervall 1 min .....	95
Bild 7.38: Mittlere Reisezeiten der Quelle-Ziel-Beziehung, Störung von 0:20- 0:35 h Ausstattungsrate 75 %, Informationsintervall 15 min .....	96
Bild 7.39: Mittlere Reisezeiten aller Fahrzeuge, Störung von 0:20- 0:35 h unterschiedliche Ausstattungsraten, Informationsintervall 15 min .....	96
Bild 7.40: Mittlere Reisezeiten aller Fahrzeuge, Störung von 0:20- 0:35 h unterschiedliche Ausstattungsraten, Informationsintervall 5 min .....	97
Bild 7.41: Mittlere Reisezeiten aller Fahrzeuge, Störung von 0:20- 0:35 h unterschiedliche Ausstattungsraten, Informationsintervall 1 min .....	97
Bild 8.1: Untersuchungsgebiet Hannover, farbliche Differenzierung entsprechend der Straßenklasse .....	100
Bild 8.2: Ganglinie der prozentualen Aufteilung der 24h-Verkehrsnachfrage über den Tag ...	103
Bild 8.3: Streckenabschnitte mit TMC-Verkehrsmeldungen (rot gekennzeichnet) im Zeitraum von Januar 2005 bis Juni 2006 in Hannover (ohne Meldungen auf Autobahnen) [Landesmeldestelle Niedersachsen, 2006] .....	107
Bild 8.4: Lage der Störfälle im Untersuchungsnetz .....	109
Bild 9.1: Differenziert analysierte Verkehrsbeziehungen .....	112
Bild 9.2: Gesamtreisezeit [Fzh] im Netz im Normalfall mit dynamischer Navigation .....	114
Bild 9.3: Mittlere Anzahl an Fahrzeugen pro Stunde im Netz bei dynamischer Navigation ....	114
Bild 9.4: Gesamtreisezeit [Fzh] im Netz bei den Störfall-Szenarien mit dynamischer Navigation .....	116
Bild 9.5: Prozentualer Gesamtreisezeitgewinn im Netz bei dynamischer Navigation .....	116
Bild 9.6: Prozentualer Gesamtreisezeitgewinn der Pkw bei dynamischer Navigation .....	117
Bild 9.7: Deutlicher Gesamtreisezeitgewinn für den Fahrzeugtyp ‚Lkw bis 7,5 t‘ bei dynamischer Navigation .....	117
Bild 9.8: Geringe prozentuale Reduzierung der Gesamtreisezeit für den Fahrzeugtyp ‚Pkw-Fernverkehr‘ bei dynamischer Navigation .....	118
Bild 9.9: Geringer ausfallender Gesamtreisezeitgewinn im Netz bei dynamischer Navigation nur auf dem Hauptstraßennetz .....	119
Bild 9.10: Geringe und bei mittleren Penetrationsraten bereits negativ ausfallender Gesamtreisezeitgewinn im Netz bei statischer Navigation .....	119
Bild 9.11: Geringer ausfallende prozentuale Reduzierung der Gesamtreisezeit im Netz bei dynamischer Navigation ab einem Schwellwert durch verzögertes Reagieren .....	120
Bild 9.12: Mittlere Reisezeiten der Fahrzeuge der Quelle-Ziel-Relation (1)-(3) bei unterschiedlichen Penetrationsraten, Informationsintervall 30 min, normale Verkehrsverhältnisse .....	122
Bild 9.13: Prozentuale Reisezeitreduzierung der Fahrzeuge der Quelle-Ziel-Relation (1)-(3) Informationsintervall 30 min, normale Verkehrsverhältnisse .....	122
Bild 9.14: Reduzierung der mittlere Reisezeiten der Fahrzeuge der Quelle-Ziel-Relation (1)-(3) bei einem Informationsintervall von 15 min, normale Verkehrsverhältnisse .....	123
Bild 9.15: Deutliche Reduzierung der mittlere Reisezeiten der Fahrzeuge der Quelle-Ziel-Relation (1)-(3) insbesondere bei hohen Penetrationsraten, 5 min- Informationsintervall .....	123

Bild 9.16: Deutliche Verschiebung des Einsetzens negativer Auswirkungen in höhere Penetrationsbereiche, Quelle-Ziel-Relation (1)-(3), 5 min-Informationsintervall .....	124
Bild 9.17: Routen der dynamisch navigierten Pkw der Quelle-Ziel Relation (1)-(3) bei 35 % Penetrationsrate, Informationsintervall 30 min .....	124
Bild 9.18: Veränderungen des Bestwegs der dynamisch navigierten Pkw der Quelle-Ziel Relation (1)-(3) über die Zeit durch Verkürzung des Informationsintervalls auf 15 min .....	125
Bild 9.19: Veränderungen des Bestwegs der dynamisch navigierten Pkw der Quelle-Ziel Relation (1)-(3) über die Zeit durch Verkürzung des Informationsintervalls auf 5 min .....	125
Bild 9.20: Routen der nicht navigierten Pkw der Quelle-Ziel Relation (1)-(3) .....	126
Bild 9.21: Sehr ähnliche mittlere Reisezeiten der Nicht-Navigierten und Navigierten der Quelle-Ziel-Relation (1)-(3) bei einem Informationsintervall von 30 min .....	127
Bild 9.22: Prozentuale Reisezeitreduzierung der Nicht-Navigierten und Navigierten der Quelle-Ziel-Relation (1)-(3) bei einem Informationsintervall von 30 min .....	127
Bild 9.23: Rascheres Umlenken und dadurch bedingte Reduzierung der mittlere Reisezeiten bei einem kürzeren Aktualisierungsintervall von 15 min.....	128
Bild 9.24: Deutliche Dämpfung des Ansteigens der mittleren Reisezeiten der Nicht-Navigierten und Navigierten bei einem Informationsintervall von 5 min .....	128
Bild 9.25: Deutliche prozentuale Reisezeitreduzierung für die Nicht-Navigierten wie auch für die Navigierten der Quelle-Ziel-Relation (1)-(3) bei einem Informationsintervall von 5 min .....	129
Bild 9.26: Mittlere Reisezeiten der Fahrzeuge der Quelle-Ziel-Relation (3)-(1) bei unterschiedlichen Penetrationsraten, normale Verkehrsverhältnisse, Navigationsweise: statisch.....	131
Bild 9.27: Deutlicher Reisezeitvorteil der statisch Navigierten bei niedrigen Ausstattungsraten im Vergleich zu starken Negativeffekten bei mittleren Penetrationsraten .....	131
Bild 9.28: Deutlicher Reisezeitvorteil der statisch Navigierten bei niedrigen Ausstattungsraten im Vergleich zu starken Negativeffekten bei mittleren Penetrationsraten .....	132
Bild 9.29: Routen der nicht navigierten Pkw der Quelle-Ziel Relation (3)-(1) bei 25 % Penetrationsrate .....	132
Bild 9.30: Route der statisch navigierten Pkw der Quelle-Ziel Relation (3)-(1).....	133
Bild 9.31: Routen der nicht navigierten (links) und der statisch navigierten Pkw (rechts) der Quelle-Ziel Relation (4)-(3) bei 35 % Penetrationsrate .....	134
Bild 9.32: Längere Reisezeiten der Navigierten durch unvorteilhafte statische Zielführung.....	134
Bild 9.33: Höhere mittlere Reisezeit der navigierten Pkw der Quelle-Ziel-Relation (3)-(4) bei Ansteigen der Verkehrsnachfrage durch Konzentration auf das Hauptstraßennetz. 135	
Bild 9.34: Geringer ausfallende prozentuale Reisezeitreduzierung der navigierten Pkw der Quelle-Ziel-Relation (3)-(4) bei dynamischer Navigation nur auf dem Hauptstraßennetz .....	136
Bild 9.35: Routen der nicht (links), der dynamisch (Mitte) und der dynamisch nur auf dem hochrangigen Straßennetz (rechts) navigierten Pkw der Quelle-Ziel Relation (3)-(4) bei 35 % Penetrationsrate, Informationsintervall 15 min, normale Verkehrsverhältnisse .....	136

Bild 9.36: Ähnliche mittlere Reisezeiten der Fahrzeuge der Quelle-Ziel-Relation (1)-(3) im Störfall 1 wie bei normalen Verkehrsverhältnissen, Informationsintervall 30 min .....	137
Bild 9.37: Bereich des Westschnellwegs mit starken alltäglich wiederkehrenden Verkehrsstauungen und Lage des Störfalls 1 .....	138
Bild 9.38: Routen der nicht navigierten (links) und der dyn. navigierten Pkw (rechts) der Quelle-Ziel-Relation (1)-(3) bei 35 % Penetrationsrate im Zeitraum bis 7:30 h, Informationsintervall 30 min, Störfall 1 .....	139
Bild 9.39: Weiträumige Routenalternativen der nicht navigierten Pkw (links) gegenüber Umleitung der dyn. navigierten Pkw unmittelbar vor dem gestauten Bereich (rechts) im Zeitraum von 8:00 bis 8:30 h, Informationsintervall 30 min, Störfall 1 .....	139
Bild 9.40: Frühzeitigeres Umlenken der dyn. navigierten Pkw mit Zunahme der Verkehrsstörung im Zeitraum von 8:30 bis 9:00 h (links) und Rückkehr zur Ausgangsrouten bei nachlassender Verkehrsnachfrage im Zeitraum von 9:00 bis 9:30 h (rechts) .....	139
Bild 9.41: Routen der dyn. navigierten Pkw der Quelle-Ziel-Relation (1)-(2) bei 35 % Penetrationsrate, Aktualisierungsintervall 5 min, Störfall 1 .....	140
Bild 9.42: Keine Veränderung der mittleren Reisezeiten der Quelle-Ziel-Relation (3)-(4) durch Störfall 2, 35 % Penetrationsrate, Informationsintervall 30 min .....	141
Bild 9.43: Routen der nicht navigierten (links) und der dyn. navigierten Pkw im Zeitraum von 7:00 bis 7:30 h (Mitte) und von 7:30 bis 8:00 h (rechts) der Quelle-Ziel Relation (3)-(4) bei 35 % Penetrationsrate, Störfall 2 .....	141
Bild 9.44: Analysierte Einzelabschnitte der Hildesheimer Straße .....	142
Bild 9.45: Entwicklung der mittleren Geschwindigkeiten auf der Hildesheimer Straße Informationsintervall 30 min, 35 % Penetrationsrate, Störfall 2 .....	142
Bild 9.46: Ähnlicher Verlauf der mittleren Geschwindigkeiten auf der Hildesheimer Straße bei normalen Verkehrsverhältnissen, Informationsintervall 30 min, 35 % Penetrationsrate .....	143
Bild 9.47: Routen der nicht navigierten (links) und der dyn. navigierten Pkw (rechts) der Quelle-Ziel Relation (3)-(2) bei 35 % Penetrationsrate, Störfall 2 .....	143
Bild 9.48: Geschwindigkeitsabfall durch Störfall 3 und Ansteigen des Störungsausmaßes stromaufwärts, Informationsintervall 30 min, 35 % Penetrationsrate .....	145
Bild 9.49: Starkes Ansteigen der mittlere Reisezeiten der navigierten Pkw der Quelle-Ziel-Relation (5)-(4) durch Störfall 3, 35 % Penetrationsrate, Informationsintervall 30 min .....	146
Bild 9.50: Rascheres Abklingen der Reisezeiterhöhung bei einem Aktualisierungsintervall von 15 min, 35 % Penetrationsrate, Störfall 3 .....	146
Bild 9.51: Deutliche Reduzierung der mittlere Reisezeiten der Quelle-Ziel-Relation (5)-(4) durch zeitnahes Umlenken bei einem Aktualisierungsintervall von 5 min .....	147
Bild 9.52: Routen der nicht navigierten (links) und der dyn. navigierten Pkw (rechts) der Quelle-Ziel Relation (5)-(4) bei 35 % Penetrationsrate im Zeitraum von 7:30 bis 8:00 h, Informationsintervall 30 min, Störfall 3 .....	147
Bild 9.53: Verteilung der nicht navigierten Pkw über mehrere Routen (links) und kleinräumige Umleitung der dyn. navigierten Pkw (rechts) im Zeitraum von 8:00 bis 8:30 h (oben) und weiträumig bereits ab Quelle (5) im Zeitraum von 8:30 bis 9:00 h (unten) .....	148

Bild 9.54: Vermeidung des gestörten Bereichs auch von nicht navigierten Pkw (links) aufgrund des starkes Störungsausmaßes im Zeitraum von 9:00 bis 9:30 h (oben) und Rückkehr der dyn. navigierten Pkw (rechts) zur Ausgangsrouten ab 9:30 h (unten).....	149
Bild 9.55: Deutliche Reisezeitreduzierung der Navigierten auf Relation (5)-(4) bei einem Informationsintervall von 5 min im Vergleich zum Intervall von 15 min oder 30 min	150
Bild 9.56: Verringerung des Geschwindigkeitsabfalls und der Störungsausbreitung auf der Vahrenwalder Straße bei einem Aktualisierungsintervall von 15 min.....	151
Bild 9.57: Deutliche Verringerung des Geschwindigkeitsabfalls und der Störungsausbreitung auf der Vahrenwalder Straße bei einem Aktualisierungsintervall von 5 min.....	151
Bild 9.58: Routen der dyn. navigierten Pkw der Quelle-Ziel Relation (5)-(4) bei 35 % Penetrationsrate im Zeitraum von 7:45 bis 8:00 h (links) und rasche Umleitung der Navigierten im Zeitraum von 8:00 bis 8:15 h (rechts), Informationsintervall 5 min, Störfall 3.....	152
Bild 9.59: Großräumige Umfahrung des Störbereichs der dyn. navigierten Pkw der Quelle-Ziel Relation (5)-(4) im Zeitraum von 8:15 bis 8:30 h (links) und Rückkehr zur ursprünglichen Route bereits ab 8:30 h (rechts), Informationsintervall 5 min.....	153
Bild 9.60: Routen der dynamisch (links) und der dynamisch ab einem Schwellwert (rechts) navigierten Pkw der Quelle-Ziel Relation (5)-(4) bei 35 % Penetrationsrate im Zeitraum von 8:00 bis 8:15 h, Informationsintervall 15 min, Störfall 3 .....	154
Bild 9.61: Routen der dynamisch (links) und der dynamisch ab einem Schwellwert (rechts) navigierten Pkw der Quelle-Ziel Relation (5)-(4) bei 35 % Penetrationsrate im Zeitraum von 8:15 bis 8:30 h, Informationsintervall 15 min, Störfall 3 .....	154
Bild 9.62: Routen der dynamisch (links) und der dynamisch ab einem Schwellwert (rechts) navigierten Pkw der Quelle-Ziel Relation (5)-(4) bei 35 % Penetrationsrate im Zeitraum von 8:30 bis 8:45 h, Informationsintervall 15 min, Störfall 3 .....	154
Bild 9.63: Mittlere Reisezeiten der Quelle-Ziel-Relation (5)-(4), 35 % Penetrationsrate, Informationsintervall 15 min, Störfall 3, Navigationsweise: Dynamisch ab Schwellwert.....	155
Bild 9.64: Deutliche prozentuale Reisezeiterhöhung bei Navigation erst ab einem Schwellwert 35 % Penetrationsrate, Informationsintervall 15 min, Störfall 3 .....	155
Bild C.1: Lineare Regressionsanalyse realer und simulierter Zählwerte .....	192
Bild E.1: Mittlere Reisezeiten der Fahrzeuge der Quelle-Ziel-Relation (1)-(2) bei unterschiedlichen Penetrationsraten, Informationsintervall 30 min, normale Verkehrsverhältnisse, dynamische Navigationsweise .....	194
Bild E.2: Mittlere Reisezeiten der Fahrzeuge der Quelle-Ziel-Relation (1)-(2) bei unterschiedlichen Penetrationsraten, Informationsintervall 30 min, normale Verkehrsverhältnisse, dynamische Navigationsweise .....	194
Bild E.3: Mittlere Reisezeiten der navigierten Pkw der Quelle-Ziel-Relation (1)-(2) bei 35 % Penetrationsrate, Informationsintervall 15 min, Navigationsweise: dynamisch bzw. dynamisch nur auf hochrangigem Straßennetz .....	195
Bild E.4: Routen der dynamisch (links) und der dynamisch nur auf dem hochrangigen Straßennetz (rechts) navigierten Pkw der Quelle-Ziel Relation (1)-(2) bei 35 % Penetrationsrate, Informationsintervall 15 min, normale Verkehrsverhältnisse.....	195

Bild E.5: Mittlere Reisezeiten der navigierten Pkw der Quelle-Ziel-Relation (1)-(3) bei 35 % Penetrationsrate, Informationsintervall 15 min, Navigationsweise: dynamisch bzw. dynamisch nur auf hochrangigem Straßennetz .....	196
Bild E.6: Routen der dynamisch (links) und der dynamisch nur auf dem hochrangigen Straßennetz (rechts) navigierten Pkw der Quelle-Ziel Relation (1)–(3) bei 35 % Penetrationsrate, Informationsintervall 15 min, normale Verkehrsverhältnisse .....	196
Bild E.7: Mittlere Reisezeiten der Quelle-Ziel-Relation (3)–(1), 25 % Penetrationsrate, Informationsintervall 30 min, normale Verkehrsverhältnisse, dynamische Navigationsweise .....	197
Bild E.8: Mittlere Reisezeiten der Quelle-Ziel-Relation (3)–(1), 25 % Penetrationsrate, Informationsintervall 15 min, normale Verkehrsverhältnisse, dynamische Navigationsweise .....	197
Bild E.9: Mittlere Reisezeiten der Quelle-Ziel-Relation (3)–(1), 25 % Penetrationsrate, Informationsintervall 5 min, normale Verkehrsverhältnisse, dynamische Navigationsweise .....	198
Bild E.10: Routen der dynamisch navigierten Pkw der Quelle-Ziel Relation (3)–(1) bei 35 % Penetrationsrate, Informationsintervall 30 min, dynamische Navigationsweise.....	198
Bild E.11: Routen der dynamisch navigierten Pkw der Quelle-Ziel Relation (3)–(1) bei 35 % Penetrationsrate, Informationsintervall 15 min, dynamische Navigationsweise.....	199
Bild E.12: Routen der dynamisch navigierten Pkw der Quelle-Ziel Relation (3)–(1) bei 35 % Penetrationsrate, Informationsintervall 5 min, dynamische Navigationsweise.....	199
Bild E.13: Routen der nicht navigierten Pkw der Quelle-Ziel Relation (3)–(1).....	200
Bild E.14: Mittlere Reisezeiten der Fahrzeuge der Quelle-Ziel-Relation (3)-(2) bei unterschiedlichen Penetrationsraten, Informationsintervall 30 min, Störfall 2, dynamische Navigationsweise .....	200
Bild E.15: Mittlere Reisezeiten der Fahrzeuge der Quelle-Ziel-Relation (3)-(2) bei unterschiedlichen Penetrationsraten, Informationsintervall 15 min, Störfall 2, dynamische Navigationsweise .....	201
Bild E.16: Mittlere Reisezeiten der Fahrzeuge der Quelle-Ziel-Relation (3)-(2) bei unterschiedlichen Penetrationsraten, Informationsintervall 5 min, Störfall 2, dynamische Navigationsweise .....	201
Bild E.17: Mittlere Reisezeiten der Fahrzeuge der Quelle-Ziel-Relation (4)-(3) bei unterschiedlichen Penetrationsraten, Informationsintervall 30 min, normale Verkehrsverhältnisse, dynamische Navigationsweise .....	202
Bild E.18: Routen der nicht navigierten (links) und der dynamisch navigierten Pkw der Quelle-Ziel Relation (4)–(3) bei 35 % Penetrationsrate, Informationsintervall 30 min, dynamische Navigationsweise .....	202
Bild E.19: Mittlere Reisezeiten der navigierten Pkw der Quelle-Ziel-Relation (4)-(5) bei 35 % Penetrationsrate, Informationsintervall 15 min, Navigationsweise: dynamisch bzw. dynamisch nur auf hochrangigem Straßennetz .....	203
Bild E.20: Routen der dynamisch (links) und der dynamisch nur auf dem hochrangigen Straßennetz (rechts) navigierten Pkw der Quelle-Ziel Relation (4)–(5) bei 35 % Penetrationsrate, Informationsintervall 15 min, normale Verkehrsverhältnisse .....	203

Bild E.21: Mittlere Reisezeiten der Fahrzeuge der Quelle-Ziel-Relation (5)-(4) bei unterschiedlichen Penetrationsraten, Informationsintervall 30 min, Störfall 3, dynamische Navigationsweise.....	204
Bild E.22: Prozentuale Reisezeitreduzierung über alle Fahrzeuge der Quelle-Ziel-Relation (5)-(4) bei unterschiedlichen Penetrationsraten, Informationsintervall 30 min, Störfall 3, dynamische Navigationsweise.....	204
Bild E.23: Mittlere Reisezeiten der Fahrzeuge der Quelle-Ziel-Relation (5)-(4) bei unterschiedlichen Penetrationsraten, Informationsintervall 15 min, Störfall 3, dynamische Navigationsweise.....	205
Bild E.24: Mittlere Reisezeiten der Fahrzeuge der Quelle-Ziel-Relation (5)-(4) bei unterschiedlichen Penetrationsraten, Informationsintervall 5 min, Störfall 3, dynamische Navigationsweise.....	205
Bild E.25: Mittlere Reisezeiten der Fahrzeuge der Quelle-Ziel-Relation (5)-(4) bei unterschiedlichen Penetrationsraten, Informationsintervall 15 min, Störfall 3, Navigationsweise: Dynamisch ab Schwellwert.....	206

## Tabellenverzeichnis

Tab. 4.1: TMC-Locations in einigen Großstädten Deutschlands [Blaupunkt GmbH, 2005] .....	21
Tab. 7.1: Ergebnis der Studie von Jansen und Den Adel [1987] hinsichtlich des individuell und kollektiv vorhandenen Routensatzes bei Berufspendlern (laut Bovy und Stern [1990]) .....	53
Tab. 7.2: Mittlere Reisezeiten der drei Routen.....	72
Tab. 7.3: Überlappungsmatrix (Reisezeit in [h]) .....	73
Tab. 7.4: Linkkosten bei Berücksichtigung der Komfortkomponente $FLC_{a,VT,v}^{STOPS}$ (siehe Gl. ( 7-2 )) mit $\varphi = 0,3$ (siehe Gl. ( 7-4 )) .....	76
Tab. 7.5: Kosten und Wahlwahrscheinlichkeiten der drei Routen, Grundzustand .....	76
Tab. 7.6: Lichtsignalanlage an Knotenpunkt 2: Linkkosten bei Berücksichtigung der Komfortkomponente $FLC_{a,Pkw,v}^{STOPS}$ (siehe Gl. ( 7-2 )) mit $\varphi = 0,3$ (siehe Gl. ( 7-4 )) .....	77
Tab. 7.7: Kosten und Wahlwahrscheinlichkeiten der drei Routen, Netz mit Lichtsignalanlage..	77
Tab. 7.8: Straßenklasse ‚Erschließungsstraße‘ der Kanten 4 und 6: Linkkosten bei Berücksichtigung der Straßenklassenkomponente $FLC_{a,Pkw,v}^{RT}$ (Gl.( 7-6 )) mit $\mu_{Pkw} = 0,30$ (Gl. ( 7-7 )).....	78
Tab. 7.9: Kosten und Wahlwahrscheinlichkeiten der drei Routen, unterschiedliche Straßenklassen .....	79
Tab. 7.10: Routenkosten und Wahlwahrscheinlichkeiten der drei Routen, 100 % Nicht-Navigierte .....	86
Tab. 7.11: Kosten und Wahlwahrscheinlichkeiten der drei Routen der navigierten Fahrzeuge, Ausstattungsrate 15 %, Aktualisierungsintervall 15 min .....	86
Tab. 7.12: Gesamtreisezeit [h] im Netz über den simulierten Zeitraum .....	93
Tab. 8.1: Parameter der Straßenklassen des Simulationsnetzes .....	101
Tab. 8.2: Übersicht Szenarien.....	108



# Anhang

## A Modellierung des Fahrerverhaltens

### A.1 Einteilung

Die Bewegung der einzelnen Fahrzeuge durch das Netz wird in kleinen, festgelegten Zeitintervallen, den Simulationsschritten, nachgebildet. Die Planung und die Ausführung der Fahrmanöver werden auf unterschiedlichen Ebenen vollzogen, wobei jede Ebene der darunter liegenden Vorgaben macht.

Auf der obersten, der strategischen Ebene, wählt der Fahrer eine Route von seinem Ausgangspunkt zu seinem Ziel. Die Planung, die er dabei anstellt, umfasst zeitlich die gesamte Fahrtdauer und räumlich das gesamte ihm zur Verfügung stehende Netz.

Die darunter liegende taktische Ebene umfasst einen Zeitraum von mehreren Sekunden bis zu wenigen Minuten und deren räumliche Ausdehnung. Hier wird ermittelt, welchen kurzfristigen Plan ein Fahrer aufgrund erkennbarer oder vorhersehbarer Bedingungen seiner näheren Umgebung verfolgen soll. Dies bezieht sich beispielsweise auf das Einordnen auf den richtigen Fahrstreifen im Vorfeld eines Knotenpunkts oder das Einfädeln auf der Autobahn vom Beschleunigungsfahrstreifen aus.

Die unterste Ebene des operationalen Fahrerverhaltens steuert das konkrete Längs- und Querverhalten des Fahrzeugs mit entsprechenden Lenk-, Beschleunigungs- und Bremsvorgaben. Der zeitliche Horizont ist hierbei sehr klein in der Größenordnung bis etwa einer Sekunde und umfasst die unmittelbare räumliche Umgebung des Fahrzeugs.

### A.2 Operationales Fahrerverhalten

Auf der untersten, der operationalen Ebene wird modelliert, wie sich ein Fahrzeug im nächsten Zeitschritt verhalten wird, also wie der Fahrer bremst oder beschleunigt oder lenkt. Die Fahrer streben danach, mit ihrer Wunschgeschwindigkeit zu fahren, werden aber durch Umfeldeinflüsse (bspw. vorausfahrende oder auf dem benachbarten Fahrstreifen befindliche Fahrzeuge, Geschwindigkeitsbegrenzungen, Stauungen, etc.) darin gestört.

Das Längs- und Querverhalten wird mittels folgender Verhaltensmodelle modelliert:

- Das Fahrzeugfolgemodell;  
Es legt das Abstandsverhalten der Fahrer bei Kolonnenfahrt und hier im Speziellen die Interaktion zweier aufeinander folgender Fahrzeuge fest.
- Das Fahrstreifenwechselmodell;  
Es beschreibt, nach welchen Regeln die Fahrzeuge einen Fahrstreifenwechsel durchführen.

### Fahrzeugfolgemodell nach Gipps

Das in AIMSUN NG verwendete Fahrzeugfolgemodell basiert auf dem Modell von Gipps [1981] [1986b]. Es wird davon ausgegangen, dass der Fahrer eine „sichere“ Geschwindigkeit in Hinblick auf das vorausfahrende Fahrzeug anstrebt und er somit eine Beschleunigung wählt, bei der keine Zusammenstöße möglich sind.

Das Modell setzt sich aus den beiden Komponenten Beschleunigung und Abbremsen zusammen. Die erste beschreibt die Intention des Fahrers, bei freien Verkehrsverhältnissen so lange zu beschleunigen, bis er seine Wunschgeschwindigkeit erreicht hat, diese dann aber nicht weiter überschreitet.

Basierend auf empirischen Untersuchungen wurde folgende Gleichung definiert, die dieses Verhalten ausdrückt:

$$v_n(t+T) \leq v_n(t) + 2,5a_n T \left(1 - \frac{v_n(t)}{V_n}\right) \sqrt{0,025 + \frac{v_n(t)}{V_n}} \quad (\text{A-1})$$

mit:

$v_n(t)$	Geschwindigkeit des Fahrzeugs $n$ zum Zeitpunkt $t$
$T$	Reaktionszeit des Fahrers
$a_n$	maximale Beschleunigung des Fahrzeugs $n$
$V_n$	Wunschgeschwindigkeit des Fahrers von Fahrzeug $n$

Die zweite Komponente bedingt sich aus dem notwendigen Abbremsverhalten, um noch mit einem Sicherheitsabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug zum Halten kommen zu können. Beginnt das vorausfahrende Fahrzeug  $n-1$  zum Zeitpunkt  $t$  zu bremsen, so gelangt es am Punkt

$$x_{n-1}^* = x_{n-1}(t) - \frac{v_{n-1}(t)^2}{2b_{n-1}} \quad (\text{A-2})$$

mit:

$b_{n-1}$	stärkste gewünschte Bremsverzögerung des Fahrzeugs $n-1$ , wobei $b_{n-1} < 0$ ist,
-----------	---

zum Stehen. Das Folgefahrzeug  $n$  beginnt jedoch erst nach einer Reaktionszeit  $T$  zu bremsen, so dass es am Punkt

$$x_n^* = x_n(t) + [v_n(t) + v_n(t+T)] \frac{T}{2} - \frac{v_n(t+T)^2}{2b_n} \quad (\text{A-3})$$

zum Halten kommt. Berücksichtigt man einen Sicherheitsabstand zwischen den Fahrzeugen und neben der wahren Reaktionszeit  $T$  eine weitere „Sicherheitsreaktionszeit“  $\theta$ , dann muss folgende Ungleichung erfüllt werden:

$$x_{n-1}^* - s_{n-1} \geq x_n^* \quad \text{bzw. durch Einsetzen von (A-2) und (A-3)} \quad (\text{A-4})$$

$$x_{n-1}(t) - \frac{v_{n-1}(t)^2}{2b_{n-1}} - s_{n-1} \geq x_n(t) + [v_n(t) + v_n(t+T)] \left( \frac{T}{2} + \theta \right) - \frac{v_n(t+T)^2}{2b_n} \quad (\text{A-5})$$

mit:

$s_{n-1}$  effektive Länge des Fahrzeugs  $n-1$ , die sich aus der physikalischen Länge plus eines Mindestabstands der Fahrzeuge zusammensetzt.

In der Realität vermag der Fahrer des Fahrzeugs alle Größen bis auf  $b_{n-1}$  durch direkte Beobachtung einzuschätzen. Daher wird die stärkste gewünschte Bremsverzögerung des Fahrzeugs  $n-1$  durch einen Schätzwert  $\hat{b}$  ersetzt, der in AIMSUN NG zu  $\hat{b} = \frac{b_{n-1} + b_n}{2}$  gesetzt wird.

Setzt man zudem  $\theta = \frac{T}{2}$ , dann ergibt sich

$$v_n(t+T) \leq b_n T + \sqrt{b_n^2 T^2 - b_n \left( 2[x_{n-1}(t) - s_{n-1} - x_n(t)] - v_n(t)T \right) - \frac{v_{n-1}(t)^2}{\hat{b}}}. \quad (\text{A-6})$$

Die Geschwindigkeit eines Fahrzeugs  $n$  zum Zeitpunkt  $t+T$  ist das Minimum der beiden zuvor definierten Komponenten:

$$v_n(t+T) = \min \left\{ v_n(t) + 2,5a_n T \left( 1 - \frac{v_n(t)}{V_n} \right) \sqrt{0,025 + \frac{v_n(t)}{V_n}}; \right. \\ \left. b_n T + \sqrt{b_n^2 T^2 - b_n \left( 2[x_{n-1}(t) - s_{n-1} - x_n(t)] - v_n(t)T \right) - \frac{v_{n-1}(t)^2}{\hat{b}}} \right\}. \quad (\text{A-7})$$

### Fahrestreifenwechselmodell nach Gipps

In AIMSUN NG wird das Fahrestreifenwechselmodell nach Gipps [1986a] verwendet. Dieses ist auf die Verwendung in Verbindung mit dem Fahrzeugfolgemodell nach Gipps hin ausgelegt, was auch den Modellierungsansprüchen der nächst höheren, der taktischen Ebene entspricht.

Die Entscheidung eines Fahrers zu einem Fahrestreifenwechsel ist dabei die Antwort auf folgende Fragen:

- Ist es notwendig, den Fahrestreifen zu wechseln?  
Dabei sind mehrere Faktoren zu berücksichtigen, so etwa die Abbiegemöglichkeit auf dem aktuellen Fahrestreifen, wie weit der nächste Abbiegevorgang entfernt ist oder wie die aktuel-

len Verkehrsverhältnisse auf dem momentanen Fahrstreifen sind. Fährt der Fahrer langsamer als er eigentlich möchte, versucht er zu überholen. Fährt er dagegen schnell genug, versucht er, möglichst auf dem langsameren Fahrstreifen zu fahren.

- Ist es wünschenswert, den Fahrstreifen zu wechseln?  
Die Frage ist, ob sich ein Vorteil in den Verkehrsbedingungen für den Fahrer bei einem Fahrstreifenwechsel ergibt. Ist die Geschwindigkeit auf dem Zielfahrstreifen hoch genug, verglichen zum aktuellen, oder ist die Staulänge kurz, dann ist es wünschenswert zu wechseln.
- Ist es physikalisch möglich und sicher, den Fahrstreifen zu wechseln?  
Ein Fahrer wird den Fahrstreifen nicht wechseln, wenn ein unakzeptables Risiko eines Zusammenstoßes besteht. Daher wird vor einem Wechsel überprüft, ob eine ausreichend große Zeitlücke im Zielfahrstreifen besteht. Zudem wird die Geschwindigkeit des Vorfahrers und des Folgefahrzeugs, die die Lücke auf dem Zielfahrstreifen begrenzen, betrachtet, ob es entweder zu langsam fährt bzw. sich zu schnell nähert. Sind beide Bedingungen akzeptabel, ist es möglich zu wechseln.

Um diese unterschiedlichen Fragestellungen zu vereinen und ein realistischeres Fahrstreifenwechselverhalten zu erzielen, wird das Verhalten in drei Zonen zerlegt, die sich durch eine unterschiedliche Motivation zum Fahrstreifenwechsel unterscheiden:

- Zone 1: In diesem Bereich ist der nächste Abbiegevorgang noch so weit entfernt, dass er den Entschluss zum Fahrstreifenwechsel nicht beeinflusst. Lediglich das Halten bzw. Erreichen der Wunschgeschwindigkeit ist ausschlaggebend.
- Zone 2: Befindet sich der Fahrer in dieser Entfernung, beginnt er Fahrstreifenwechsellmöglichkeiten, die zur Verbesserung seiner Geschwindigkeit beitragen würden, zu ignorieren, wenn sie einen Wechsel in eine falsche, gegenüber seiner eigentlichen weiteren Fahrrichtung bedingen würden.
- Zone 3: Naht der gewünschte Abbiegevorgang, sollte sich der Fahrer bereits auf dem richtigen oder zumindest schon auf einem neben liegenden Fahrstreifen befinden. Er ist lediglich daran interessiert, den richtigen Fahrstreifen zu erreichen, das Streben nach der Wunschgeschwindigkeit ist dann uninteressant.

Diese unterschiedlichen Zonen werden in AIMSUN NG [AIMSUN 5.0, 2005] durch Angabe der beiden Parameter „Distance to Zone 1“ und „Distance to Zone 2“ in Sekunden definiert. Umgewandelt in eine Entfernung wird es für jedes Fahrzeug  $n$  der Kante  $s$  mit folgender Gleichung:

$$D_m = D_s \cdot S_s^{limit} \cdot \left[ \frac{S_s^{limit}}{v_{n,s}^{max}} \right] \quad (\text{A-8})$$

mit:

$D_m$  Abstand in [m]

$D_s$  Abstand in [s]

$S_s^{limit}$  Geschwindigkeitsbegrenzung auf Kante  $s$

$v_{n,s}^{max}$  maximale Wunschgeschwindigkeit des Fahrzeugs  $n$  auf Kante  $s$ .

Diese Gleichung bewirkt, dass schnellere Fahrzeuge kürzere Zonen haben als langsamere. Auf diese Weise wird ein realistischeres Fahrstreifenwechselverhalten erzeugt, da nicht allen Fahr-

zeugen gleiche Längen hinterlegt werden und größere Schwankungen im Verhalten möglich sind.

### A.3 Taktisches Fahrerverhalten

Das taktische Fahrerverhalten dient dazu, die Modelle für die Längs- und Querbewegung aufeinander abzustimmen, so dass ein vorausschauendes Fahren resultiert. In die Entscheidung des Fahrers geht mehr als nur die unmittelbare Umgebung ein. Während auf der operativen Ebene das Fahrzeugfolgemodell das direkte Vorderfahrzeug in Augenschein nimmt und das Fahrstreifenwechselmodell nur die direkten Nachbarn auf den angrenzenden Fahrstreifen berücksichtigt, werden auf dieser Ebene mehr Fahrzeuge betrachtet und der Blick ist beispielsweise bei der Wahl des Fahrstreifens nicht nur auf den nächsten Knotenpunkt ausgerichtet, sondern auch auf den übernächsten.

Das Modell zum vorausschauenden Fahren besteht in AIMSUN NG aus folgenden vier Komponenten [AIMSUN 5.0, 2005]:

1. Berücksichtigung von zwei aufeinander folgenden Abbiegevorgängen bei der Fahrstreifenwahl:  
Ein Fahrzeug versucht zunächst einen Fahrstreifen zu wählen, von dem aus sein anstehender Abbiegevorgang möglich ist. Hat er diesen Fahrstreifen oder einen daneben liegenden erreicht, wird zusätzlich betrachtet, ob dies auch ein passender Fahrstreifen für den nächsten Abbiegevorgang ist. In diesem Fall wird versucht, auf den für beide Fälle besten Fahrstreifen zu wechseln.
2. Erweiterung von Zone 2 und Zone 3 auch über die Grenzen der aktuellen Kante zurück  
Sollten Zone 2 und Zone 3 länger sein als die Kante selbst, werden diese auch noch in die Vorgängerkante hinein berücksichtigt, so dass bereits dort das Verhalten beeinflusst wird.
3. Der nächste Abbiegevorgang wird bereits beim Abbiegemanöver im Knotenpunkt berücksichtigt.  
Die Fahrstreifenwahl direkt hinter dem Knotenpunkt wird bei einer mehrstreifigen Kante so gewählt, dass sie für den nächsten Abbiegevorgang passend ist.
4. Variable Gestaltung der Fahrstreifenwechselzonen  
Wechselt ein Fahrzeug von Zone 1 in Zone 2 bzw. von Zone 2 in Zone 3, ändert sich sein Verhalten. Um diesen Wechsel über einen größeren Bereich hin zu verteilen und um abrupte Veränderungen zu verhindern, wird mittels eines fahrzeugspezifischen Koeffizienten, der von seiner Wunschgeschwindigkeit abhängt, die Länge der Zonen variiert. Dies bewirkt, dass beispielsweise Lkw früher danach streben, ihren gewünschten Fahrstreifen zu erreichen als schneller fahrende Pkw.

### A.4 Strategisches Fahrerverhalten

In Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Daten kann, wie bereits in Kapitel 6.1.2 kurz aufgeführt, die Nachfrage auf unterschiedliche Weise, nämlich entweder unter Verwendung von statischen Routen bzw. Abbiegeanteilen an den Knotenpunkten oder auf Grundlage einer dynamischen Umlegung (siehe Kapitel 6.3), auf dem Netz verteilt werden.

Sind differenzierte Informationen über die verwendeten Routen zwischen den einzelnen Quellen und Zielen vorhanden, können diese direkt als Eingabegrößen festgesetzt werden. Die Nach-

frage kann aber auch durch Festlegung von Abbiegeverhältnissen an jedem Knotenpunkt im Straßennetz verteilt werden.

Liegen solch differenzierte Daten nicht explizit vor, kann die zur Modellierung des strategischen Fahrerverhaltens notwendige Routenwahl mit einer dynamischen Verkehrsumlegung bestimmt werden. Die Verkehrsnachfrage und das Verkehrsangebot sind dabei über die Zeit veränderlich und die Fahrt eines Fahrzeugs durch das Netz wird zeitlich und räumlich aufgelöst, so dass man zeitabhängige Belastungen und Fahrzeiten erhält.

Mit einem Routenwahlmodell wird der Entscheidungsprozess eines Fahrers modelliert, welche Route er aus der Menge der Alternativen wählen soll. Dafür wird zu jeder der möglichen Alternativrouten zwischen einer Quelle und einem Ziel eine Auswahlwahrscheinlichkeit bestimmt. Der Entscheidungsprozess des Fahrers für einen dieser Wege erfolgt zufallsgesteuert unter Beachtung der entsprechenden Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Wege.

## B Erforderlicher Stichprobenumfang

Die Anzahl der benötigten Simulationsläufe bzw. der erforderliche Stichprobenumfang  $n$  zur Überprüfung eines Mittelwertes aus mehreren Simulationsläufen eines Experiments richtet sich nach dem angestrebten Signifikanzniveau  $\alpha$ , der gewünschten Genauigkeit  $e_a$  der Aussage sowie der erwarteten Streuung  $s^2$  der Stichprobe. Er wird wie folgt bestimmt:

$$n \geq \frac{t\left(\frac{(\alpha + 1)}{2}, n - 1\right)^2 \cdot s^2}{e_a^2} \quad (\text{A-9})$$

mit:

$$t\left(\frac{(\alpha + 1)}{2}, n - 1\right) \quad \text{Wert aus der tabellierten Student-Verteilung.}$$

### B.1 Testnetz

Zur Bestimmung, wie viele Simulationsläufe erforderlich sind, um die mittlere Reisezeit mit einer bestimmten Fehlertoleranz angeben zu können, wurde eine hohe gewünschte Genauigkeit mit einem Fehler von 2 Sekunden bei einem Konfidenzniveau von 95 % gewählt.

Ein Test mit zehn Simulationsläufen ergab eine Streuung der Reisezeit von  $s^2 = 4$  [s<sup>2</sup>] im Mittel aller Kanten. Daraus ergibt sich:

$$n = 10; \quad e_a = 2 \text{ [s]}; \quad s^2 = 4 \text{ [s}^2\text{]};$$

$$t(0,975; 10 - 1) = 2,26;$$

$$n_{\text{erf}} = \frac{2,26^2 \cdot 4}{2^2} = 5,11 < 10,$$

was zeigt, dass die zehn durchgeführten Simulationsläufe ausreichend sind.

## B.2 Untersuchungsnetz Hannover

Da große Netze modelltechnisch schwieriger an die Realität anzupassen sind, wurde für die Untersuchungen auf dem Netz von Hannover eine deutlich größerer Fehlertoleranz als beim Testnetz als akzeptabel angenommen. Es wurde ein Fehler von 60 Sekunden bei einem Konfidenzniveau von 95 % gewählt.

Aus fünf Simulationsläufen wurde im Mittel ein Streuung der Reisezeit auf den Kanten von  $s^2 = 1400$  [s<sup>2</sup>] bestimmt. Die erforderliche Anzahl an Simulationsläufen bestimmt sie zu:

$$n = 5; \quad e_a = 60 \text{ [s]}; \quad s^2 = 1400 \text{ [s]};$$

$$t(0,975; 5 - 1) = 2,78;$$

$$n_{\text{erf}} = \frac{2,78^2 \cdot 1400}{60^2} = 3,0 < 5.$$

Die für die Untersuchungen durchgeführten fünf Simulationsläufen sind somit ausreichend.

## C Kalibrierung der Simulation

### C.1 Gütemaße der Kalibrierung

Zur Quantifizierung der generellen Performance der Simulation dient die Wurzel aus dem Mittleren Quadratischen Fehler (Root Mean Square Error - RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_n^{\text{sim}} - x_n^{\text{obs}})^2} \quad (\text{A-10})$$

mit:

$x_n^{\text{sim}}$  Mittelwert der simulierten Werte an einem bestimmten Punkt  $n$  zu einer bestimmten Zeit/ in einer bestimmten Zeitspanne

$x_n^{\text{obs}}$  Mittelwert der in der Realität beobachteten Werte an einem bestimmten Punkt  $n$  zu einer bestimmten Zeit/ in einer bestimmten Zeitspanne

$N$  Anzahl der erfassten Werte,

die den Vorteil bietet, dass große Abweichungen stärker berücksichtigt werden als kleine. Ausgedrückt als relativer Fehler bezogen zum Mittelwert, lässt sich der prozentuale Fehler (Root Mean Square Percent Error – RMSPE) aus

$$RMSPE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left( \frac{x_n^{\text{sim}} - x_n^{\text{obs}}}{x_n^{\text{obs}}} \right)^2} \quad (\text{A-11})$$

bestimmen.

Um zu prüfen, in wie weit zwischen einer Reihe von Beobachtungswerten und den entsprechenden Werten aus der Simulation ein Zusammenhang besteht, kann im Rahmen einer Korrelations- und Regressionsrechnung festgestellt werden. Dabei beschreibt der Korrelationskoeffizient  $r_{x_{\text{sim}}, x_{\text{obs}}}$

$$r_{x_{sim}x_{obs}} = \frac{Kov(X_{sim}, X_{obs})}{S_{sim} \cdot S_{obs}} \quad (\text{A-12})$$

mit:

$S_{sim}$  Standardabweichung der simulierten Werte

$S_{obs}$  Standardabweichung der beobachteten Werte

$Kov(X_{sim}, X_{obs})$  Kovarianz

die Stärke des Zusammenhangs.

Die Regressionsanalyse liefert mit dem Bestimmtheitsmaß  $B$

$$B = \frac{\sum (\hat{y}_{sim} - \bar{x}_{sim})^2}{\sum (y_{sim} - \bar{x}_{sim})^2} \text{ bzw. } B = \frac{S(\hat{y}_{sim} - \bar{x}_{sim})^2}{S_{YY}} \quad (\text{A-13})$$

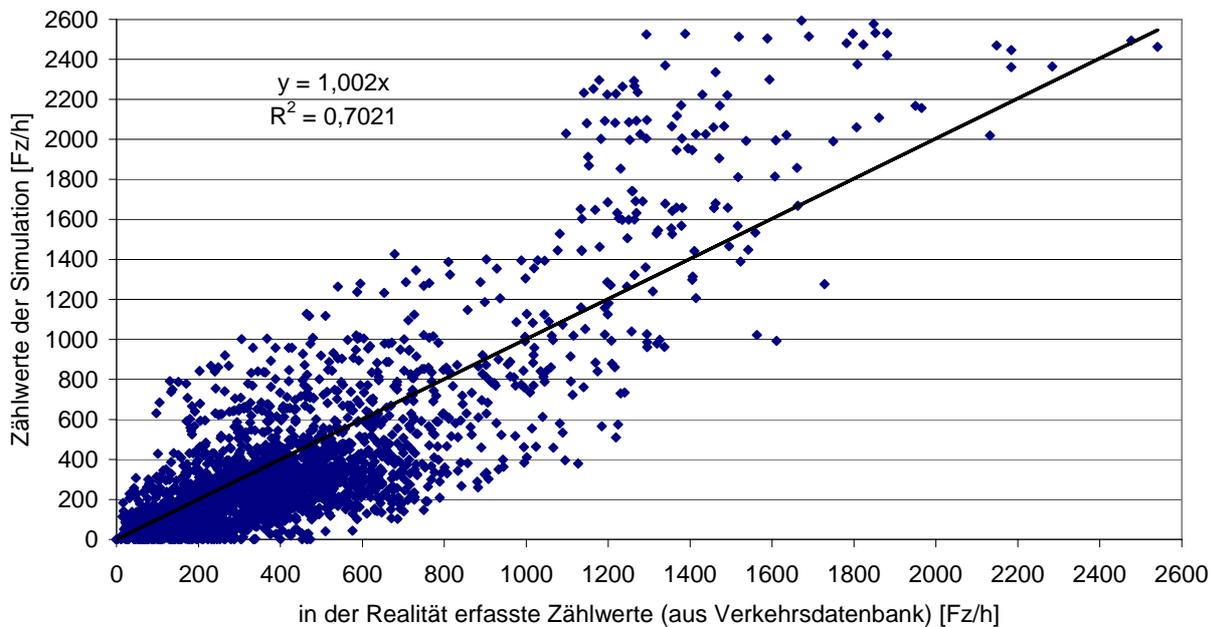
mit:

$S(\hat{y}_i - \bar{x}_{sim})^2$  Quadratsumme der Abweichungen zwischen den Werten  $\hat{y}(x_{sim}) = \hat{y}_{sim}$  der Regressionskurve von dem Mittelwert  $\bar{x}_{sim}$

ein Maß für die Güte der Anpassung der Simulationswerte durch Regressionsgleichungen.

## C.2 erzielte Kalibrierungsgüte

Vergleich zwischen real gezählten und simulierten Fahrzeugbelastungen [Fz/h] im Untersuchungszeitraum von 6-10h



**Bild C.1:** Lineare Regressionsanalyse realer und simulierter Zählwerte

## D Meldeverlauf ausgestrahlter TMC-Verkehrsmeldungen

### D.1 Meldeverlauf einer TMC-Verkehrsmeldung am 20.12.2005 für den Westschnellweg in Hannover [Landesmeldestelle Niedersachsen, 2006]

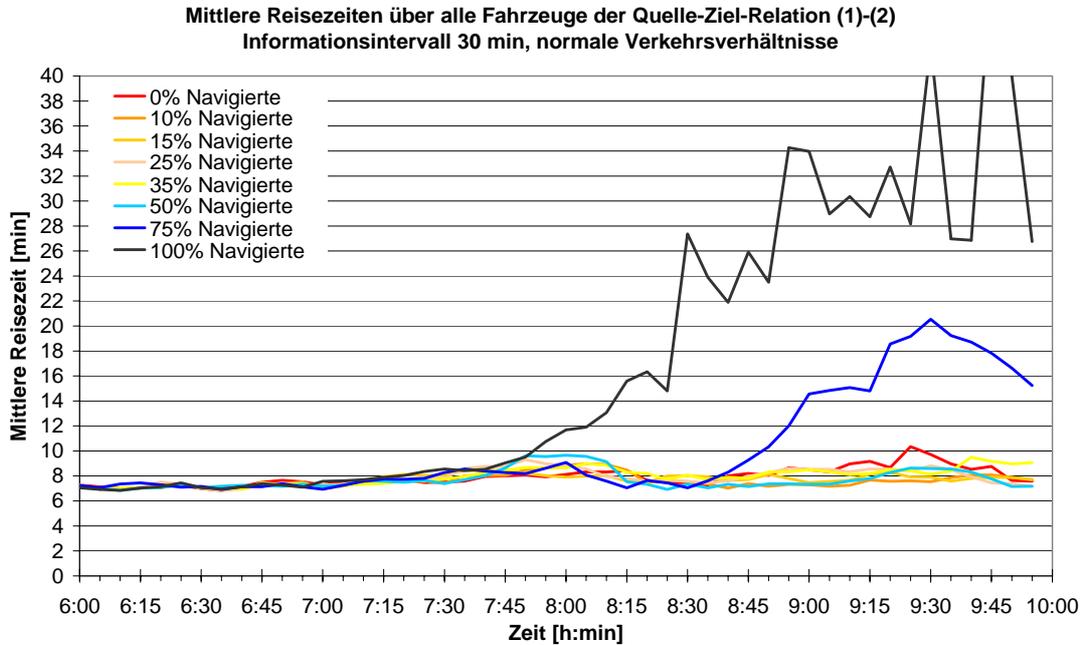
Meldetext	Eingabe der Meldung	Aktualisierung	Verfall der Meldung	Störungsdauer
B6 Stadtgebiet Hannover, Am Leineufer bis Westschnellweg zwischen Stöckener Straße und Schwanenburgkreuzung Unfall, 2 km Stau, Fahrbahn auf einen Fahrstreifen verengt stadteinwärts, ortskundige Autofahrer werden gebeten, das Gebiet weiträumig zu umfahren	20.12.2005 08:16	20.12.2005 08:19	20.12.2005 12:16	
B6 Stadtgebiet Hannover, Am Leineufer bis Westschnellweg zwischen Wissenschaftspark und Schwanenburgkreuzung Unfall, 4 km Stau, Fahrbahn auf einen Fahrstreifen verengt stadteinwärts, ortskundige Autofahrer werden gebeten, das Gebiet weiträumig zu umfahren	20.12.2005 08:22	20.12.2005 08:25	20.12.2005 12:22	01:34
B6 Stadtgebiet Hannover, Am Leineufer bis Westschnellweg zwischen Wissenschaftspark und Schwanenburgkreuzung Unfallstelle geräumt, 3 km Stau stadteinwärts	20.12.2005 08:50	20.12.2005 08:53	20.12.2005 12:50	
B6 Stadtgebiet Hannover, Am Leineufer bis Westschnellweg zwischen Wissenschaftspark und Schwanenburgkreuzung Meldung aufgehoben	20.12.2005 09:35	20.12.2005 09:37	20.12.2005 09:50	

### D.2 Meldeverlauf einer TMC-Verkehrsmeldung am 21.10.2005 für die Vahrenwalder Straße in Hannover [Landesmeldestelle Niedersachsen, 2006]

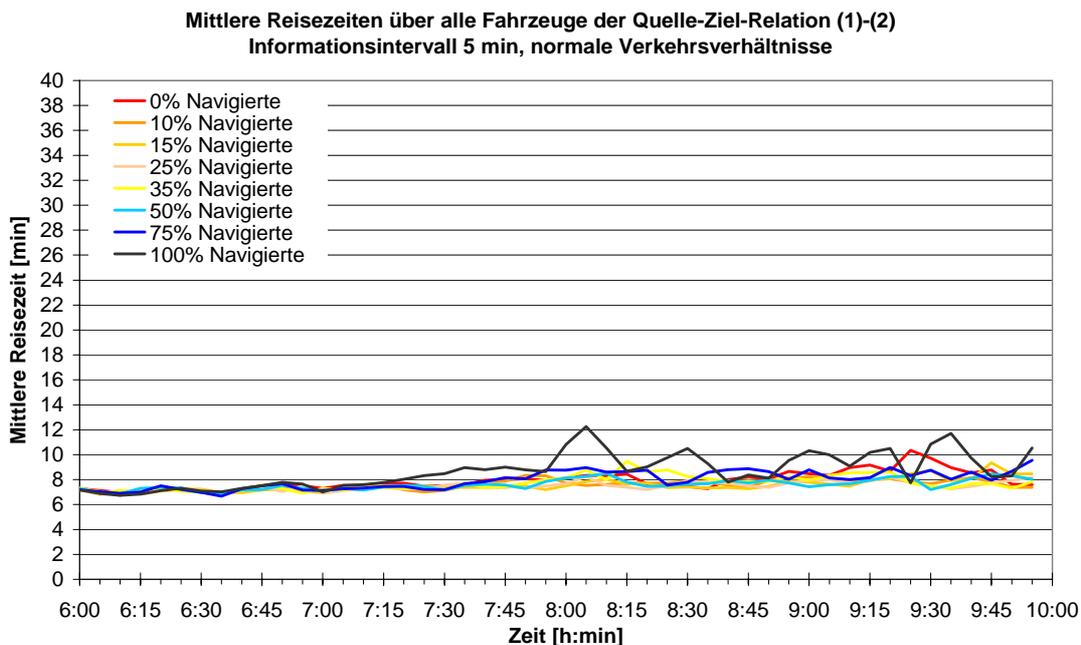
Meldetext	Eingabe der Meldung	Aktualisierung	Verfall der Meldung	Störungsdauer
L190 Stadtgebiet Hannover, Vahrenwalder Straße zwischen Kugelfangtrift und Hannover-Langenhagen 1 km Stau	21.10.2005 11:38	21.10.2005 11:41	21.10.2005 15:38	01:05
L190 Stadtgebiet Hannover, Vahrenwalder Straße zwischen Kugelfangtrift und Hannover-Langenhagen Meldung aufgehoben	21.10.2005 12:29	21.10.2005 12:31	21.10.2005 12:44	

## E Untersuchungsergebnisse einzelner Verkehrsbeziehungen

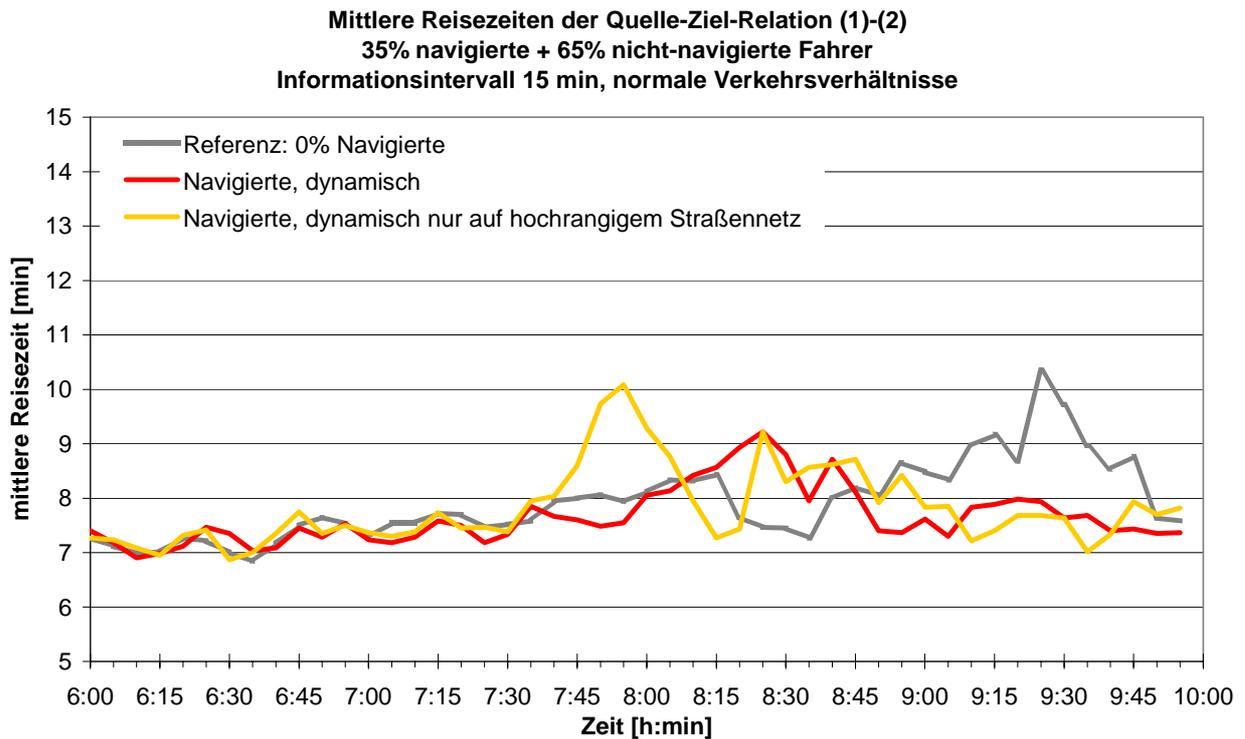
### E.1 Reisezeiten und Routenverläufe der Quelle-Ziel-Relation (1)-(2)



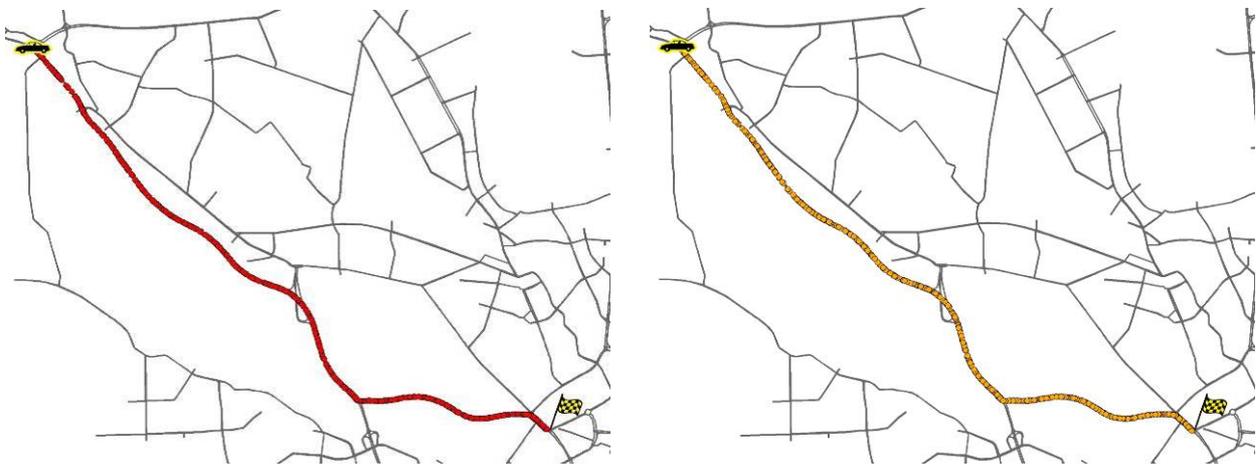
**Bild E.1:** Mittlere Reisezeiten der Fahrzeuge der Quelle-Ziel-Relation (1)-(2) bei unterschiedlichen Penetrationsraten, Informationsintervall 30 min, normale Verkehrsverhältnisse, dynamische Navigationsweise



**Bild E.2:** Mittlere Reisezeiten der Fahrzeuge der Quelle-Ziel-Relation (1)-(2) bei unterschiedlichen Penetrationsraten, Informationsintervall 30 min, normale Verkehrsverhältnisse, dynamische Navigationsweise

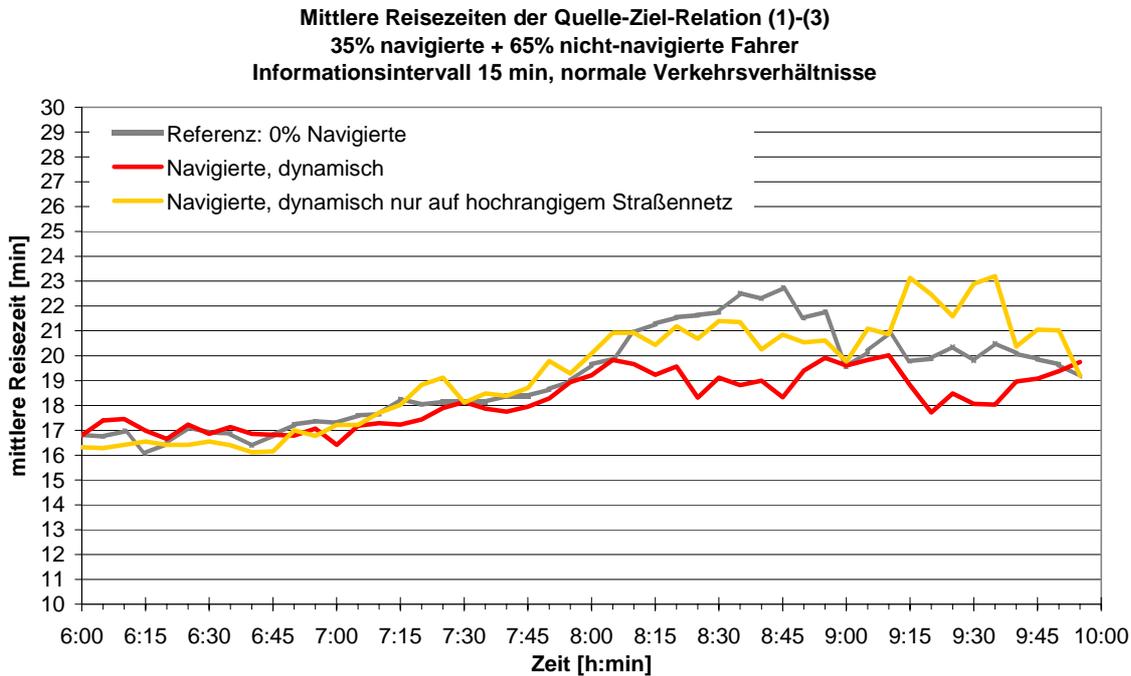


**Bild E.3:** Mittlere Reisezeiten der navigierten Pkw der Quelle-Ziel-Relation (1)-(2) bei 35 % Penetrationsrate, Informationsintervall 15 min, Navigationsweise: dynamisch bzw. dynamisch nur auf hochrangigem Straßennetz

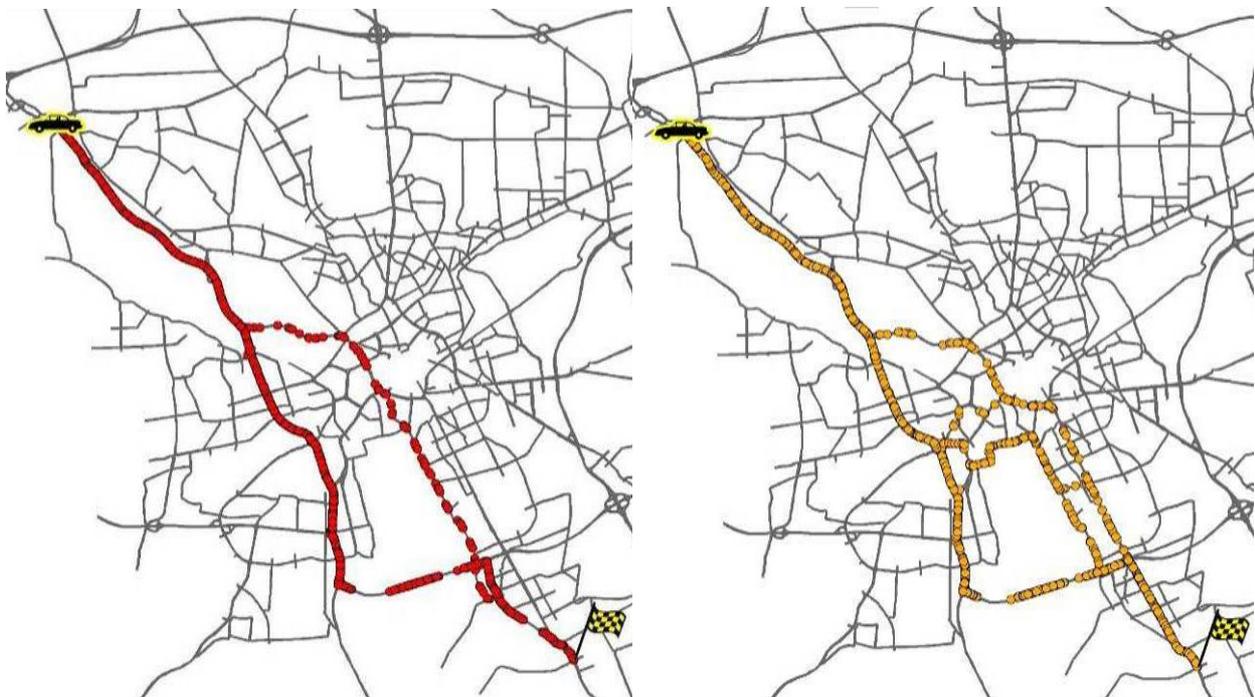


**Bild E.4:** Routen der dynamisch (links) und der dynamisch nur auf dem hochrangigen Straßennetz (rechts) navigierten Pkw der Quelle-Ziel-Relation (1)-(2) bei 35 % Penetrationsrate, Informationsintervall 15 min, normale Verkehrsverhältnisse

## E.2 Reisezeiten und Routenverläufe der Quelle-Ziel-Relation (1)-(3)

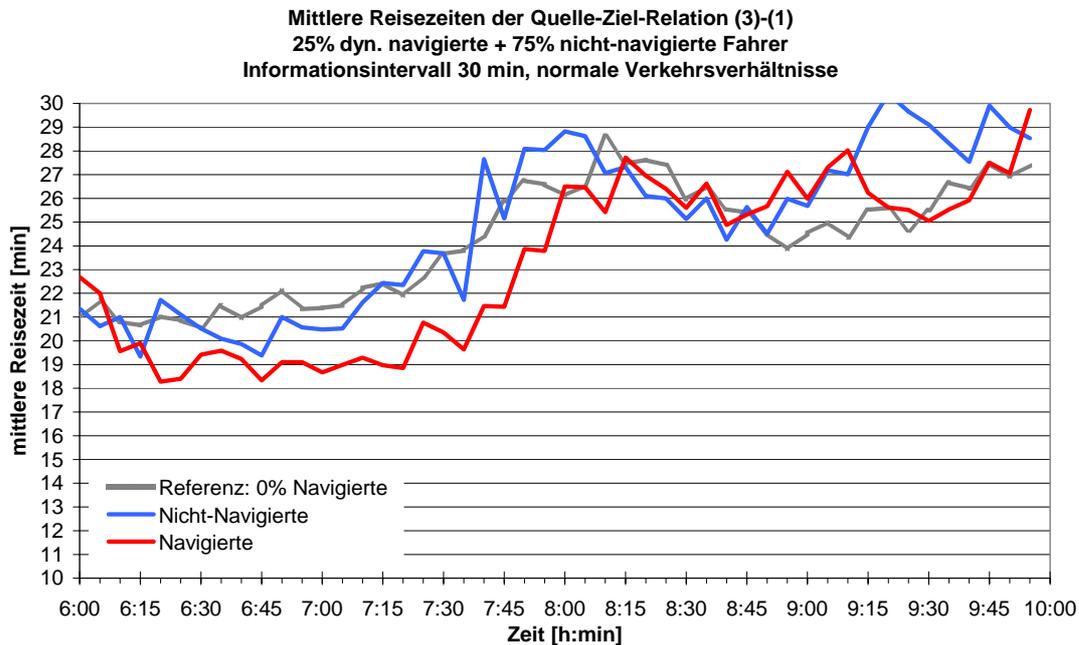


**Bild E.5:** Mittlere Reisezeiten der navigierten Pkw der Quelle-Ziel-Relation (1)-(3) bei 35 % Penetrationsrate, Informationsintervall 15 min, Navigationsweise: dynamisch bzw. dynamisch nur auf hochrangigem Straßennetz

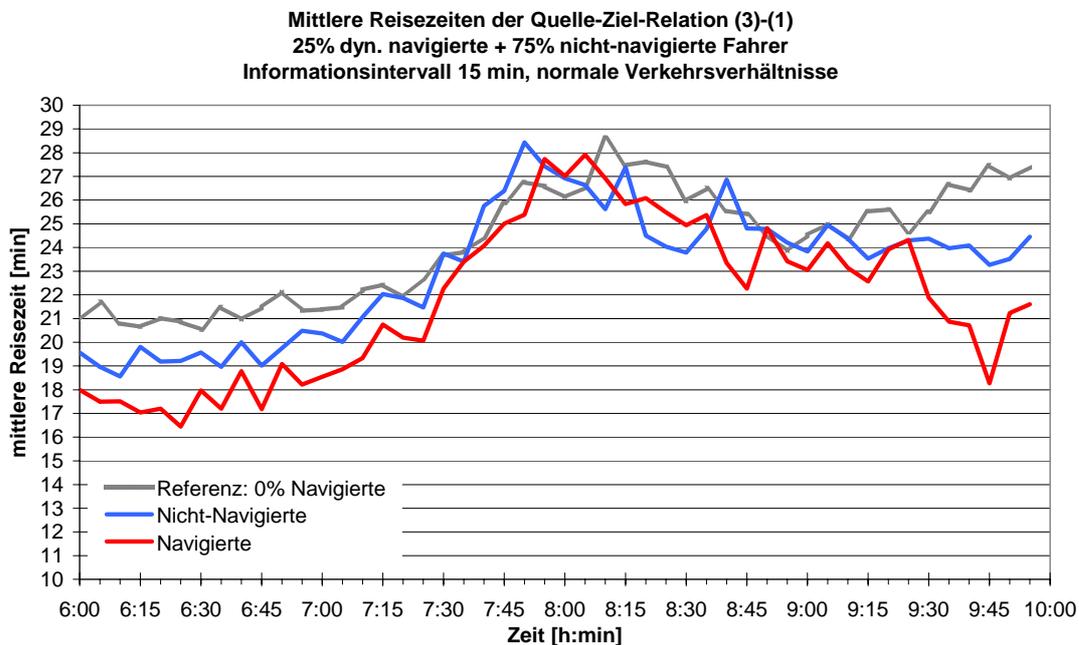


**Bild E.6:** Routen der dynamisch (links) und der dynamisch nur auf dem hochrangigen Straßennetz (rechts) navigierten Pkw der Quelle-Ziel-Relation (1)-(3) bei 35 % Penetrationsrate, Informationsintervall 15 min, normale Verkehrsverhältnisse

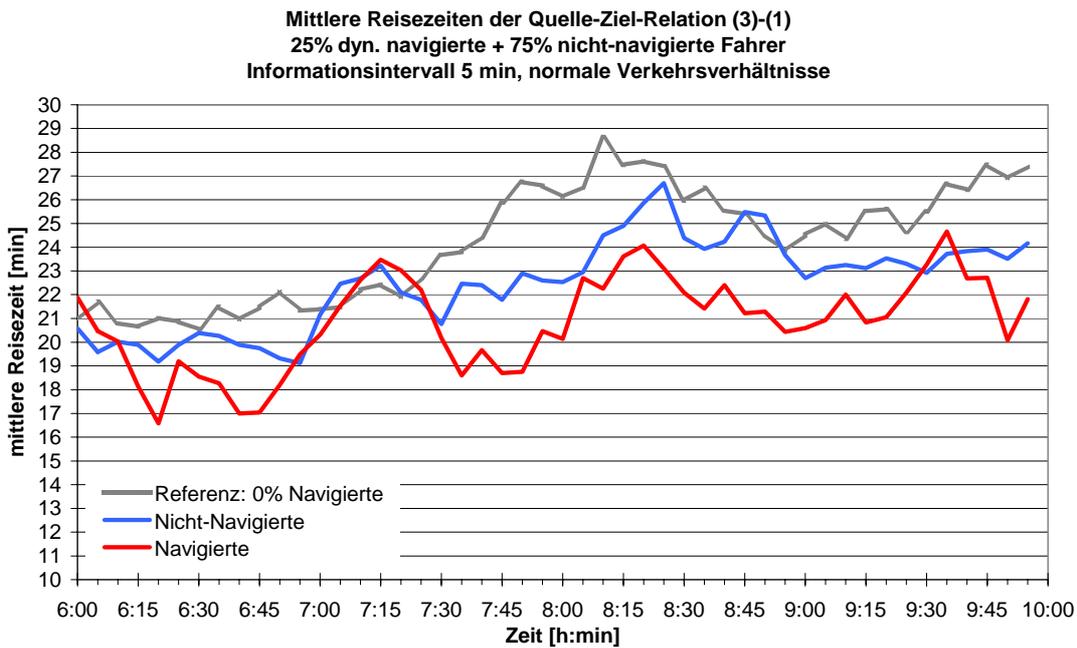
## E.3 Reisezeiten und Routenverläufe der Quelle-Ziel-Relation (3)-(1)



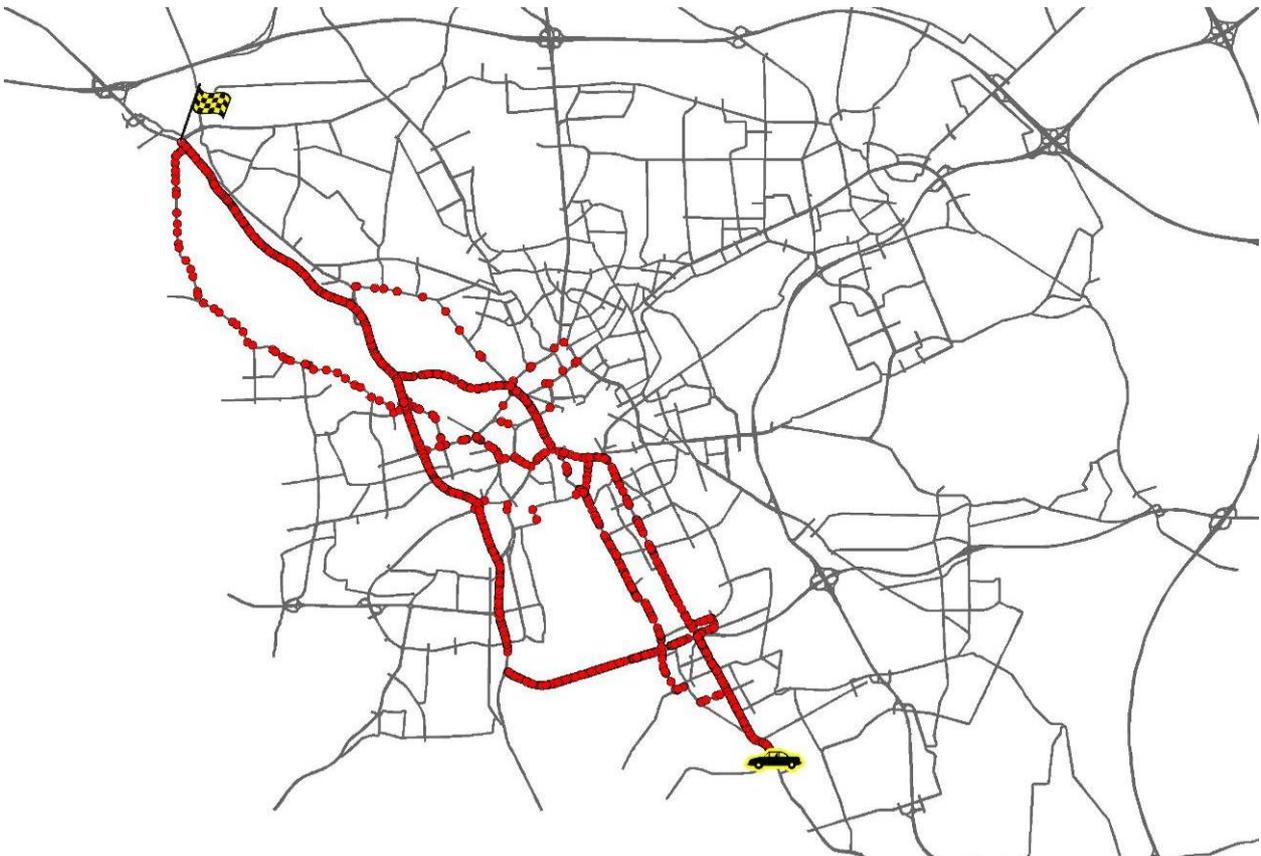
**Bild E.7:** Mittlere Reisezeiten der Quelle-Ziel-Relation (3)-(1), 25 % Penetrationsrate, Informationsintervall 30 min, normale Verkehrsverhältnisse, dynamische Navigationsweise



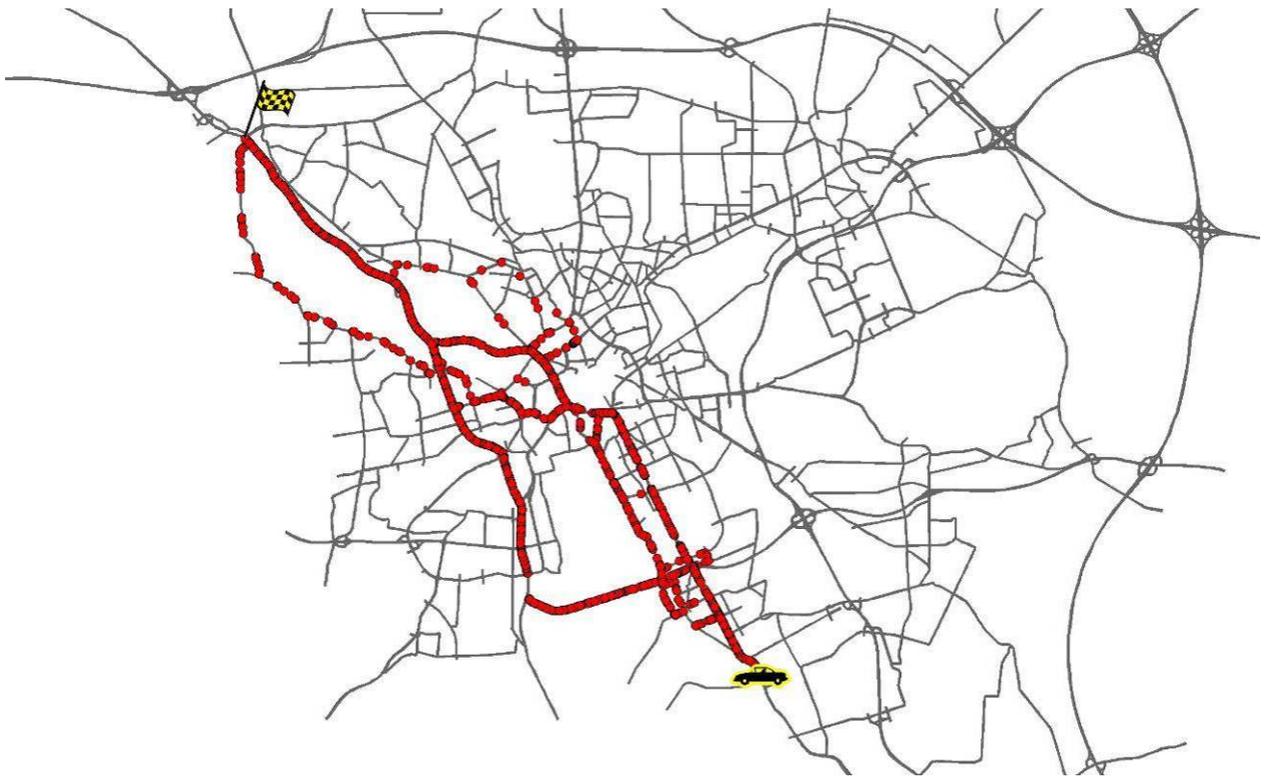
**Bild E.8:** Mittlere Reisezeiten der Quelle-Ziel-Relation (3)-(1), 25 % Penetrationsrate, Informationsintervall 15 min, normale Verkehrsverhältnisse, dynamische Navigationsweise



**Bild E.9:** Mittlere Reisezeiten der Quelle-Ziel-Relation (3)-(1), 25 % Penetrationsrate, Informationsintervall 5 min, normale Verkehrsverhältnisse, dynamische Navigationsweise



**Bild E.10:** Routen der dynamisch navigierten Pkw der Quelle-Ziel Relation (3)-(1) bei 35 % Penetrationsrate, Informationsintervall 30 min, dynamische Navigationsweise



**Bild E.11:** Routen der dynamisch navigierten Pkw der Quelle-Ziel Relation (3)–(1) bei 35 % Penetrationsrate, Informationsintervall 15 min, dynamische Navigationsweise



**Bild E.12:** Routen der dynamisch navigierten Pkw der Quelle-Ziel Relation (3)–(1) bei 35 % Penetrationsrate, Informationsintervall 5 min, dynamische Navigationsweise



Bild E.13: Routen der nicht navigierten Pkw der Quelle-Ziel Relation (3)-(1)

E.4 Reisezeiten und Routenverläufe der Quelle-Ziel-Relation (3)-(2)

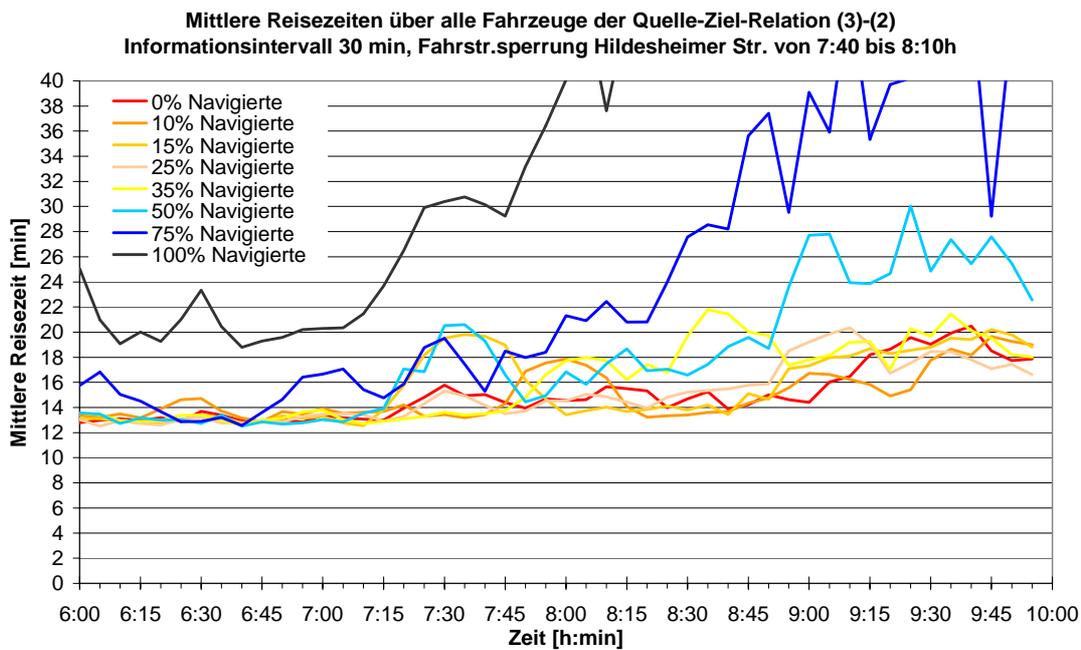
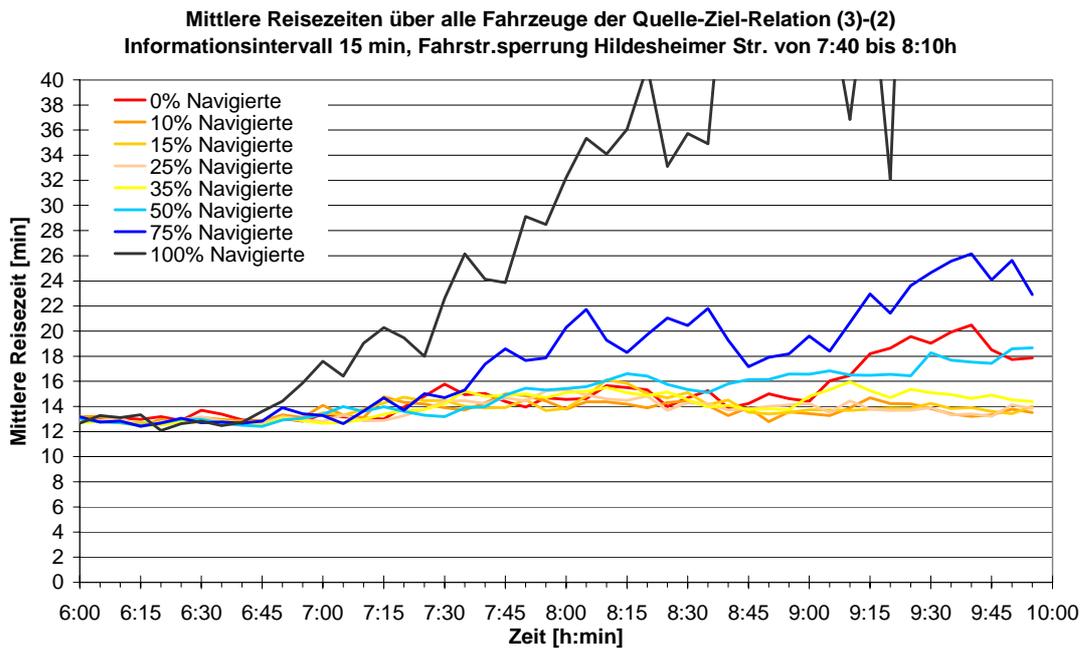
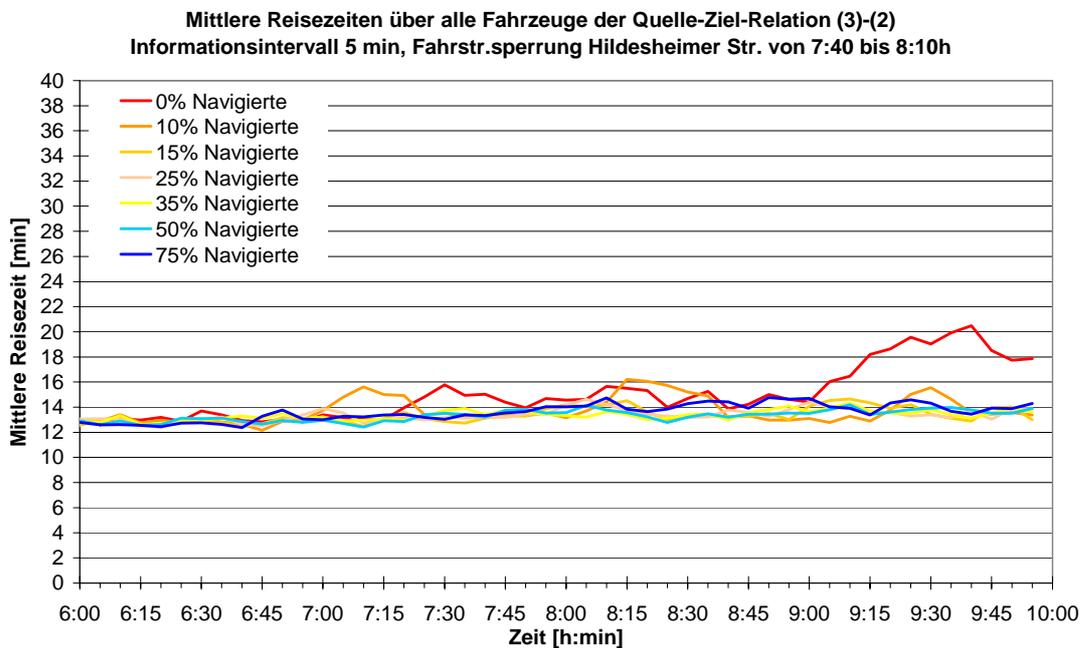


Bild E.14: Mittlere Reisezeiten der Fahrzeuge der Quelle-Ziel-Relation (3)-(2) bei unterschiedlichen Penetrationsraten, Informationsintervall 30 min, Störfall 2, dynamische Navigationsweise



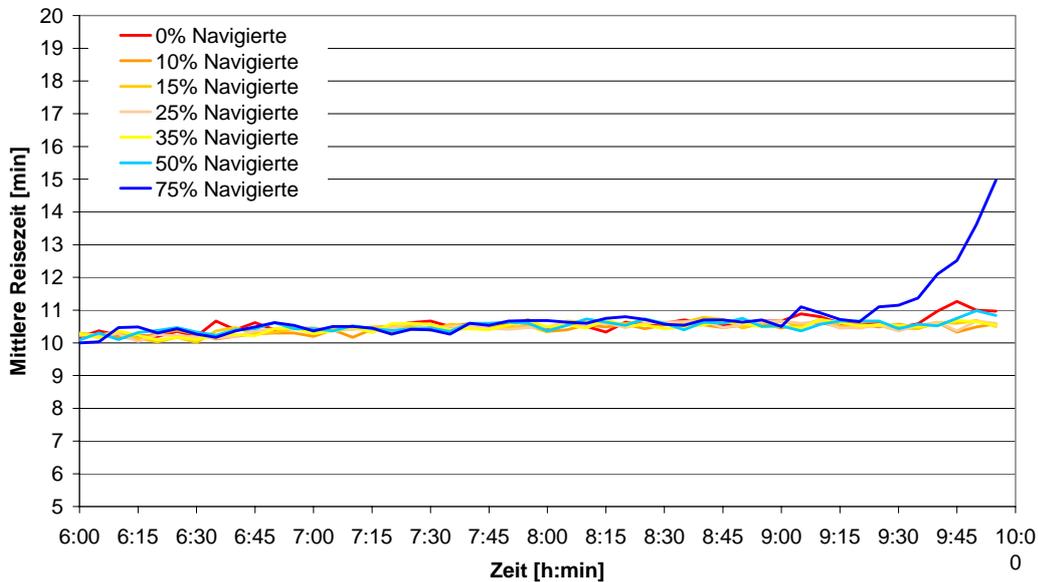
**Bild E.15:** Mittlere Reisezeiten der Fahrzeuge der Quelle-Ziel-Relation (3)-(2) bei unterschiedlichen Penetrationsraten, Informationsintervall 15 min, Störfall 2, dynamische Navigationsweise



**Bild E.16:** Mittlere Reisezeiten der Fahrzeuge der Quelle-Ziel-Relation (3)-(2) bei unterschiedlichen Penetrationsraten, Informationsintervall 5 min, Störfall 2, dynamische Navigationsweise

### E.5 Reisezeiten und Routenverläufe der Quelle-Ziel-Relation (4)-(3)

Mittlere Reisezeiten über alle Fahrzeuge der Quelle-Ziel-Relation (4)-(3)  
Informationsintervall 30 min, normale Verkehrsverhältnisse

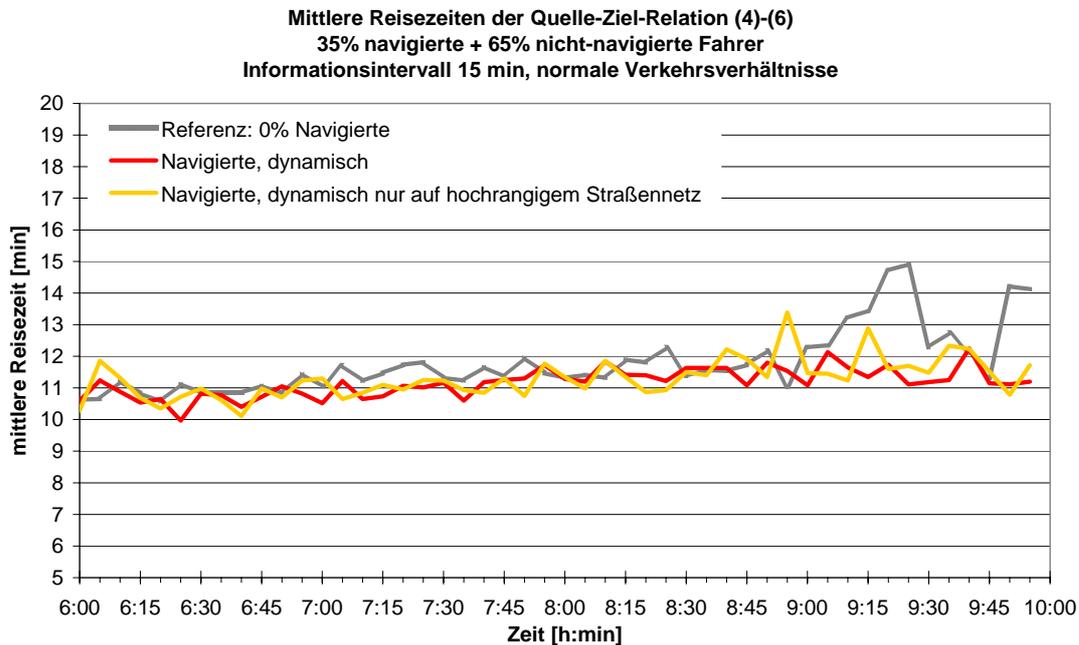


**Bild E.17:** Mittlere Reisezeiten der Fahrzeuge der Quelle-Ziel-Relation (4)-(3) bei unterschiedlichen Penetrationsraten, Informationsintervall 30 min, normale Verkehrsverhältnisse, dynamische Navigationsweise

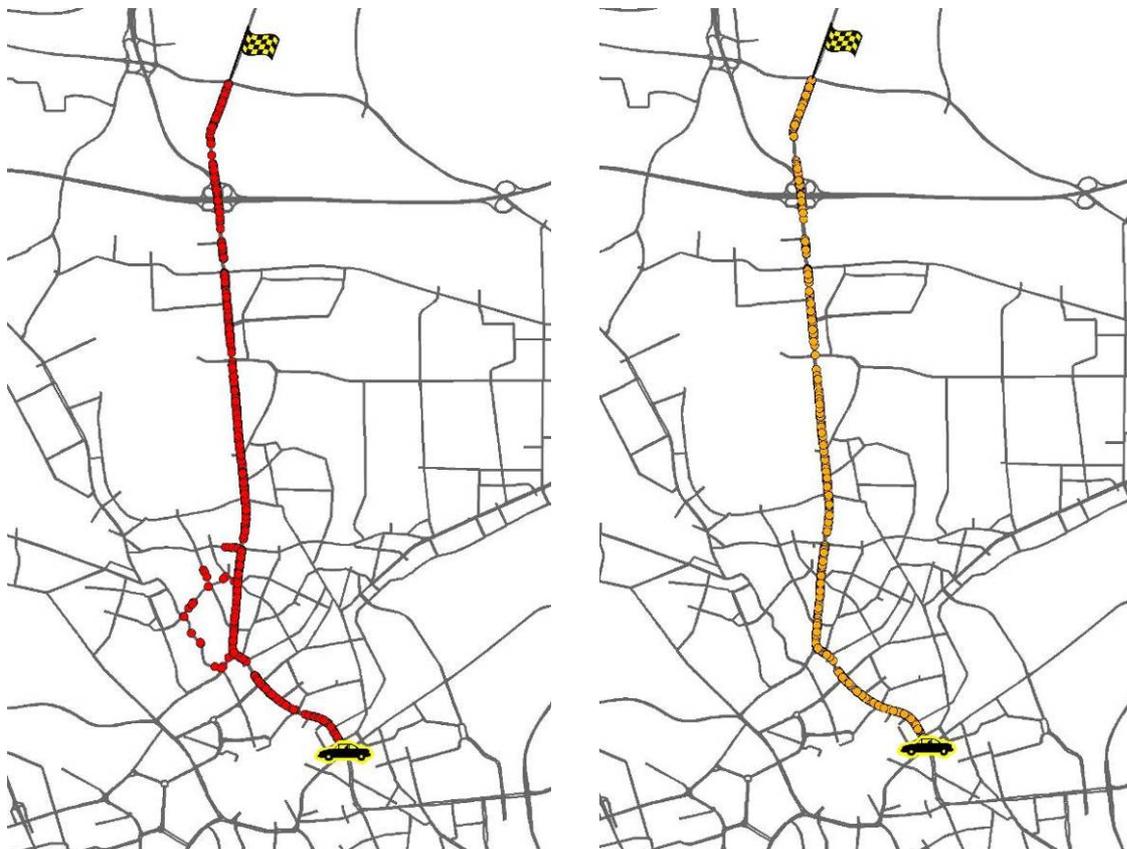


**Bild E.18:** Routen der nicht navigierten (links) und der dynamisch navigierten Pkw der Quelle-Ziel Relation (4)-(3) bei 35 % Penetrationsrate, Informationsintervall 30 min, dynamische Navigationsweise

## E.6 Reisezeiten und Routenverläufe der Quelle-Ziel-Relation (4)-(5)



**Bild E.19:** Mittlere Reisezeiten der navigierten Pkw der Quelle-Ziel-Relation (4)-(5) bei 35 % Penetrationsrate, Informationsintervall 15 min, Navigationsweise: dynamisch bzw. dynamisch nur auf hochrangigem Straßennetz



**Bild E.20:** Routen der dynamisch (links) und der dynamisch nur auf dem hochrangigen Straßennetz (rechts) navigierten Pkw der Quelle-Ziel Relation (4)-(5) bei 35 % Penetrationsrate, Informationsintervall 15 min, normale Verkehrsverhältnisse

E.7 Reisezeiten und Routenverläufe der Quelle-Ziel-Relation (5)-(4)

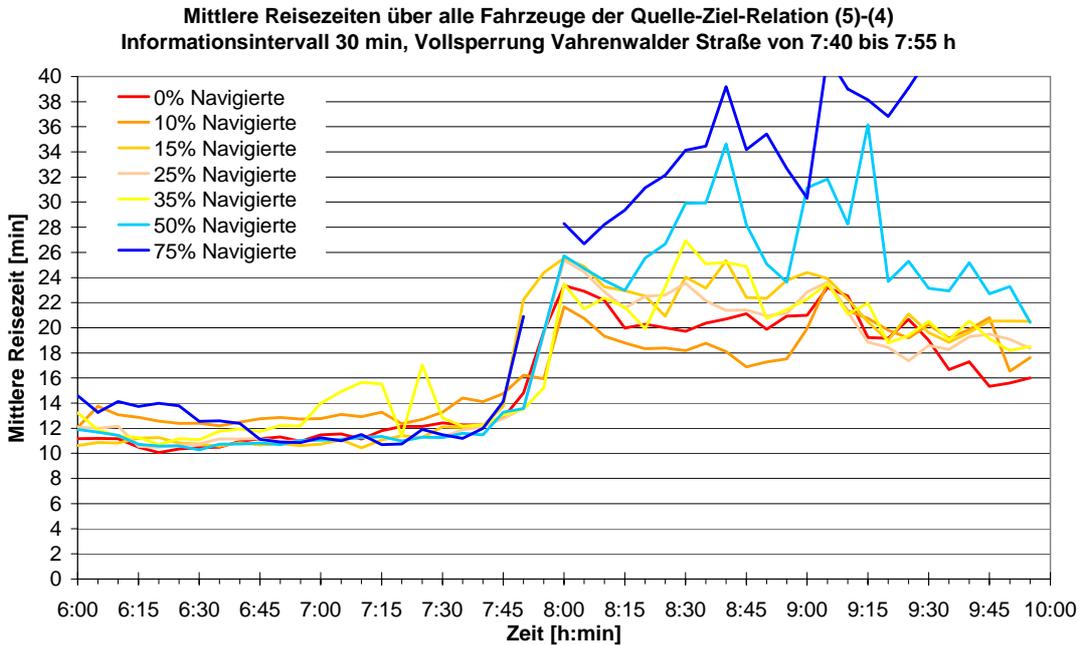


Bild E.21: Mittlere Reisezeiten der Fahrzeuge der Quelle-Ziel-Relation (5)-(4) bei unterschiedlichen Penetrationsraten, Informationsintervall 30 min, Störfall 3, dynamische Navigationsweise

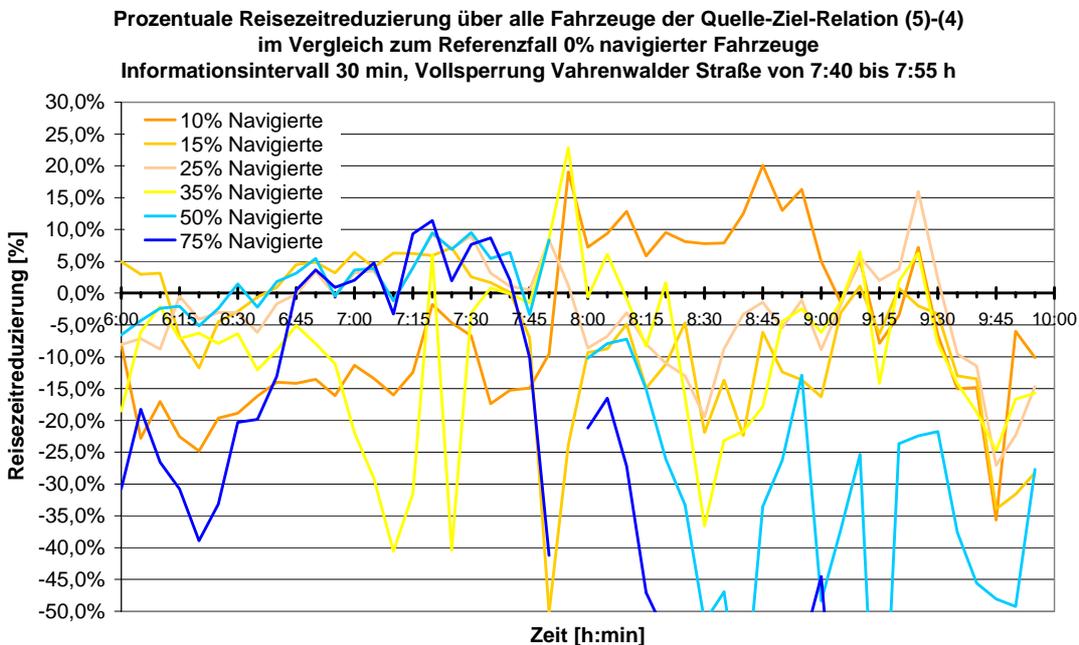
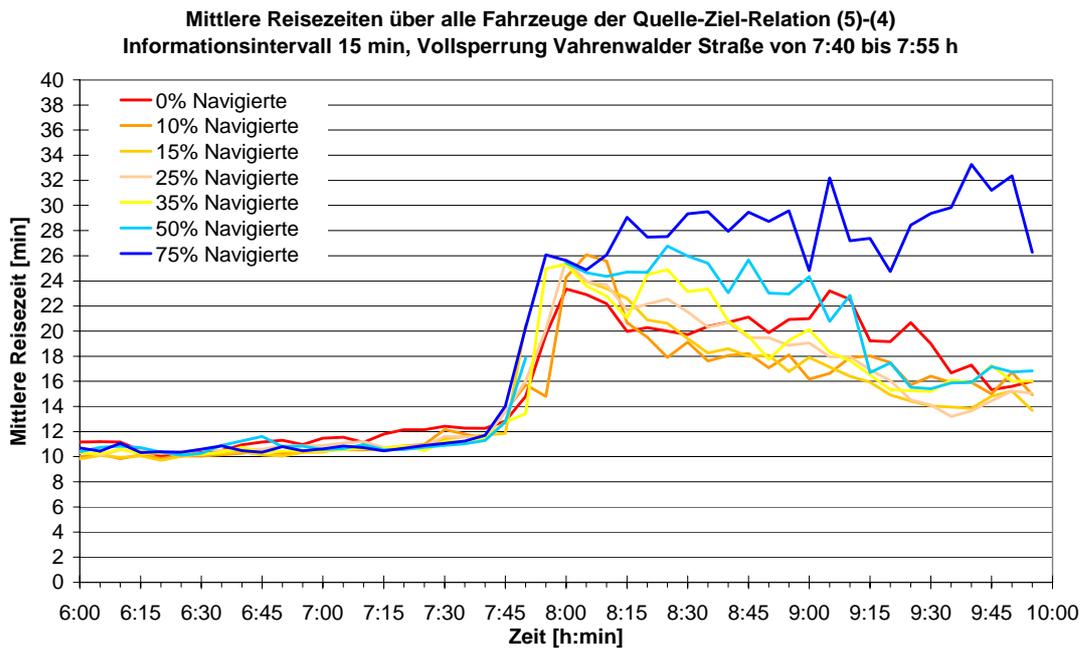
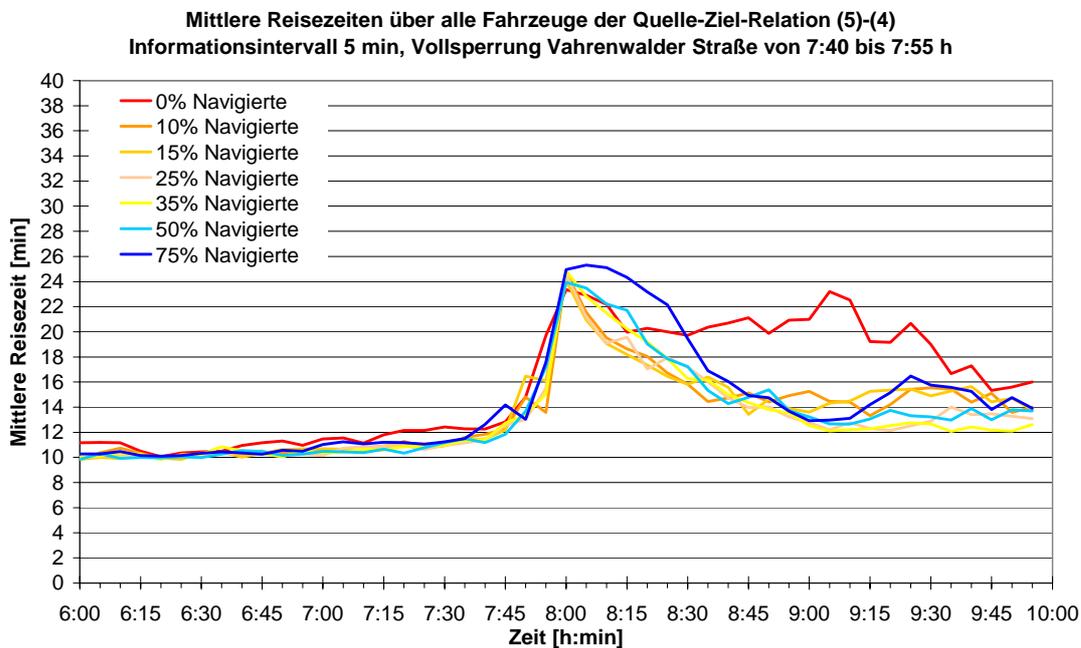


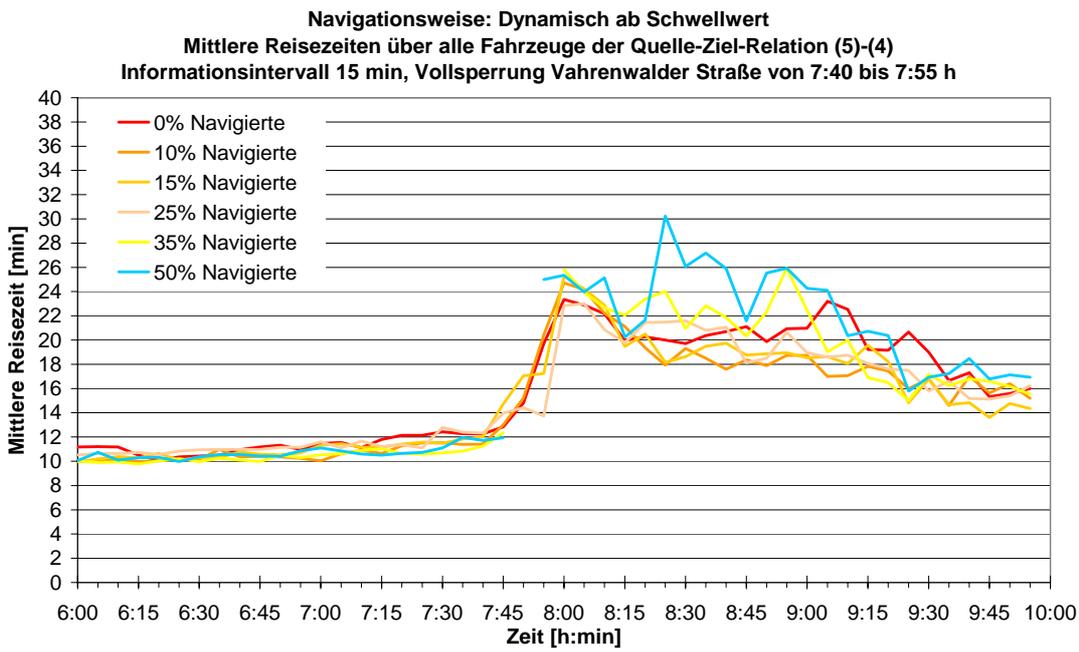
Bild E.22: Prozentuale Reisezeitreduzierung über alle Fahrzeuge der Quelle-Ziel-Relation (5)-(4) bei unterschiedlichen Penetrationsraten, Informationsintervall 30 min, Störfall 3, dynamische Navigationsweise



**Bild E.23:** Mittlere Reisezeiten der Fahrzeuge der Quelle-Ziel-Relation (5)-(4) bei unterschiedlichen Penetrationsraten, Informationsintervall 15 min, Störfall 3, dynamische Navigationsweise



**Bild E.24:** Mittlere Reisezeiten der Fahrzeuge der Quelle-Ziel-Relation (5)-(4) bei unterschiedlichen Penetrationsraten, Informationsintervall 5 min, Störfall 3, dynamische Navigationsweise



**Bild E.25: Mittlere Reisezeiten der Fahrzeuge der Quelle-Ziel-Relation (5)-(4) bei unterschiedlichen Penetrationsraten, Informationsintervall 15 min, Störfall 3, Navigationsweise: Dynamisch ab Schwellwert**

