

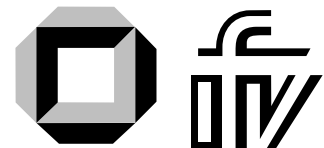




**Stefan Geweke**

**Wirksamkeit von Verkehrs-  
informationen und belastungs-  
abhängigen Preisen zur Nutzung von  
Kapazitätsreserven im Straßennetz**

INSTITUT FÜR VERKEHRSWESEN  
UNIVERSITÄT KARLSRUHE (TH)  
PROFESSOR DR.-ING. D. ZUMKELLER



Schriftenreihe Heft 67/09 ISBN 978-3-9811078-3-8

© 2009 Institut für Verkehrswesen

Universität Karlsruhe (TH)

ISBN 3-9811078-3-7

978-3-9811078-3-8

ISSN 0341 – 5503

Alle Rechte vorbehalten

Herausgeber und Vertrieb:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Zumkeller

Institut für Verkehrswesen

Universität Karlsruhe (TH)

Kaiserstraße 12, Postfach 69 80

D-76128 Karlsruhe

Telefon: (07 21) 6 08-22 51

Telefax: (07 21) 6 08-80 31

# Kurzfassung

Geweke, Stefan

## Wirksamkeit von Verkehrsinformationen und belastungsabhängigen Preisen zur Nutzung von Kapazitätsreserven im Straßennetz

112 Seiten, 90 Abbildungen, 24 Tabellen

Individualisierte, dynamische Verkehrsinformationen und belastungsabhängige Straßenbenutzungsgebühren können dazu beitragen, Staus im Straßenverkehr zu reduzieren. Die Wirksamkeit von Verkehrsdiensten hängt von verschiedenen Faktoren ab, wie der Informationsqualität, der Netzauslastung, der Netzdichte, dem Ausstattungs- und Nutzungsgrad sowie dem Befolgungsverhalten. Reaktionen auf eine Maut sind insbesondere von der Art des Preissystems und der Preissensitivität der Verkehrsteilnehmer abhängig. Da in der Zukunft bei einer besseren Datenlage mit höheren Informationsqualitäten sowie größeren Nutzungsgraden von Verkehrsdiensten zu rechnen ist, stellt sich die Frage, welche Wirkungen sich dadurch ergeben.

Zur Analyse der Effekte von individuellen Verkehrsinformationen und belastungsabhängigen Straßenbenutzungsgebühren wurde in dieser Arbeit ein mikroskopisches Modell zur Abbildung des Verkehrsverhaltens entwickelt. Die Modellierung einer integrierten Wahl von Route und Abfahrtszeit basiert auf einer empirischen Studie, die das Institut für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe (TH) durchgeführt hat. Somit können Entscheidungen von Personen aufgrund von Informationen und einer differenzierten Maut vor Reiseantritt abgebildet werden. Außerdem berücksichtigt das Modell die Reaktionen auf Informationen während der Fahrt. Zur Modellierung der Verkehrsinformationen werden Rückkopplungen zwischen der Straßenbelastung, den Empfehlungen des Dienstes und den Entscheidungen der Verkehrsteilnehmer beachtet. Im Hinblick auf die Reaktionen bei einer Maut bildet das Modell durch eine Iteration das Lernverhalten der Autofahrer ab. Schließlich simuliert ein mikroskopisches Verkehrsflussmodell den Verlauf der einzelnen Fahrten im Straßennetz.

Die Simulationsrechnungen für die Anwendungsfälle zeigen ein differenziertes Ergebnis. Danach können Verkehrsinformationen bei niedrigen Nutzungsgraden bis ca. 30% oder einer spontanen Reduzierung der Straßenkapazität um ca. 50% oder mehr mit großer Wahrscheinlichkeit die mittlere Reisezeit aller Autofahrer verkürzen. Dagegen können hohe Nutzungsgrade ab ca. 70% bei einer schwachen Verkehrsstörung oder kleinen Unterschieden zwischen den Widerständen alternativer Routen die Verkehrsverhältnisse auch verschlechtern. Ferner profitiert der größte Teil der Verkehrsteilnehmer von den Informationsmaßnahmen, wobei die informierten Fahrer bis zu einem Nutzungsgrad von ca. 30% meistens gegenüber den Nichtnutzern von Verkehrsdiensten gewinnen. Bei höheren Nutzungsgraden gleichen sich aber die Reisezeitvorteile zwischen beiden Gruppen immer weiter an. Außerdem führen Informationen vor Fahrtantritt häufig zu einer Selbstzerstörung der Prognose, weshalb meistens bessere Ergebnisse zu erwarten sind, wenn Verkehrsdienste nur Informationen während der Fahrt geben. Schließlich steigern belastungsabhängige Preise zwar die Robustheit des Verkehrssystems, indem Belastungsganglinien geglättet werden. Relevante Reisezeitverkürzungen sind aber nur bei der Anwendung in der Nähe der Kapazitätsgrenze oder darüber erzielbar.

## **Abstract**

**Geweke, Stefan**

### **Effectiveness of Transport Information and Load-Dependent User Charges to Exploit Capacity Reserves in Road Networks**

112 pages, 90 figures, 24 tables

Advanced traveller information services (ATIS) and load-dependent user charges may reduce traffic congestion. The effectiveness of ATIS depends on several factors, such as the information quality, the utilisation of road networks, the equipment of vehicles, the rate of use, and the number of complying users to recommendations. Travellers' reactions on road tolls especially depend on the pricing system and their own price sensitivity. It is very likely that information quality of expected traffic conditions will improve in the future. Additionally, more car drivers will use ATIS than today. Thus, the question arises to what extent transport information will be able to influence traveller behaviour and traffic conditions in road networks.

This dissertation introduces a microscopic model of travel behaviour for analysing the effects of individualised, dynamic transport information and road tolls adjusted to traffic load. The presented approach integrates the choice of a route and departure time as a response to pre-trip information or load-dependent user charges. Furthermore, it considers individual route choices during the journey as a reaction to on-trip information. The model is based on an empirical study that was carried out by the Institute for Transport Studies at the University of Karlsruhe. In order to model transport information the feedback loops between traffic load, recommendations of the service provider, and decisions of travellers were taken into account. Referring to travellers' reactions to road pricing, the model reproduces learning behaviour by iterating through the decision process. Finally, a microscopic traffic flow model simulates individual trips by car in the road network.

The output of the simulation runs shows differentiated results. For example, transport information is able to reduce travel times of road users in most cases if rates of ATIS use are below 30% or road capacity decreases sharply to 50% or more because of traffic congestions. In contrast high rates of ATIS use from more than 70% together with low traffic disruptions or small distinctions between travel times of alternative routes will probably make traffic conditions worse. Generally, all drivers take advantage of transport information, whereas users realise better journey times than non-users up to a rate of ATIS use of about 30%. With higher rates travel times of all drivers become more and more similar. In addition, journey times are mostly better in simulation runs where ATIS only provide on-trip information. Hence, pre-trip information very often creates a self-destroying prophecy for traffic forecasts. Finally, load-dependent road tolls are able to increase the robustness of traffic flows by smoothing traffic load curves. But for cutting travel times, road tolls can only be applied efficiently, if the road network is close to or above its capacity. If there is no congestion, no positive effects towards reducing travel times are likely to be exploited through road charges.

# Wirksamkeit von Verkehrsinformationen und belastungsabhängigen Preisen zur Nutzung von Kapazitätsreserven im Straßennetz

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

von der Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften  
der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH) genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Kfm. Stefan Geweke  
aus Celle

Tag der mündlichen Prüfung: 17. Dezember 2008

Hauptreferent Prof. Dr.-Ing. D. Zumkeller  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. R. Roos

Karlsruhe 2008





## Vorwort

Im Mai 2003 startete ich als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verkehrswesen (IfV) der Universität Karlsruhe (TH) in dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekt „Selbstorganisationsfähigkeit im Verkehr durch I- und K-gestützte Dienste“. Daraus entstand das Thema der vorliegenden Arbeit. Außerdem hatte ich das Glück, eine empirische Studie nutzen zu können, die im Rahmen des Forschungsprojektes durchgeführt wurde. Aber auch ohne weitere, vielfältige Unterstützung wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Zuerst gebührt mein großer Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Dirk Zumkeller. Als Institutsleiter und Hauptreferent hat er ein stimulierendes Umfeld bestehend aus Forschungsprojekten, Lehrtätigkeiten, Diskussionen und Freiräumen geschaffen, das für die wissenschaftliche Arbeit sehr zuträglich ist. Außerdem danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Ralf Roos, dem Leiter des Instituts für Straßen- und Eisenbahnwesen (ISE) der Universität Karlsruhe (TH), für die Übernahme des Korreferats. Meine Zeit am IfV wird mir stets in sehr guter Erinnerung bleiben. Dazu haben alle ehemaligen Kollegen beigetragen. Ihnen gilt ebenfalls ein großer Dank für viele, sehr gute Diskussionen und Anregungen für diese Arbeit. Insbesondere bedanke ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Wilko Manz.

Die für meine Forschung durchzuführenden, mikroskopischen Simulationen waren mit einem hohen Rechen- und Zeitaufwand verbunden. Um möglichst schnelle Ergebnisse zu erzielen, nutzte ich meistens mehrere Computer gleichzeitig, wobei ich nachts und am Wochenende auch auf die Rechner von Kollegen zugreifen konnte. Dafür bedanke ich mich bei Frau Iliana Lüdi und Herrn Carsten Schlosser. Bei der Erstellung von Software hat mich Herr Cornelius Kuppler tatkräftig unterstützt. Außerdem danke ich der PTV AG für die Überlassung des Programms VISUM, das ich im Rahmen meiner Arbeit nutzen durfte sowie die vielen Gespräche, die ich mit dem Support und den Entwicklern von VISUM und VISSIM geführt habe.

Aus dem privaten Umfeld bedanke ich mich bei Gabi Kirz, Tobias Meier und meiner Schwester Christin Geweke für ihre kritischen Anmerkungen bei der Durchsicht der Arbeit. Schließlich bin ich meiner Frau Susan und unseren beiden Kindern Lauritz und Emil zu sehr großem Dank verpflichtet. Sie mussten mich insbesondere in der Schlussphase oft entbehren. Susan danke ich für ihr Vertrauen und die vielen Gespräche, die mich stets angetrieben haben. Meinen Kindern danke ich für ihre Neugierde und Heiterkeit, wodurch sie mir einen wunderbaren Ausgleich geben.

Frankfurt am Main, im Dezember 2008

Stefan Geweke



# Inhalt

<b>1</b>	<b>WIE LASSEN SICH STAUS IM STRAßENVERKEHR REDUZIEREN?</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>GRUNDLAGEN</b>	<b>7</b>
<b>2.1</b>	<b>Berechnung der Auslastung von Straßennetzen</b>	<b>7</b>
2.1.1	Über die mittlere Auslastung aller Kanten	8
2.1.2	Über den Engpass je Route	9
2.1.3	Über die mittlere Reisezeit	10
<b>2.2</b>	<b>Verkehrsinformationen</b>	<b>12</b>
2.2.1	Definition	12
2.2.2	Aufgaben der Verkehrstelematik	13
2.2.2.1	Erfassung	13
2.2.2.2	Verarbeitung	13
2.2.2.3	Übermittlung	14
2.2.2.4	Präsentation	14
2.2.3	Nutzerverhalten	15
<b>2.3</b>	<b>Straßenbenutzungsgebühren</b>	<b>16</b>
2.3.1	Definition	16
2.3.2	Klassifizierung von Mautsystemen	16
2.3.3	Wirkung des Preises auf die Verkehrsnachfrage	18
2.3.4	Akzeptanz	21
<b>2.4</b>	<b>Modellbildung für den Personenverkehr</b>	<b>22</b>
2.4.1	Verkehrsverhalten	22
2.4.2	Konstruktion von Verkehrsmodellen	23
2.4.3	Das klassische Verkehrsmodell	24
2.4.4	Verkehrsumlegungsverfahren	25
2.4.5	Modellierung von Entscheidungen	26
2.4.5.1	Regelbasierte Modelle	26
2.4.5.2	Diskrete Wahlmodelle	27
<b>2.5</b>	<b>Empirische Daten zum Umgang mit Verkehrsinformationen und Verhalten bei Straßenbenutzungsgebühren</b>	<b>28</b>
2.5.1	Erhebungskonzept	28
2.5.2	Durchführung simulierter Fahrten am Computer	29
2.5.3	Stichprobe	31
2.5.3.1	Schichtung	31
2.5.3.2	Soziodemografische Merkmale der Probanden	32
2.5.4	Auswertung von Nutzungs- und Befolgungsgrad	34
<b>2.6</b>	<b>Beschreibung der verwendeten Software</b>	<b>36</b>
2.6.1	Verkehrsumlegung mit PTV VISUM	36
2.6.2	Verkehrsflusssimulation mit PTV VISSIM	37

<b>3</b>	<b>EIN MODELL ZUR ANALYSE VON VERKEHRSINFORMATIONEN UND BELASTUNGSABHÄNGIGEN PREISEN IM STRAßENVERKEHR</b>	<b>39</b>
<b>3.1</b>	<b>Verkehrsinformationsdienst</b>	<b>40</b>
3.1.1	Pre-Trip-Informationen	40
3.1.1.1	Konzept	40
3.1.1.2	Annahmen zur Datenerfassung	41
3.1.1.3	Prognose der Verkehrsnachfrage	42
3.1.1.4	Berechnung der Netzbelastung	42
3.1.1.5	Kalibrierung	43
3.1.2	On-Trip-Informationen	44
<b>3.2</b>	<b>Entscheidungen der Verkehrsteilnehmer</b>	<b>45</b>
3.2.1	Nutzung von Verkehrsinformationen	47
3.2.1.1	Bestimmung des Nutzungsgrades	47
3.2.1.2	Festlegung des Nutzungszeitpunktes	47
3.2.2	Routen- und Verbindungswahl vor Fahrtantritt	48
3.2.2.1	Einflussfaktoren	49
3.2.2.1.1	Routenwahl	49
3.2.2.1.2	Wahl der Abfahrtszeit	49
3.2.2.2	Routen- und Verbindungswiderstände	52
3.2.2.3	Erstellung der Auswahlmenge	52
3.2.2.3.1	Initialroute	53
3.2.2.3.2	Verbindungen bei Nutzung von Verkehrsinformationen vor der Fahrt	54
3.2.2.3.3	Verbindungen bei belastungsabhängigen Preisen	55
3.2.2.4	Schätzung der Modellparameter	55
3.2.2.4.1	Aufbereitung der Daten für die Parameterschätzung	55
3.2.2.4.2	Ohne Straßenbenutzungsgebühren	59
3.2.2.4.3	Mit Straßenbenutzungsgebühren	60
3.2.2.5	Entscheidungen	61
3.2.2.5.1	Wahl einer Initialroute	61
3.2.2.5.2	Verbindungswahl bei Nutzung von Verkehrsinformationen vor der Fahrt	61
3.2.2.5.3	Verbindungswahl bei belastungsabhängigen Preisen	62
3.2.3	Routenwahl während der Fahrt	62
<b>4</b>	<b>SIMULATIONSRECHNUNGEN</b>	<b>63</b>
<b>4.1</b>	<b>Kenngößen für die Bewertung</b>	<b>63</b>
<b>4.2</b>	<b>Anwendung für ein einfaches und symmetrisches Straßennetz</b>	<b>65</b>
4.2.1	Netzmodell	65
4.2.2	Verkehrsnachfrage	67
4.2.3	Eigenschaften der Untersuchungsfälle	68
4.2.3.1	Modellierung einer Störung des Verkehrsablaufs	69
4.2.3.2	Differenzierte Preise für die Straßenbenutzung	71
4.2.4	Analyse von Modellfehlern	73
4.2.5	On-Trip-Informationen bei spontan auftretender Störung und gleich bleibender Verkehrsnachfrage	75
4.2.5.1	Mittlere Reisezeiten in Abhängigkeit von der Streckenkapazität	75

4.2.5.1.1	Reduzierung auf 90 Prozent	75
4.2.5.1.2	Reduzierung auf 50 Prozent	77
4.2.5.1.3	Reduzierung auf 10 Prozent	79
4.2.5.2	Zusammenfassung	80
4.2.6	Pre- und On-Informationen bei spontan auftretender Störung und variabler Verkehrsnachfrage	81
4.2.6.1	Wirkung von Pre-Trip-Informationen auf die Verkehrsnachfrageganglinie	82
4.2.6.2	Veränderung der Reisezeitenganglinie	86
4.2.6.3	Mittlere Reisezeiten in Abhängigkeit von der Streckenkapazität	90
4.2.6.4	Zusammenfassung	92
4.2.7	Belastungsabhängige Preise bei hoher Netzauslastung	93
4.2.7.1	Verschiebung der Abfahrtszeit	93
4.2.7.2	Veränderung der Verkehrsnachfrageganglinie	94
4.2.7.3	Veränderung der Reisezeitenganglinie	95
4.2.7.4	Zusammenfassung	95
<b>4.3</b>	<b>Anwendung für die Stadt Erlangen</b>	<b>97</b>
4.3.1	Netzmodell	97
4.3.2	Verkehrsnachfrage	98
4.3.3	Eigenschaften der Untersuchungsfälle	99
4.3.3.1	Modellierung einer Störung des Verkehrsablaufs	99
4.3.3.2	Differenzierte Preise für die Straßenbenutzung	100
4.3.4	Pre- und On-Trip-Informationen bei spontan auftretender Störung	102
4.3.4.1	Wirkung von Pre-Trip-Informationen auf die Verkehrsnachfrageganglinie	103
4.3.4.2	Veränderung der Reisezeitenganglinie	104
4.3.4.3	Mittlere Reisezeiten	105
4.3.5	Belastungsabhängige Preise auf den Erlanger Talquerungen	106
4.3.5.1	Verschiebung der Abfahrtszeit	106
4.3.5.2	Veränderung der Verkehrsnachfrageganglinie	107
4.3.5.3	Veränderung der Reisezeitenganglinie	108
<b>5</b>	<b>VERKEHRSSINFORMATIONEN UND BELASTUNGSABHÄNGIGE PREISE KÖNNEN TEILWEISE DIE EFFIZIENZ UND ROBUSTHEIT IM STRAßENVERKEHR ERHÖHEN</b>	<b>109</b>
<b>I.</b>	<b>ANHANG</b>	<b>I</b>
<b>II.</b>	<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS</b>	<b>VII</b>
<b>III.</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>IX</b>



# 1 Wie lassen sich Staus im Straßenverkehr reduzieren?

Staus im Straßenverkehr sind ein alltägliches Problem in Ballungsräumen und auf wichtigen Verkehrsachsen in Deutschland sowie weltweit. Abbildung 1 zeigt z. B. eine verstopfte Straßenkreuzung in Peking im Jahr 2008. Überlastungen entstehen, wenn die Anzahl der Fahrzeuge, die auf einer Straße fahren wollen, deren Kapazität übersteigt. Die Kapazität einer Straßenverkehrsanlage lässt sich als größte Verkehrsstärke definieren, welche die Infrastruktur bei richtliniengerechtem Ausbau und unter günstigen Rahmenbedingungen wie Trockenheit und Helligkeit im Mittel gerade noch bewältigen kann ([1], 1-4). Dabei beschreibt die Verkehrsstärke die Anzahl der Fahrzeuge je Zeiteinheit an einem Straßenquerschnitt.



**Abbildung 1: Verstopfte Straßenkreuzung in Peking im Jahr 2008**

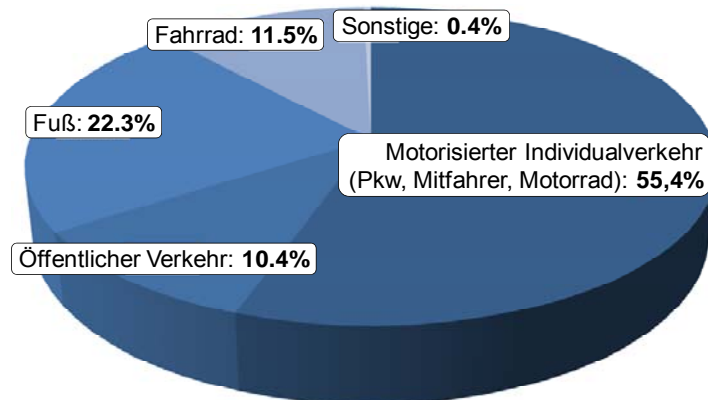
Es gibt zwei Arten von Verkehrsstaus auf der Straße. Einerseits können Strecken notorisch überlastet sein. Hierbei wiederholt sich der Stau regelmäßig, insbesondere an Arbeitstagen, am selben Ort und zur selben Zeit. Andererseits treten Verkehrsstörungen spontan und unvorhergesehen auf. Im Allgemeinen gibt es verschiedene Ursachen für Staus, die sich nach der Straßenverwaltung Hessen zu 40% auf hohes Verkehrsaufkommen, 35% auf Baustellen und 25% auf Unfälle aufteilen lassen. Bei dieser groben Klassifizierung fehlen aber Einflussfaktoren, wie ungünstige Wetterverhältnisse, fehlerhaftes Fahrverhalten oder mangelhafte Verkehrslenkung ([2], 536).

Durch Staus ergeben sich negative Effekte für betroffene Verkehrsteilnehmer, wie Unsicherheiten über die Reisezeit und erhöhter Zeitaufwand. Außerdem belasten gesteigerte Emissionen die Umwelt. Dagegen müssen Verkehrsstörungen nicht immer schlecht sein. Denn eine Reduzierung von Überlastungen auf den Straßen kann auch zu weiterer Suburbanisierung und erhöhtem Flächenverbrauch führen. Außerdem zeigen empirische Studien, dass nicht alle Pendler den Stau auf ihrem Weg zur Arbeit notwendigerweise als etwas Schlimmes empfinden und ihn als individuelle Zeit nutzen, um z. B. ungestört Musik zu hören oder zu telefonieren ([3], 121).

Staus kennzeichnen Engpässe im Straßennetz. Sie stellen somit ein Maß für die Leistungsfähigkeit der Infrastruktur dar und erfüllen die Aufgabe, den Verkehr zu regulieren. Will man sie beseitigen, erfordert es eine sorgfältige Analyse, weil es passieren kann, dass sie nur an einen anderen Ort verlagert werden ([3], 118-119). Außerdem nimmt man bereits beim Bau von Straßenverkehrsanlagen eine Wahrscheinlichkeit für Überlastungen in Kauf. Denn aus wirtschaftlichen Gründen wird die Leistungsfähigkeit nicht für das maximale Verkehrsauf-

kommen ausgelegt, das jemals erreicht werden kann. Stattdessen ermittelt man die maßgebliche Verkehrsstärke üblicherweise anhand der 30. Stunde. Dazu müssen die Verkehrsstärken aller 8760 Stunden eines Jahres absteigend sortiert werden. Anschließend bestimmt der 30. Wert die Bemessungsverkehrsstärke ([1], 2-6). Ferner gibt es beim Neu- oder Ausbau von Straßen das Phänomen, dass Verkehrsangebot seine Nachfrage schafft. Deshalb kann es passieren, dass eine Erhöhung der Kapazität mehr Verkehr anzieht, wodurch am Ende der Stau auf der gleichen Strecke auf demselben Niveau erneut auftritt ([3], 119-121).

Danach wird deutlich, dass der Bau von Infrastruktur, der mit hohen Kosten verbunden ist, nicht die beste Lösung sein muss, um Staus zu reduzieren. Dies gilt insbesondere für hoch entwickelte Länder wie Deutschland, wo bereits eine hohe Netzdichte erreicht ist. Denn häufig besteht hier die Gefahr, dass negative Wirkungen, wie eine Förderung der Zersiedelung, höhere Flächennutzung und Bodenversiegelung, Trennwirkungen, Emissionen sowie Unfälle aufgrund von erhöhtem Verkehrsaufkommen, die grundsätzlich positiven Eigenschaften von Mobilität übertreffen.



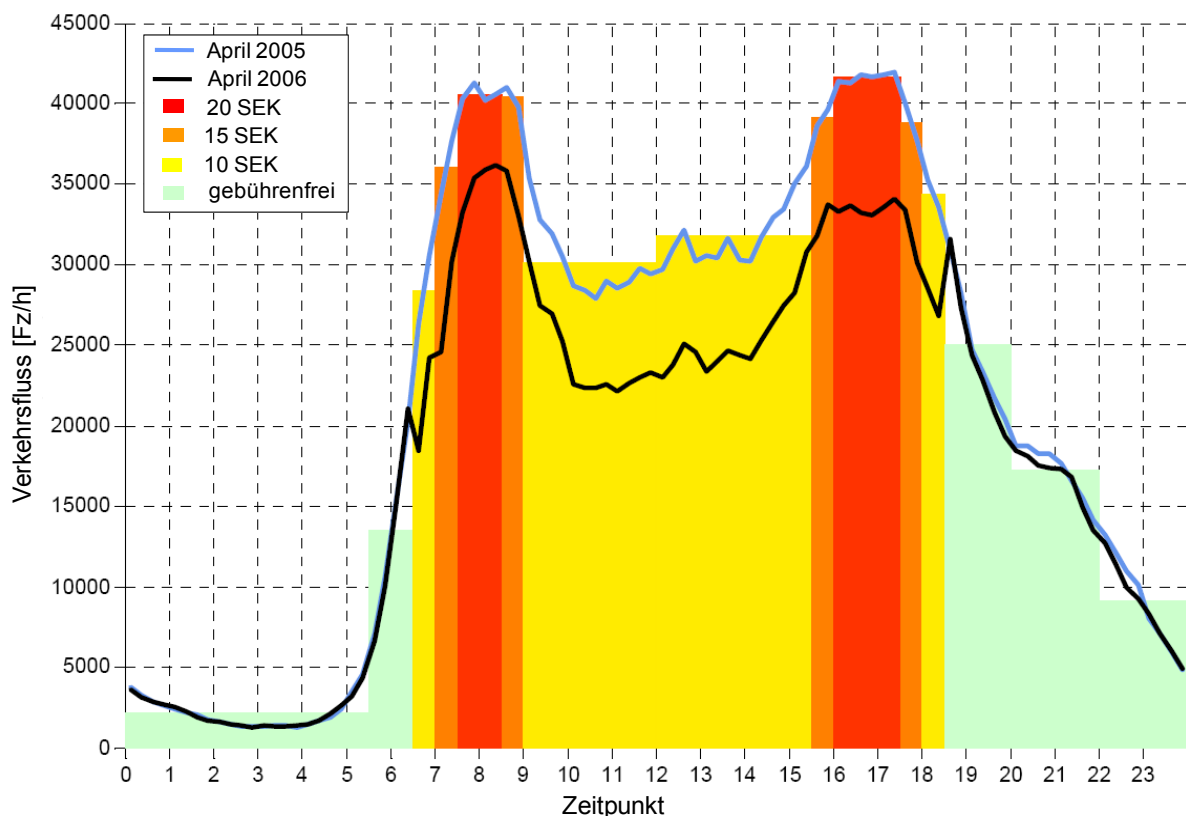
**Abbildung 2: Modal Split im Personenverkehr in Deutschland nach Aufkommen im Jahr 2006**

Eine weitere Lösungsmöglichkeit besteht in der Verlagerung von Fahrten des motorisierten Individualverkehrs (MIV) auf den öffentlichen Verkehr (ÖV). Busse und Bahnen eignen sich insbesondere für Pendel- oder Einkaufswege in die Innenstadt. Außerdem ermöglichen sie Mobilität für ältere Menschen, die nicht mehr Auto fahren wollen oder können und für jüngere, die noch keinen Führerschein besitzen. Insgesamt ist aber der Marktanteil des ÖV im Verhältnis zum MIV trotz großer Investitionen in die Infrastruktur und Staus auf den Straßen gering geblieben. Nach Abbildung 2 lag der Anteil des ÖV am Personenverkehrsaufkommen in Deutschland im Jahr 2006 bei ca. 10,4% ([4], 10). Daher ist es fraglich, ob Menschen in der Zukunft ihr Verhalten ändern werden und der ÖV die Verkehrsnachfrage im MIV wirklich maßgeblich verringern kann ([3], 123-125). Auch im Güterverkehr spielt die Verlagerung von der Straße auf die Schiene eine bedeutende Rolle. Der Anteil des Güterverkehrs an der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke auf Autobahnen betrug im Jahr 2005 an Werktagen ca. 15%. Auf Bundesstraßen lag der Anteil bei etwa 9% ([5], 110-111). Aus Vereinfachungsgründen und wegen des im Vergleich zum Personenverkehr im Mittel noch relativ niedrigen Anteils soll der Güterverkehr in dieser Arbeit aber nicht weiter betrachtet werden.

Des Weiteren können Verkehrsteilnehmer Fahrten räumlich und zeitlich verschieben oder ganz darauf verzichten. Letzteres gilt z. B. für die Substitution von Arbeitswegen durch Telearbeit von zu Hause. Die Potenziale dafür sind aber als gering einzuschätzen ([6], 183). Die zeitliche Verschiebung hängt von den Verpflichtungen und der Gebundenheit einer Person ab, die sich aus ihrem Tagesablauf ergeben. Möglichkeiten bestehen z. B. durch flexible Arbeitszeitregelungen oder bei Freizeitwegen. Für eine räumliche Verlagerung sind freie Ka-



pazitäten im Netz notwendig. Dies ist bei notorischen Überlastungen eher nicht der Fall. Denn die meisten davon betroffenen Fahrer kennen die Verkehrssituation im Netz, weil diese sich regelmäßig wiederholt und Routenalternativen häufig schon ausprobiert wurden. Somit stehen größtenteils nur noch die Autofahrer im notorischen Stau, die ihre Abfahrtszeit nicht verschieben können. Lediglich beim Durchgangsverkehr und bei Personen ohne Ortskenntnis besteht die Möglichkeit zur weiträumigen Umleitung, wenn sie sich frühzeitig informieren. Ein größeres Potenzial für die zeitliche und räumliche Anpassung der Fahrtwünsche eröffnet sich bei spontan auftretenden Verkehrsstörungen. Für eine Entscheidung fehlen aber häufig die relevanten Informationen. Als Lösung können Verkehrsdienste Informationsdefizite abbauen und durch Empfehlungen von Alternativen das Verhalten der Reisenden beeinflussen. Wenn aber bei einer hohen Netzauslastung nur noch wenige alternative Kapazitäten frei sind, gibt es auch durch Verkehrsinformationen keinen großen Spielraum mehr. Außerdem reagieren Verkehrsteilnehmer auf Meldungen sowohl aus intra- als auch interpersoneller Sicht verschieden. Damit wird das Verhalten schwer vorhersagbar. Deshalb besteht eine weitere Grenze darin, dass es keine Verkehrsprognosen von einer Qualität geben kann, wie sie z. B. heute schon Wettervorhersagen erreichen. Derartige präzise Voraussagen können für den Straßenverkehr nicht funktionieren, weil sie sich aufgrund von Rückkopplungsprozessen wahrscheinlich selbst zerstören.



**Abbildung 3: Verkehrsnachfrageganglinien vor und nach der Einführung einer City-Maut**

Eine weitere Maßnahme zur Reduzierung von Staus kann die Erhebung von Straßenbenutzungsgebühren sein, die in Zeiten hoher Nachfrage teurer sind als bei schwacher Auslastung. Es ist zwar davon auszugehen, dass der Preis kurzfristig das Verkehrsaufkommen in der Spitze senkt und eine Verlagerung auf alternative Verkehrsmittel und Zeiträume mit niedrigeren Preisen fördert. Langfristig wird sich das Verhalten aber mit steigendem Wohlstand wieder soweit anpassen, bis erneut die Kapazitätsgrenze erreicht wird und man gezwungen ist, die Preise anzuheben. Außerdem kann man dann feststellen, dass sich als Ergebnis der

Staugebühr die Zusammensetzung der Verkehrsteilnehmer verändert hat. Diejenigen, die nicht bereit waren, den Preis zu zahlen, wurden durch die Fahrer ersetzt, welche die höheren Kosten tragen konnten. Ferner zeigen die Erfahrungen, dass eine Erhöhung der Benzinpreise das Verkehrsaufkommen in der Vergangenheit kaum beeinflusst hat ([3], 125-127). Andererseits könnte bei den aktuell hohen Ölpreisen der Punkt bald erreicht sein, ab dem Verkehrsteilnehmer mit stärkeren Verhaltensanpassungen reagieren, zumal in der Zukunft langfristig kaum mit einem Rückgang der Kosten für Mobilität zu rechnen ist ([7], 33). Ferner gibt es Beispiele, wie die Einführung einer City-Maut in London oder Stockholm, die überwiegend positive Wirkungen auf die Reduzierung von Staus ausgeübt haben. Abbildung 3 zeigt die Verkehrsnachfrageganglinie für den MIV über einen Tag vor (April 2005) und nach (April 2006) der Einführung einer Innenstadtmaut in Stockholm. Die Höhe der Gebühren ist je nach Einfahrtszeitpunkt in das Stadtzentrum zeitlich gestaffelt. Insgesamt ist eine deutliche Reduzierung der Verkehrsnachfrage nach Einführung der Straßenbenutzungsgebühr zu beobachten [8].

Schließlich wird auch die in den letzten Jahren sichtbare Stagnation der Zunahme des Personenverkehrs [9] nicht dazu führen, dass Staus im Straßenverkehr in der Zukunft kein Problem mehr darstellen, sondern die Situation in manchen Regionen nur dämpfen. Der demografische Wandel führt zwar zu einer abnehmenden Bevölkerungszahl und damit wahrscheinlich auch zu einer geringeren Verkehrsnachfrage, aber räumliche und zeitliche Unterschiede beim Verkehrsaufkommen werden weiterhin für lokale Überlastungen im Straßennetz sorgen.

Die oben aufgezählten Handlungsoptionen verdeutlichen die Schwierigkeiten bei der Reduzierung oder gar Vermeidung von Staus im Straßenverkehr. Gleichwohl lassen Verkehrsinformationen bei spontan auftretenden Kapazitätsreduzierungen Verbesserungsmöglichkeiten des Verkehrsablaufs erwarten. In Abhängigkeit vom Nutzungszeitpunkt kann man zwischen Meldungen vor Fahrtantritt (Pre-Trip) und während der Fahrt (On-Trip) unterscheiden. Einflussfaktoren auf die Wirkung von Informationen sind z. B. die Netzauslastung, Netzdichte, Qualität der Informationen, der Ausstattungs- und Nutzungsgrad sowie die Befolgungsrate von Empfehlungen. Außerdem zeigen Beispiele wie Stockholm oder London, dass sich bei notorischen Staus Potenziale ergeben, den Verkehr über belastungsabhängige Straßenbenutzungsgebühren zu steuern. Dabei können Verkehrsinformationen dazu beitragen, eine räumlich und zeitlich differenzierte Gebühr transparent zu machen. Für die Wirksamkeit einer Maut spielt die Preissensitivität der Verkehrsteilnehmer eine entscheidende Rolle.

Eine zentrale Frage bei der Steuerung des Verkehrs bezieht sich darauf, ob ein Nutzer- oder Systemoptimum angestrebt werden soll. Das Nutzeroptimum entspricht der Umsetzung des ersten Wardrop'schen Prinzips und wird erreicht, wenn die Widerstände, wie Reisezeiten oder Kosten, auf allen benutzten Alternativrouten gleich sind. Nicht benutzte Wege haben einen höheren Widerstand. Wählen dagegen die Verkehrsteilnehmer ihre Route und Abfahrtszeit so, dass die Summe der individuellen Widerstände minimal ist, handelt es sich um das zweite Wardrop'sche Prinzip oder Systemoptimum [10]. Zur Umsetzung des Systemoptimums bedarf es einer zentralen Steuerung. Dabei könnten Informationsdienste die Fahrer entsprechend der Strategie leiten. Ein grundsätzliches Problem des Systemoptimums ist aber die mangelnde Akzeptanz bei den Verkehrsteilnehmern, wenn ein Informationsdienst sie zu Gunsten des Systems über einen für sie suboptimalen Weg leitet. Daher sollen in dieser Arbeit nur Lösungen nach dem Nutzeroptimum betrachtet werden.

Bisherige Arbeiten untersuchten z. B. den Einfluss der Verkehrsmeldungsqualität auf die Reisezeit unter Beachtung von Netzauslastung und Alternativrouten. Die Simulationsrechnungen zeigten, dass für Nutzer von Verkehrsinformationen bei optimaler Meldungsqualität in Räumen mit hoher Netzdichte ein Potenzial für Fahrtzeitverbesserungen von 5-15% bestand ([11], 2-3). Allerdings wurde dabei nur ein niedriger Nutzungsgrad berücksichtigt, der in etwa dem Stand zum Untersuchungszeitpunkt entsprach. Der Ausstattungsgrad von in Deutschland zugelassenen Fahrzeugen betrug z. B. im Jahr 2007 ca. 14% ([12], 24). Eine weitere Arbeit bezog dagegen verschiedene Nutzungsgrade bis zu 100% in die Untersuchung der Wirkung von On-Trip-Informationen ein. Anhand von Simulationsrechnungen in einem städtischen Netz konnte gezeigt werden, dass Reisezeitvorteile bis zu einem Nutzungsgrad von 35% erreicht werden können. Steigt der Nutzungsgrad über 50%, blieben positive Effekte durch Informationen oftmals aus. Maximal konnte die Gesamtreisezeit aller Fahrzeuge durch dynamische Navigation um bis zu 5% reduziert werden ([12], 156-160).

In dieser Arbeit geht es insbesondere darum, ein mikroskopisches Modell zu entwickeln, das neben der Routenwahl die Entscheidungen einzelner Verkehrsteilnehmer über ihre Abfahrtszeit abbildet. In Anlehnung an den ÖV kann man bei der gemeinsamen Betrachtung von Weg und Startzeit auch von einer Verbindung sprechen. Somit kann mit diesem Modell zusätzlich zu On-Trip-Informationen die Wirkung von Verkehrsdiensten vor Fahrtantritt bei spontan auftretenden Staus untersucht werden. Wenn es um die Modellierung der Verschiebung von Abfahrtszeiten geht, liegt es nahe, das Modell auch zur Untersuchung von Straßenbenutzungsgebühren bei notorischen Staus anzuwenden, weil hier ebenfalls mit zeitlichen Verlagerungen zu rechnen ist. Ferner wurde vom Institut für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe (TH) eine empirische Studie zum Verhalten von Verkehrsteilnehmern im Umgang mit dynamischen, individualisierten Informationsdiensten und einer Maut durchgeführt. Damit liegt in Deutschland erstmalig eine umfassende Datenbasis vor, die für die Modellierung der Verbindungswahl als Reaktion auf individuelle Informationen und Straßenbenutzungsgebühren verwendet werden kann. Außerdem berücksichtigt das Modell Rückkopplungen zwischen den Entscheidungen der Verkehrsteilnehmer, den Belastungen auf der Straße und der Berechnung von Verkehrszuständen durch den Informationsdienst. Im Hinblick auf das Verkehrsverhalten bei Straßenbenutzungsgebühren bildet das Modell durch eine Iteration das Lernverhalten der Autofahrer ab. Schließlich simuliert ein mikroskopisches Verkehrsflussmodell den Verlauf der einzelnen Fahrten im Straßennetz.

Mithilfe des entwickelten Modells soll in dieser Arbeit die Wirksamkeit von individualisierten, dynamischen Verkehrsinformationen vor und während der Fahrt sowie von belastungsabhängigen Preisen zur Nutzung von Kapazitätsreserven im Straßennetz untersucht werden. Dabei werden verschiedene Netzauslastungen und Nutzungsgrade von Verkehrsdiensten systematisch analysiert. Entsprechend ergeben sich daraus die beiden folgenden Fragen:

1. Wie wirken sich Pre- und On-Trip-Informationen bei spontanen Staus sowie verschiedenen Netzauslastungen und Nutzungsgraden auf den Verkehrsfluss aus?
2. Welche Verbesserungen des Verkehrsablaufs lassen sich durch differenzierte Straßenbenutzungsgebühren bei notorischen Staus erreichen?

Nachdem Kapitel 2 die Grundlagen für diese Arbeit beschreibt, folgt in Kapitel 3 die Modellierung des Verkehrsdienstes und der Routen- bzw. Verbindungswahl. Kapitel 4 beschreibt die Anwendung des Modells in einem virtuellen Raum und für die Stadt Erlangen. Ferner werden die Ergebnisse der Simulationsrechnungen vorgestellt. Die Schlussfolgerungen aus dieser Arbeit stehen in Kapitel 5.



## 2 Grundlagen

### 2.1 Berechnung der Auslastung von Straßennetzen

Der Wirkungsgrad von Verkehrsinformationen und einer Maut hängt davon ab, ob es noch freie Kapazitäten im Straßennetz gibt. Verkehrsnetze bestehen in abstrakter Darstellung aus Knoten und Kanten. Knoten stellen Punkte, Orte oder Kreuzungen dar. Die Kanten stehen für die Verbindungen oder Strecken zwischen den Knoten ([13], 226). Außerdem ist es für diese Arbeit wichtig, eine Bezugsgröße zu definieren, um die Untersuchungsfälle mit verschiedenen Belastungen, Störungen des Verkehrsablaufs und Nutzungsgraden von Informationsdiensten miteinander zu vergleichen und die Ergebnisse verallgemeinern zu können. Es wird also eine Kennzahl benötigt, die zwar die Eigenschaften des Verkehrsangebotes und der Nachfrage beschreibt, aber unabhängig von einer konkreten Netzgestaltung oder Verkehrsnachfrage ist. Deshalb bietet sich der Auslastungsgrad an, welcher nach Formel 1 die Belastung und die Kapazität ins Verhältnis setzt ([14], 45).

$$\text{Formel 1: } \text{Auslastung} = \frac{\text{Belastung}}{\text{Kapazität}}$$

In der Verkehrstechnik beschreibt der Kapazitätswert die Anzahl von Fahrzeugen, die tatsächlich während eines bestimmten, und zwar kleinen Zeitraums von einigen Minuten bis zu einer Stunde über einen Querschnitt fahren kann. Übersteigt der Zufluss an Fahrzeugen den Kapazitätswert, gibt es einen Rückstau. Die Länge des Rückstaus und die daraus resultierenden Reise- oder Wartezeiten können mithilfe von Warteschlangenmodellen berechnet werden ([15], 32). Ein Warteschlangensystem lässt sich als Input-Output-System mit einem Warteraum und einer Abfertigung beschreiben. Der Warteraum berücksichtigt den Stau, der sich auf den stromaufwärts liegenden Kanten aufbaut. Die Abfertigung stellt den Engpass dar. Die Auslastung berechnet sich dann als Verhältnis der ankommenden (Ankunftsrate) dividiert durch die abfließenden (Bedienrate) Fahrzeuge je Zeiteinheit. Die Bedienrate stellt die Kapazität der Kante dar. Die Ankunftsrate lässt sich aus den Fahrzeugen im Bedien- und Wartesystem berechnen.

Theoretisch nähert man sich der Kapazität einer Kante, indem man die minimale durchschnittliche Bruttozeitlücke zwischen den Fahrzeugen im Verkehrsfluss in einem Zeitintervall, wie z. B. einer Stunde, bestimmt. Die Bruttozeitlücke wird entweder von Bug zu Bug oder Heck zu Heck zweier hintereinander fahrender Fahrzeuge gemessen. Die Zeitlücken oder räumlichen Abstände zwischen den Fahrzeugen sind notwendig, um beim Bremsen noch rechtzeitig vor einem Aufprall zum Stehen zu kommen. Zur Berechnung der Bruttozeitlücke werden die Reaktionszeit des Fahrers, die Bremsverzögerung des Fahrzeugs, die Fahrzeuglänge sowie die aktuell gefahrene Geschwindigkeit benötigt. Wenn man einen homogenen Verkehrsfluss mit gleicher Bremsverzögerung der Fahrzeuge, eine durchschnittliche Reaktionszeit von 1,8 Sekunden, eine mittlere Pkw-Länge von 5 Metern und eine homogene Geschwindigkeit von 90 Kilometern pro Stunde [km/h] annimmt, kann man eine Bruttozeitlücke von zwei Sekunden berechnen. In Bezug auf eine Stunde ergibt sich dann eine maximale Verkehrsstärke von 1800 Fahrzeugen je Fahrstreifen.

Ferner kann man die Kapazität einer Kante über die Messung der Anzahl von Fahrzeugen bestimmen, die den Querschnitt einer Richtungsfahrbahn in einem Zeitintervall passieren. Bei der Erhebung über einen längeren Zeitraum kann man dann feststellen, welches die ma-

ximale Verkehrsstärke pro Zeitintervall ist, die am Querschnitt vorbeifahren kann. Erfasst man zusätzlich noch die Geschwindigkeit, lassen sich die Ergebnisse als Verkehrsstärke-Geschwindigkeits-Beziehung (QV-Beziehung) im Fundamentaldiagramm darstellen. Anhand von QV-Beziehungen kann man in Abhängigkeit von festgelegten Eigenschaften einer Kante die Kapazitäten für verallgemeinerte Streckentypen im Handbuch zur Bemessung von Straßen (HBS) nachlesen ([1], 3-9 – 3-17).

In der Verkehrsplanung wird der Kapazitätswert nicht so streng ausgelegt, dass sich bei seiner Überschreitung sofort ein Rückstau bildet. Aber die Reisezeit steigt ab einer bestimmten Belastung überproportional an. Dieser Zusammenhang wird mit einer Capacity-Restrain-Funktion (CR-Funktion) dargestellt, womit man in Abhängigkeit von der Belastung die Reisezeit auf einer Strecke bestimmen kann. Außerdem ist der Bezugszeitraum länger und liegt i. d. R. zwischen einer Stunde und einem Tag ([15], 32). Ferner kann in der Verkehrsplanung über Umlegungsverfahren die Nachfrage auf den Strecken im Netz berechnet werden. Wenn also die Belastung und die Kapazität einer Kante ( $k$ ) bekannt sind, kann deren Auslastung nach Formel 2 leicht bestimmt werden. Schwieriger wird aber die Interpretation der Reisezeiten bei hohen Auslastungsgraden ( $0,9 < \text{Auslastung} \leq 1$ ) und bei Überlastungen. Eine Auslastung  $> 1$  in einem Umlegungsmodell bedeutet, dass die Nachfrage größer als die Kapazität ist. Aus verkehrstechnischer Sicht kann die Auslastung aber nicht  $> 1$  werden, weil es physisch nicht möglich ist, mehr Fahrzeuge auf einer Fahrbahn unterzubringen als die Kapazitätsgrenze angibt. Daher muss im verkehrstechnischen Kontext, wie oben bereits erwähnt, der Rückstau berücksichtigt werden, um die Belastung zu berechnen. Nur dann kann eine sinnvolle Aussage über die Auslastung getroffen werden.

$$\text{Formel 2: } \text{Auslastung}_k = \frac{\text{Belastung}_k}{\text{Kapazität}_k}$$

Im Vergleich zur Bestimmung der Auslastung von Kanten ist es wesentlich schwieriger, die Auslastung eines ganzen Netzes zu bestimmen. Hierfür wurden drei verschiedene Verfahren entwickelt, die im Folgenden vorgestellt werden:

1. Über die mittlere Auslastung aller Kanten des Netzausschnitts
2. Über den Engpass je Route
3. Über die mittlere Reisezeit aller Quelle-Ziel-Beziehungen

Die ersten beiden Ansätze gehen von der Bestimmung der Auslastung einer Kante aus. Damit ist ihre Anwendung in einem verkehrsplanerischen Kontext einfacher, wenn die Belastung aufgrund einer Nachfragematrix bekannt ist. Ferner eignen sich diese eher zur Berechnung der Auslastung von Fern- oder Regionalverkehrsnetzen, weil dort maßgeblich die Kanten den Widerstand eines Weges bestimmen. Der dritte Ansatz berücksichtigt gemessene Reisezeiten für die einzelnen Routen. Damit wird der Rückstau beachtet, der sich bei hoher Belastung bilden kann und zu höheren Reisezeiten führt. Dieser Ansatz eignet sich auch für die Berechnung der Netzauslastung in Stadtnetzen, wo die Kapazitäten der Knoten eher die entscheidenden Größen für die Berechnung der Widerstände einer Route darstellen. Da somit auch ein Verfahren bereit steht, das die Widerstände an Straßenkreuzungen berücksichtigt, kann auf eine detaillierte Betrachtung der Kapazität von Knoten verzichtet werden.

### 2.1.1 Über die mittlere Auslastung aller Kanten

Eine Möglichkeit, sich der Auslastung eines Netzes anzunähern, ist die Berechnung der mittleren Auslastung über alle Kanten ( $k$ ) im Netz ( $z$ ) in einem Zeitintervall ( $h$ ). Die Kantenaus-

lastung lässt sich nach Formel 2 bestimmen. Da es sich um das Verhältnis zweier Größen handelt, muss wie in Formel 3 der harmonische Mittelwert gebildet werden.

$$\text{Formel 3: } Auslastung_{z,h} = \frac{m}{\sum_{k=1}^m \frac{1}{Auslastung_{k,h}}}$$

Dieses Verfahren hat die Schwäche, dass Verkehrsnachfrage und Angebot normalerweise nicht vollkommen gleichmäßig verteilt sind. Denn für eine Netzauslastung von 100% müssten alle Kanten zu 100% ausgelastet sein. Derartige gleichmäßige Auslastungen können aber – wenn überhaupt – nur für kleinere, selektive Netzausschnitte beobachtet werden. Ansonsten verteilt sich die Verkehrsnachfrage so, dass an einigen Stellen im Netz Engpässe entstehen, die dazu führen, dass Teile des Netzes stark und andere schwach ausgelastet sind. Damit kann ein Netz seine Kapazitätsgrenze durch die Verstopfung der Engpässe bereits erreicht haben, obwohl in anderen Bereichen noch freie Kapazitäten bestehen, die aber nicht mehr sinnvoll genutzt werden können. Somit liefert diese Berechnungsmethode im Allgemeinen keine vernünftigen Werte, weil die Auslastung tendenziell immer unterschätzt wird. Ein Problem bei der Beseitigung von Engpässen besteht darin, dass sich die Verkehrsnachfrage zwar in diskreten Schritten um jeweils eine Fahrzeugeinheit verändert, die Kapazität einer Straße aber nicht in derselben Größenordnung mitwachsen kann. Ein entscheidender Faktor für die Straßenkapazität ist die Anzahl der Fahrstreifen. Da ein Fahrstreifen eine Kapazität von etwa 1800 Fahrzeugen pro Stunde [Fz/h] erreichen kann, verändert sich die Gesamtkapazität in Abhängigkeit von der Anzahl der Fahrstreifen z. B. immer gleich in Schritten von etwa 1800 [Fz/h]. Eine feinere Justierung in Form von einzelnen Fahrzeugen kann man z. B. durch Steuerungsmaßnahmen des Verkehrs erreichen. Die Möglichkeiten sind aber begrenzt.

### 2.1.2 Über den Engpass je Route

Es gibt verschiedene Straßenkategorien mit unterschiedlichen Funktionen, wie Verbindung, Erschließung und Aufenthalt. Dementsprechend unterscheiden sich die Strecken z. B. in der Anzahl der Fahrstreifen oder der zulässigen Geschwindigkeit. Daraus resultieren verschiedene Kapazitäten einzelner Kanten im Netz. Ferner verteilt sich die Verkehrsnachfrage unterschiedlich in Raum und Zeit. Da also die Belastung nicht überall im Netz gleich verteilt ist und Kapazitäten nicht dynamisch und in denselben Schritten an die Nachfrage angepasst werden können, entstehen Engpässe, die maßgeblich für die Leistungsfähigkeit eines Netzes verantwortlich sind. Um die Netzauslastung anhand dieser Engpässe zu bestimmen, muss man zuerst für jede Route den Engpass ermitteln. Danach kann der harmonische Mittelwert über die Auslastung aller Routen gebildet werden. Als Zwischenschritt kann man ferner die Auslastung für eine Quelle-Ziel-Beziehung (QZ-Beziehung) berechnen.

Eine Route besteht aus einer Folge von Knoten und Kanten. Bei Vernachlässigung der Knoten bestimmt die Kante mit der höchsten Auslastung den Engpass der Route. Die Auslastung der Kante, die den Engpass des Weges darstellt, hängt von den folgenden Größen ab:

1. der Kapazität der Kante
2. der Belastung auf der betrachteten Route
3. der Grundlast, d. h. der Belastung auf der Engpasskante, die nicht durch die Verkehrsnachfrage auf der betrachteten Route verursacht wird

Die Grundlast entsteht aufgrund von Überlagerungen, wenn die Strecke gleichzeitig zu einem oder mehreren anderen Wegen gehört, die ebenfalls mit einer Verkehrsnachfrage belastet sind. Bei der Berechnung der Routenauslastung muss die Grundlast berücksichtigt werden, weil diese die absolute Kapazität des Engpasses verkleinert.

Um die Auslastung eines Pfades zu berechnen, muss nach Formel 4 für jede Route (r) die Kante (k) mit dem höchsten Auslastungsgrad gesucht werden. Diese stellt den Engpass des Weges dar. Bei dieser Berechnung handelt es sich aber immer nur um eine momentane Größe, die von der aktuellen Belastung abhängt und mit der Verkehrsnachfrage über die Zeit variiert. Denn die noch freie Kapazität einer Engpasskante kann genauso von konkurrierenden Wegen beansprucht werden, die ebenfalls über den betrachteten Engpass verlaufen.

$$\text{Formel 4: } \text{Auslastung}_r = \text{Max}_{k=1}^m(\text{Auslastung}_k)$$

Der Auslastungsgrad einer QZ-Beziehung (q) hängt von der Auslastung der zugehörigen Routen (r) ab. Mithilfe einer Verkehrsumlegung nach dem Mehrwegverfahren können für eine QZ-Beziehung eine oder mehrere Routen gefunden werden. Dann muss der mittlere Auslastungsgrad über den jeweiligen Engpass der einzelnen Routen und wie in Formel 5 dargestellt das harmonische Mittel bestimmt werden.

$$\text{Formel 5: } \text{Auslastung}_q = \frac{m}{\sum_{r=1}^m \frac{1}{\text{Auslastung}_r}}$$

Die Formel gilt unabhängig davon, ob alternative Pfade über gemeinsame Kanten verlaufen oder nicht. Ferner spielt es keine Rolle, ob die Alternativen einen gemeinsamen Engpass haben. Denn durch die Bildung des Mittelwertes kürzt sich die doppelte oder mehrfache Zählung wieder heraus. Die Auslastung des Netzes (z) kann schließlich mit Formel 6 als mittlere Auslastung über alle QZ-Beziehungen (q) berechnet werden. Dabei wird wie bei der Ermittlung der Auslastung von Routen der harmonische Mittelwert gebildet.

$$\text{Formel 6: } \text{Auslastung}_z = \frac{m}{\sum_{q=1}^m \frac{1}{\text{Auslastung}_q}}$$

Nach dieser Methode kann immer nur die Auslastung als momentaner Zustand berechnet werden. Für ein anderes Zeitintervall mit einer anderen Höhe und Verteilung der Nachfragemenge muss der Auslastungsgrad erneut ermittelt werden. Bei derselben Summe über alle Fahrten einer Nachfragematrix können sich somit ganz verschiedene Auslastungsgrade im Netz einstellen.

### 2.1.3 Über die mittlere Reisezeit

Ein weiterer Weg zur Berechnung der Netzauslastung ist die Betrachtung der mittleren Reisezeiten auf den Wegen oder den Quelle-Ziel-Beziehungen im Netz ([11], 98-112). Denn mit zunehmender Belastung auf einer Strecke steigt die mittlere Reisezeit an, die sich auf einer Kante, Route, QZ-Beziehung oder im gesamten Netz (z) stets nach Formel 7 berechnet. Dabei wird die Summe der Reisezeiten (t) der einzelnen Fahrten (f) im betrachteten Zeitintervall (h) gebildet und durch die Anzahl aller Fahrten dividiert.

$$\text{Formel 7: } \text{Belastung}_{z,h} = \frac{1}{g} \sum_{f=1}^g t_f$$



Außerdem kann man die Kapazität einer Route (r) in Hinblick auf die Reisezeit wie in Formel 8 folgendermaßen definieren: Wenn die Reisezeit (t) auf einer Route das x-fache der Reisezeit im unbelasteten Netz ( $t_0$ ) beträgt, erreicht die Route ihre Kapazitätsgrenze.

$$\text{Formel 8: } \text{Kapazität} = t_{0,r} * x$$

Der Faktor x legt die obere Grenze für eine Fahrtzeit fest, die ein Verkehrsteilnehmer auf der betrachteten Route gerade noch akzeptieren würde. Diese gerade noch gebilligte Fahrtzeit hängt wahrscheinlich von der Entfernung oder Reisezeit im unbelasteten Netz auf einer Route ab, wobei für kürzere Wege ein größerer Faktor gestattet werden würde als bei längeren. Dies kann mit den Zeitbudgets begründet werden, die sich nicht unendlich ausdehnen lassen. Daher wäre es sinnvoll, Entfernungsklassen zu bilden und in Abhängigkeit von der Entfernung den Faktor x zu variieren. Außerdem wird sich die gerade noch geduldete Reisezeit individuell stark unterscheiden, je nachdem mit welchem Wert eine Person die Zeit bemisst. Letztlich stellt sich die Frage nach dem mittleren Wert von Faktor x: Wie hoch ist die durchschnittlich noch akzeptierte Reisezeit auf einer Route oder QZ-Beziehung, bevor niemand mehr losfahren würde? Aus verkehrstechnischer Sicht könnte man mithilfe von QV-Diagrammen aus dem HBS argumentieren. Danach erreichen verschiedene Streckentypen in etwa nach der Halbierung der Wunschgeschwindigkeit ihre Kapazitätsgrenze ([5], z. B. 3-11 – 3-14). Folglich kann man bzgl. der Reisezeit einen Faktor  $x=2$  ableiten.

$$\text{Formel 9: } \text{Auslastung}_r = \left( \frac{\frac{1}{g} \sum_{f=1}^g t_f}{t_{0,r} * x} \right) * 100$$

Nach Formel 9 lässt sich dann die Auslastung eines Weges als mittlere Reisezeit (t) auf der Route (r) dividiert durch die gerade noch akzeptierte Zeit auf derselben Route (r) berechnen. Ferner kann man auch die Kapazität für eine QZ-Beziehung definieren. Diese soll über die Route mit der minimalen Reisezeit im unbelasteten Netz ( $t_0$ ) berechnet werden. Somit erhält man nach Formel 10 die Kapazität einer QZ-Beziehung, indem man die minimale Reisezeit im unbelasteten Netz mit dem Faktor x multipliziert.

$$\text{Formel 10: } \text{Kapazität}_q = \text{Min}_{r=1}^m(t_{0,r}) * x$$

Die Auslastung einer QZ-Beziehung berechnet sich dann nach Formel 11. Danach wird die mittlere Reisezeit (t) für eine QZ-Beziehung (q) durch die gerade noch akzeptierte Reisezeit für die QZ-Beziehung dividiert.

$$\text{Formel 11: } \text{Auslastung}_q = \left( \frac{\frac{1}{l} \sum_{f=1}^l t_f}{\text{Min}_{r=1}^m(t_{0,r}) * x} \right) * 100$$

Schließlich lässt sich nach Formel 12 über den harmonischen Mittelwert die Auslastung des Netzes (z) berechnen.

$$\text{Formel 12: } \text{Auslastung}_z = \frac{m}{\sum_{q=1}^m \frac{1}{\text{Auslastung}_q}}$$

Ein Nachteil dieser Methode besteht darin, dass die niedrigste berechenbare Auslastung immer über den Faktor  $x$  festgelegt ist. Denn die kleinste Reisezeit, die auf einer QZ-Beziehung gemessen werden kann, beträgt  $t=t_0$ . Wenn dann die Kapazitätsgrenze z. B. per Definition zweimal  $t_0$  ist, erhält man 0,5 als kleinstes mögliches Ergebnis aus dem Quotienten  $t/(2*t_0)$ . Somit liefert diese Methode bei niedrigen Belastungen keine plausiblen Ergebnisse.

## 2.2 Verkehrsinformationen

### 2.2.1 Definition

Verkehrsinformationen beziehen sich in dieser Arbeit auf den MIV. Sie können das Verhalten von Pkw-Fahrern in Bezug auf die Wahl einer Route- und Abfahrtszeit vor und während der Fahrt beeinflussen. Einerseits stellen Anbieter Informationen kollektiv, wie über den Verkehrsfunk im Radio oder Wechselwegweiser an der Strecke, zur Verfügung. Andererseits haben Verkehrsteilnehmer die Möglichkeit, individuell auf ihre Fahrtwünsche zugeschnittene Meldungen zu empfangen. Inhaltlich kann eine Information z. B. aus Abfahrtszeit, Routenführung, Störungen des Verkehrsablaufs, Reisezeit und -kosten bestehen.

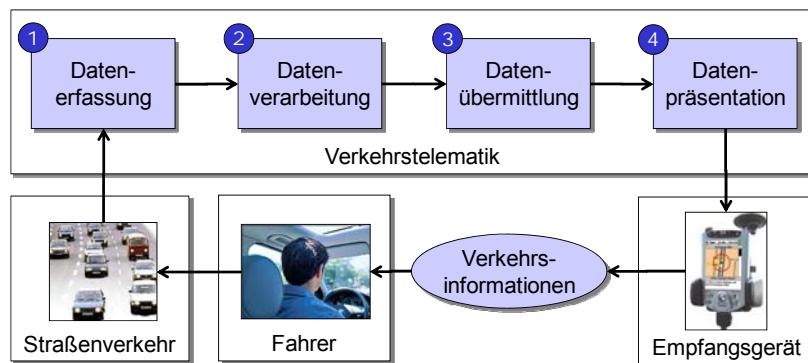


Abbildung 4: Aufgaben von Verkehrstelematik

Informationen sollen in dieser Arbeit als das Ergebnis von Verkehrstelematik betrachtet werden. Telematik setzt sich aus den Wörtern Telekommunikation und Informatik zusammen und beschreibt die Verknüpfung von Systemen der Kommunikations- und Informationstechnik mit dem Ziel, im Rahmen der Informationsverarbeitung eine Fernwirkung zu realisieren. Im Allgemeinen spricht man von Telematiksystemen, wenn Daten lokal erfasst und zur Verarbeitung, Auswertung oder Steuerung mittels digitaler Kommunikationsmedien über große Entfernungen weitergeleitet werden ([16], 469-470). Folglich gehören nach Abbildung 4 zu den Aufgaben der Verkehrstelematik die Erfassung (1), Verarbeitung (2), Übermittlung (3) und Präsentation (4) von Verkehrsdaten ([17], 355). Außerdem sollen Anbieter, die Verkehrsinformationen mithilfe von Telematiksystemen herstellen, als Verkehrsdienste bezeichnet werden. Andere Begriffe, die häufig synonym zur Verkehrstelematik im MIV verwendet werden, sind z. B. Navigations-, Zielführungs- oder Routenführungssysteme.

Aus der Sicht des einzelnen Verkehrsteilnehmers erfüllen Verkehrsinformationen den Zweck, ihn problemloser, d. h. z. B. schneller, sicherer oder kostengünstiger, ans Ziel zu bringen. Aus gesamtgesellschaftlicher Sicht kann man mit Verkehrstelematik das Ziel verfolgen, Staus auf den Straßen zu vermeiden oder zu reduzieren, um somit ein hohes Maß an Mobilität zu gewährleisten. Folglich geht es v.a. darum, Reisezeiten und -kosten zu verringern und transparenter zu machen ([18], 239).

## 2.2.2 Aufgaben der Verkehrstelematik

### 2.2.2.1 Erfassung

Die Grundlage zur Generierung von Verkehrsinformationen bilden Daten über die Verkehrslage, wie mittlere Geschwindigkeiten, Verkehrsdichten und Verkehrsstärken auf einer Strecke. Ein häufig eingesetztes Mittel zur Messung des Verkehrs sind Sensoren, wie z. B. Induktionsschleifen. Davon sind ca. 5000 auf deutschen Bundesfernstraßen installiert und permanent im Einsatz. Ferner gibt es weitere stationäre Erfassungssysteme an deutschen Autobahnen, wie ca. 4000 Infrarotsensoren der Gesellschaft für Verkehrsdaten (DDG). Außerdem hat die DDG etwa 40000 Fahrzeuge als mobile Sensoren ausgerüstet, die während der Fahrt in kurzen Zeitabständen ihre Position und Geschwindigkeit an eine Zentrale übermitteln ([19], 174). Derartige Messwerte nennt man Floating Car Data (FCD).

Neben den automatisch erfassten Daten spielen auch persönliche Eingaben über besondere Vorkommnisse, wie Baustellen, Großveranstaltungen und Unfälle, eine wichtige Rolle. Diese nicht automatisierten Meldungen stammen z. B. von der Polizei oder von Verkehrsteilnehmern, die als registrierte Staumelder von Rundfunksendern oder des ADAC per Telefon über Störungen des Verkehrsablaufs berichten ([11], 28).

### 2.2.2.2 Verarbeitung

Neben der Erhebung übernimmt die Erfassungsstation häufig auch eine erste Verarbeitung der Daten in Form einer Konsolidierung und Aggregation ([17], 358). Danach sendet sie die Daten an eine Zentrale, welche z. B. die folgenden Aufgaben übernimmt ([17], 355):

1. Rekonstruktion des zeitlich-räumlichen Verkehrszustands,
2. Prognose von Verkehrszuständen,
3. Störungserkennung und -verfolgung,
4. Erzeugung von Verkehrslageberichten,
5. Ableitung von Steuerbefehlen für Wechselverkehrszeichen,
6. Routingempfehlungen für Navigationssysteme.

Für die Rekonstruktion des zeitlich-räumlichen Verkehrszustands gibt es verschiedene Verfahren, wie z. B. die Messwertpropagierung, die Umlegungsanpassung oder simulationsbasierte Ansätze ([20], 33-40). Ein Verfahren zur Berechnung der Verkehrslage durch eine Messwertpropagierung wurde z. B. durch Vortisch [15] entwickelt und für die Verkehrsmanagementzentrale in Berlin implementiert. Der Ansatz gliedert sich in ein statisches Umlegungsverfahren zur Abschätzung der aktuellen Routen anhand historischer Nachfragematrizen. Diese werden anhand von saisonalen und wöchentlichen Eigenheiten sowie besonderer Ereignisse klassifiziert und entsprechend der aktuellen Situation ausgewählt. Im zweiten Schritt werden die an Querschnitten aktuell gemessenen Verkehrsstärken anhand der vorgeschalteten Routenschätzung durch das Netz propagiert ([15], 51).

Verfahren mit Umlegungsanpassung gleichen das Ergebnis einer Verkehrsumlegung über einen iterativen Optimierungsprozess an aktuelle Messwerte an. Dazu werden entweder Streckenwiderstände oder die Nachfrage einzelner Relationen variiert ([20], 38-39). Der Ansatz der Umlegungsanpassung wurde z. B. im Path Flow Estimator [21] implementiert. Außerdem findet ein simulationsbasiertes Verfahren z. B. im Projekt „Ruhrpilot“ seine Anwendung. Dort werden Verkehrszustände für das Autobahnnetz in Nordrhein-Westfalen berech-

net, indem der Verkehrszustand parallel zur Realität simuliert und ständig mit aktuellen Messwerten abgeglichen wird ([20], 40).

Verkehrsprognosen lassen sich in Abhängigkeit von ihrem Zeithorizont in lang-, mittel- und kurzfristig unterscheiden. Während Langfristprognosen sich auf einen Zeitraum von einigen Monaten bis zu Jahrzehnten beziehen und eher im planerischen Kontext angewendet werden, gehen Mittelfristprognosen von einigen Stunden bis zu einigen Monaten aus ([22], 3). Im Zentrum dieser Arbeit stehen Kurzfristprognosen mit einem Zeithorizont von wenigen Minuten bis einigen Stunden. Neben aktuellen Messwerten des Verkehrsablaufs bilden auch Vergangenheitsdaten eine Grundlage für Prognosen, wie Quelle-Ziel-Matrizen je Zeiteinheit oder Belastungsganglinien auf Strecken.

### *2.2.2.3 Übermittlung*

Bei der Übertragung der Verkehrsinformationen an den Nutzer kommen verschiedene Techniken zum Einsatz. Dabei spielen gesprochene Meldungen über den analogen UKW-Hörfunk immer noch eine beherrschende Rolle ([17], 357). Weiterhin gibt es den Radio Data System (RDS) - Traffic Message Chanel (TMC), der Verkehrsmeldungen über den Rundfunk an entsprechend ausgestattete Geräte überträgt. Aufgrund der geringen Bandbreite werden die Meldungen kodiert übertragen und vom Empfangsgerät im Fahrzeug, wie einem Radio oder Navigationsgerät, wieder dekodiert, aufbereitet und präsentiert.

Neben den von öffentlich-rechtlichen Sendeanstalten übermittelten Meldungen über RDS-TMC gibt es seit 2005 den Dienst TMCpro des privaten Anbieters T-Systems Traffic. Dieser gebührenpflichtige Dienst nutzt neben den Meldungsbestand der öffentlichen Quellen exklusive Daten aus einem eigenen, automatisierten Sensornetz der Tochtergesellschaft DDG zur Verkehrslageerfassung ([23], 218).

In Konkurrenz zum Rundfunk bieten Mobilfunkunternehmen, wie z. B. T-Mobile oder Vodafone, kostenpflichtige Verkehrsinformationen über das Global System for Mobile Communication (GSM) oder Universal Mobile Telecommunication System (UMTS) an ([17], 358). Ferner stellen Anbieter, wie Verkehrsmanagementzentralen, Rundfunkanstalten oder der ADAC, Verkehrsinformationen über das Internet zur Verfügung, welche allerdings eher vor Fahrtantritt genutzt werden können.

### *2.2.2.4 Präsentation*

Zur Präsentation von Verkehrsinformationen gibt es einerseits Anzeigetafeln im Straßenraum, die sich kollektiv an alle Autofahrer wenden. Andererseits können Verkehrsteilnehmer über tragbare oder fest im Pkw eingebaute Geräte individuelle Informationen empfangen. Eine weitere Möglichkeit bietet das Internet, wozu ein Computer mit Netzzugang benötigt wird.

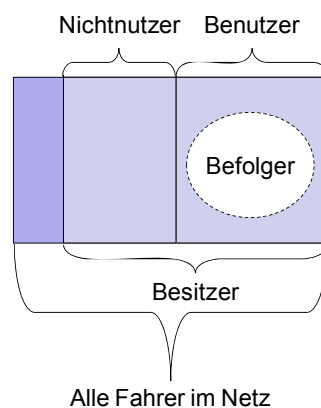
Wie bereits bei der Datenübermittlung erwähnt wurde, spielen z. Zt. die gesprochenen Informationen über das Radio eine dominante Rolle. Die Redaktionen selektieren zwar die für das Empfangsgebiet des Senders relevanten Informationen. Trotzdem muss der Fahrer aber aus den vorgelesenen Nachrichten noch die Meldung heraushören, die seine Route betrifft. Eine bessere Auswahlmöglichkeit bietet RDS-TMC. Über eine Kodierung des Ortes, die der Information anhaftet, kann die betroffene Region herausgefiltert werden, in der sich das Empfangsgerät befindet. Radios, die TMC-Meldungen verarbeiten können, stellen die Informationen grafisch dar. Dynamische Navigationssysteme können die über RDS-TMC gemeldeten

Störungen in die Routenberechnung einbeziehen. Sie arbeiten i. d. R. mit einer visuellen und akustischen Ausgabe ([17], 359).

### 2.2.3 Nutzerverhalten

Verkehrsinformationen können nur dann den Verkehrsablauf steuern und einen positiven Beitrag zur Reduzierung von Staus und Reisezeiten leisten, wenn Fahrer ihr Verhalten entsprechend der Empfehlungen anpassen. Dabei wird vorausgesetzt, dass ein Reisender in der Lage ist, einen Verkehrsdienst zu empfangen und diesen auch nutzt. Denn nur der Besitz eines Zielführungssystems sagt noch nichts darüber aus, ob und bei welcher Fahrt eine Person tatsächlich Verkehrsinformationen verwendet.

Die Akzeptanz, die für die Anschaffung von Navigationsgeräten sowie für die Nutzung und Befolgung von Verkehrsinformationen notwendig ist, ergibt sich aus der Bewertung des Nutzens ([24], 72-75). Abgesehen von den beiden Funktionen zur Orientierung und zur Abschätzung der Reisezeit wird eine Person einen Verkehrsdienst v. a. dann verwenden, wenn ein Problem im Verkehrsablauf auf der geplanten Route besteht oder erwartet wird, wofür der Dienst eine Lösung empfehlen soll. Ansonsten braucht sie keine Informationen, auch wenn der Zugang gegeben ist. In dem Zusammenhang stellt sich die Frage, für welche Wege eine Nutzung sinnvoll ist. Denn teilweise bestehen gerade auf kurzen Strecken keine vernünftigen Alternativen, um die Route anzupassen.



**Abbildung 5: Definition von Nutzungs- und Befolgungsgrad**

Die drei Kenngrößen Ausrüstungs-, Nutzungs- und Befolgungsgrad können das Verhalten im Umgang mit Verkehrstelematik beschreiben. Abbildung 5 und die folgenden Formeln zeigen, aus welchen Mengen sich die einzelnen Begriffe jeweils zusammensetzen.

**Formel 13:** 
$$\text{Ausrüstungsgrad} = \frac{\text{Besitzer}}{\text{Fahrer}}$$

Nach Formel 13 lässt sich der Ausrüstungsgrad als Anzahl der Besitzer von fest im Fahrzeug eingebauten oder mobilen, empfangsbereiten Navigationsgeräten durch alle Fahrer im Netz bestimmen. Folglich spiegelt dieser die Verbreitung von Telematiksystemen in Pkw wieder.

**Formel 14:** 
$$\text{Nutzungsgrad} = \frac{\text{Nutzer}}{\text{Besitzer}}$$

Der Ausrüstungsgrad ist entscheidend für hohe Nutzungsraten individueller, dynamischer Dienste. Der Nutzungsgrad ist nach Formel 14 das Verhältnis der Anzahl der Benutzer durch die Anzahl der Besitzer.

**Formel 15:** 
$$\text{Befolgungsgrad} = \frac{\text{Befolger}}{\text{Nutzer}}$$

Nach Formel 15 stellen die Anzahl der Befolger geteilt durch die Anzahl der Benutzer den Befolgungsgrad dar. Er hängt davon ab, ob sich die Benutzer an die Empfehlungen des Verkehrsdienstes halten oder nicht. Folglich ist der Befolgungsgrad ein Maß für die Akzeptanz der Verkehrsteilnehmer für die Meldungen der Verkehrsdienste.

## **2.3 Straßenbenutzungsgebühren**

### **2.3.1 Definition**

Das in dieser Arbeit betrachtete Preissystem für die Nutzung von Straßen bezieht sich auf ein Entgelt, das unmittelbar für eine oder mehrere Fahrten zu entrichten ist ([25], 1). Somit handelt es sich um Straßenbenutzungsgebühren oder eine Maut. Der Begriff Maut ist ein aus dem Gotischen abgeleitetes Wort für die Abgabe eines Wegezolls [26]. Deshalb sollen andere im MIV auftretende Kosten, wie Kraftfahrzeugsteuern, Mineralölsteuern oder Parkgebühren nicht unter Straßenbenutzungsgebühren fallen. Aus der internationalen Literatur wurde der Begriff Road Pricing in Deutschland übernommen, der sich in einer engeren Definition lediglich auf fahrtbezogene Preiserhebungen bezieht und eine pauschale Maut, wie z. B. in Form einer Vignette ausschließt ([27], 34).

### **2.3.2 Klassifizierung von Mautsystemen**

Bei der Umsetzung eines Mautsystems müssen verschiedene Aspekte beachtet werden, die mithilfe eines morphologischen Kastens in Tabelle 1 geordnet werden können. Da diese Arbeit auf Straßenbenutzungsgebühren als Instrument zur Steuerung der Verkehrsnachfrage im Zusammenhang mit Verkehrstelematik fokussiert, beschränkt sich die Auflistung der Systemmerkmale auf organisatorische und technische Bereiche.

Grundsätzlich lassen sich mit einer Maut verschiedene Ziele (1) verfolgen ([28], 24-39), die unter den folgenden drei Kategorien zusammengefasst werden können:

1. Finanzierung von Verkehrsinfrastruktur,
2. Internalisierung externer Kosten und
3. Steuerung der Verkehrsnachfrage.

Bei der Finanzierung geht es um die Einnahme von Geld zur Deckung von Investitionen und laufenden Kosten. Um eine hohe Akzeptanz für ein Mautsystem zu erreichen, sollten die Erlöse als Investitionen in das Verkehrssystem zurückfließen. Folglich zahlen die Nutzer dann für den Bau, Erhalt und Betrieb der Infrastruktur. Außerdem können mit einer Gebühr externe Kosten internalisiert werden, wie Umwelt- oder Staukosten. In diesem Zusammenhang steht auch das dritte Ziel, bei dem es um die Steuerung der Verkehrsnachfrage geht, um den Verkehrsablauf zu verbessern.

Ein weiteres Merkmal für ein Mautsystem ist nach Tabelle 1 die Differenzierung des Preises nach verschiedenen Fahrzeugtypen (2). Einerseits kann man z. B. zwischen Anwohnern und Fremden unterscheiden, um den Durchgangsverkehr fernzuhalten. Andererseits kann man den Preis in Abhängigkeit von der Fahrzeuggröße, d. h. dem Platzverbrauch oder von Emissionen variieren. Wenn man die Maut hinsichtlich der Tageszeit (3) differenziert, besteht z. B. die Möglichkeit, die Spitzenstunde teurer zu machen als den Rest des Tages [29]. Bei der City-Maut in London bezahlen z. B. alle Verkehrsteilnehmer den ganzen Tag, d. h. zwischen 7:00 und 18:00 Uhr, denselben Preis [30] während es in Stockholm zwischen 6:30 bis 18:30 Uhr eine Staffelung von 10, 15 und 20 Schwedischen Kronen in Abhängigkeit von der Tageszeit gibt [31].

Bei der räumlichen Ausdehnung (4) unterscheidet man zwischen einer Gebühr, die sich wie in London auf nur eine Zone oder in Hong Kong [32] auf mehrere Zonen bezieht. Die Festlegung von nur einer Zone kann gut für starke Zentren, wie London oder Stockholm, funktionieren. Bei dezentralen Strukturen besteht aber die Gefahr, dass bei Insellösungen wirtschaftspolitische Aspekte das eigentliche Ziel der Lenkung des Verkehrs zu stark überlagern und die Akzeptanz für das Mautsystem verringern. Um räumliche Abgrenzungsprobleme zu umgehen, kann die Maut auch kontinuierlich festgelegt werden. In manchen Fällen bietet sich auch an, nur einzelne Elemente des Netzes, wie z. B. Tunnel, Brücken oder Engpässe, punktuell mit einem Preis zu versehen.

Merkmale	Ausprägungen			
	Finanzierung der Infrastruktur	Internalisierung externer Kosten	Steuerung der Nachfrage	
Ziel (1)				
Fahrzeugtyp (2)	Differenziert		Undifferenziert	
Tageszeit (3)	Differenziert		Undifferenziert	
Raum (4)	Eine Zone	Mehrere Zonen	Kontinuierlich	Punktuell
Straßentyp (5)	Autobahn	Bundesstraße	Landesstraßen	Kommunale Straßen
Fahrspur (6)	Partiell		Alle	
Abrechnung (7)	Pro Einfahrt	Mehrere Einfahrten	Km-abhängig	
Anpassung der Preise (8)	Kurzfristig (< 1 Jahr)		Langfristig (> 1 Jahr)	
Fahrzeugidentifikation (9)	Im oder am Fahrzeug		Außerhalb des Fahrzeugs	
Kontrolle (10)	Persönlich		Elektronisch	
Bezahlung (11)	Aktiv		Passiv	

**Tabelle 1: Morphologischer Kasten zur Klassifizierung von Mautsystemen**

Ferner besteht die Möglichkeit nach Straßentypen zu unterscheiden (5). In Ländern wie Frankreich, Italien, Österreich und der Schweiz gibt es z. B. eine allgemeine Autobahnmaut. Denkbar wäre aber auch ein differenziertes System, welches zusätzlich das untergeordnete Straßennetz einbezieht. Dies hätte den Vorteil, dass auf kleinräumlicher Ebene präziser gesteuert werden kann, um unerwünschte Ausweichverkehre zu verhindern. In Deutschland kann man z. B. nach dem Baulastträger zwischen Autobahnen und Bundesstraßen, für die der Bund zuständig ist, Landesstraßen sowie kommunalen Straßen unterscheiden. Außerdem kann man bei einer mehrspurigen Straße auf kleinster räumlicher Ebene auch nur bestimmte Fahrspuren mit einer Gebühr belegen (6).

In Bezug auf die Abrechnung (7) gilt z. B. in London, dass man mehrmals am Tag in die kostenpflichtige Zone ein- und ausfahren darf, ohne bei jeder Einfahrt erneut bezahlen zu müssen. Im Gegensatz dazu muss man z. B. auf der Schnellstraße „91 Express Lane“ in Kalifornien jede Einfahrt extra bezahlen [33]. Da die Verkehrsnachfrage auf die Gebühr reagieren und sich über die Zeit ändern kann, müssen auch die Preise dementsprechend angepasst werden (8). Dies kann entweder in kurzen oder langen Zeitschritten geschehen. Wichtig da-

bei ist nur, dass die Verkehrsteilnehmer rechtzeitig informiert werden und sich mit ihrem Verhalten darauf einstellen können.

Damit das Mautsystem funktioniert, müssen die Fahrzeuge identifiziert werden (9), die gebührenpflichtige Strecken benutzen. Dies kann z. B. wie in der Schweiz über eine Vignette [34] geschehen. Technisch aufwändigere Möglichkeiten bieten die Installation von elektronischen Geräten im Fahrzeug, die ein Signal an einen Empfänger senden. Außerdem gibt es Mautkonzepte, bei denen der Fahrer keine zusätzlichen Gegenstände am oder im Fahrzeug anbringen muss, wie z. B. bei der City-Maut in London. Dort erfassen Kameras die Nummernschilder der einfahrenden Fahrzeuge. Bei der deutschen Lkw-Maut befinden sich sowohl elektronische Geräte in den mautpflichtigen Fahrzeugen, mit denen sie sich bei den Kontrollbrücken über der Fahrbahn identifizieren lassen. Andererseits werden Fahrzeuge mit ihrem Kennzeichen erfasst, falls die Kontrollbrücke sie als mautpflichtig erkennt, aber nicht über ein Signal aus dem Fahrzeug identifizieren kann. Die Fahrzeugidentifikation entfällt, wenn es, wie auf den Autobahnen in Frankreich, Mautstationen gibt, wo Kontrolle und Bezahlung in einem Schritt erfolgen. Persönliche Kontrollen (10) gibt es auch bei der deutschen Lkw-Maut, die das Bundesamt für Güterverkehr (BAG) auf der Straße durchführt. Häufig gibt es aber auch nur elektronische Kontrollen, wie z. B. in London oder Singapur, wo Daten über das mautpflichtige Fahrzeug erfasst werden, und eine Software überprüft, ob für die Benutzung gezahlt wurde.

Die Bezahlung (11) kann man aus der Sicht des Fahrers in einen aktiven oder passiven Vorgang unterscheiden. Bei einer aktiven Bezahlung ist unmittelbar vor oder nach der Benutzung ein Betrag zu entrichten. Dabei werden Fahrzeuge entweder an Mautstationen gestoppt, wo sie bei Personen oder an Automaten bezahlen müssen. In Singapur ist eine Smartcard im Fahrzeug installiert, von der, wie bei einer Kreditkarte, ein Betrag während des Passierens einer Eingangsschranke abgebucht wird. Bei passiven Systemen hat der Verkehrsteilnehmer im Voraus entweder ein Konto eingerichtet, von dem abgebucht wird oder, wie bei der Vignettenlösung, eine Zufahrtsberechtigung für einen Zeitraum erworben.

### **2.3.3 Wirkung des Preises auf die Verkehrsnachfrage**

Wie schon bei den Verkehrsinformationen hängt auch die Wirksamkeit von Straßenbenutzungsgebühren zur Lenkung der Verkehrsteilnehmer maßgeblich vom menschlichen Verhalten ab. Anhand der mikroökonomischen Theorie lässt sich zeigen, welche Effekte der Preis auf die Verkehrsnachfrage ausübt. Im Allgemeinen beziehen sich die Nachfrage und das Angebot immer auf ein bestimmtes Gut als Mittel zur Bedürfnisbefriedigung. Im Verkehr handelt es sich dabei um den Transport von Personen oder Gütern ([25], 11). Reisen zum Selbstzweck, wie Spaziergänge oder Stadtrundfahrten, sollen hier vernachlässigt werden. Außerdem bezieht sich die weitere Betrachtung nur noch auf Fahrten einzelner Personen im MIV.

Ein wichtiges Merkmal eines Gutes ist sein Preis, der sich in einer Marktwirtschaft aus dem Zusammenspiel von Angebot und Nachfrage bildet. Die Nachfragefunktion stellt die Beziehung zwischen der verkauften Menge ( $x$ ) eines Gutes und der Höhe seines Preises ( $p$ ) dar. Damit drückt sie die Zahlungsbereitschaft der Pkw-Fahrer aus, wie viel sie im Durchschnitt bereit wären, für eine Fahrt zu zahlen.

Ein Maß für die Sensitivität, wie stark die Nachfrage auf eine Preisänderung reagiert, ist die Preiselastizität der Nachfrage  $\eta_{x,p}$ . Nach Formel 16 beschreibt sie die Veränderung der Nachfragemenge in Abhängigkeit von der Variation des Preises. Normale Güter zeichnen sich



durch eine negative Preiselastizität aus, d. h. der Absatz sinkt, wenn der Preis steigt und umgekehrt. Bei der Interpretation wird häufig das negative Vorzeichen vernachlässigt und nur der absolute Betrag herangezogen. Ist dieser größer als eins, spricht man von einer elastischen Nachfrage. Hierbei bewirkt eine 1-prozentige Preisänderung eine mehr als 1-prozentige Mengenänderung. Für den Verkehr konnte eine Preiselastizität von ungefähr -0,2 bis -0,4 gemessen werden ([25], 15). Sie ist daher eher unelastisch.

$$\text{Formel 16: } \eta_{x,p} = \frac{\frac{\partial x}{\partial p}}{\frac{x}{p}} = \frac{\partial x}{\partial p} * \frac{p}{x}$$

Im Zusammenhang mit der Analyse von Angebot und Nachfrage ist es üblich, die inverse Nachfragefunktion darzustellen, die sich mathematisch nach Formel 17 ausdrücken lässt. Aus der negativen Preiselastizität für Transportdienstleistungen folgt ein monoton fallender Funktionsverlauf. In der grafischen Darstellung verläuft die Kurve umso steiler bzw. flacher, je unelastischer bzw. elastischer die Nachfrage ist.

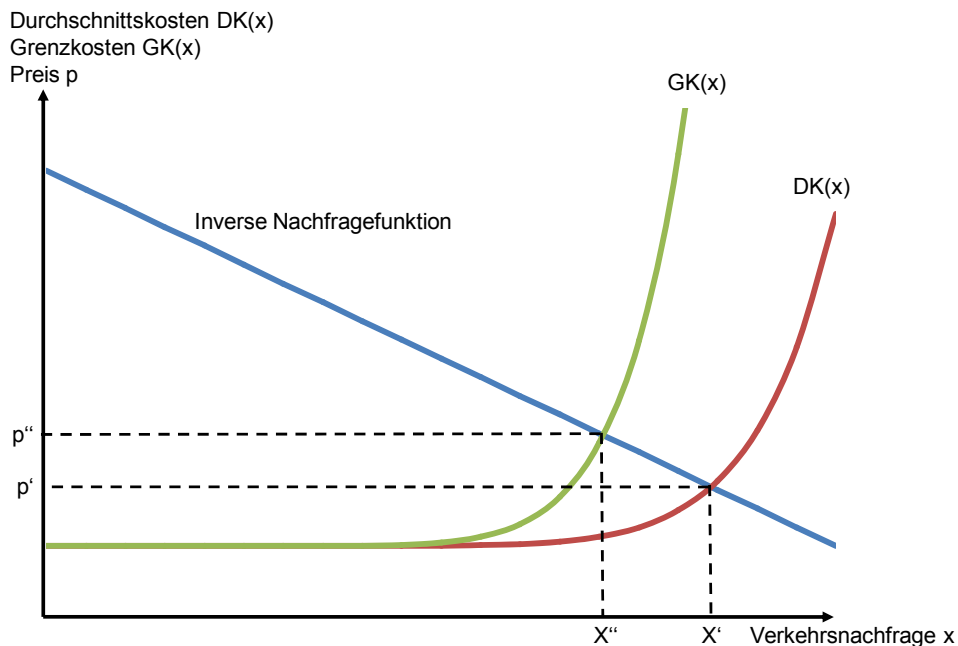
$$\text{Formel 17: } p = d(x)$$

Als zweite Komponente der Preisbildung enthält die Angebotsfunktion den Zusammenhang zwischen der Produktionsmenge und dem Preis. Für die Analyse des Verkehrs stellt die Infrastruktur das Angebot dar, welches sich im MIV auf das Straßennetz bezieht. Die Straßeninfrastruktur ist durch ihre Kapazität beschränkt. Folglich rivalisieren die Fahrer um ein knappes Gut unter Einsatz ihrer ebenfalls knappen Zeit. Dies wird insbesondere dann sichtbar, wenn es zu Staus kommt. Während die Nachfragefunktion die Zahlungsbereitschaft der Konsumenten beschreibt, gibt die Angebotsfunktion den Preis wider, der für ein Gut verlangt wird. Dabei kann es sich in Bezug auf die Straßeninfrastruktur z. B. um eine Maut handeln. Je nachdem, welches Ziel mit der Straßenbenutzungsgebühr verfolgt wird, gibt es verschiedene Ansätze, die Höhe des Preises zu bestimmen. Wird eine Gebühr zum Zweck der Finanzierung erhoben, sollte sie sich nach den Investitions- und Betriebskosten richten. Falls es darum geht, Wirkungen auf die Umwelt zu beachten, sollte der Preis die externen Effekte internalisieren.

Ein Ansatz, der sich speziell mit der Zeitkostenproblematik beschäftigt, geht auf Pigou [35] zurück. Durch die Bemessung einer Maut an den Zeitkosten kann z. B. das Ziel verfolgt werden, die Nachfrage zu steuern, um Staus zu reduzieren. Die Zeitkosten lassen sich als Produkt aus Reisezeit und Zeitkostensatz (ZKS) berechnen. Der ZKS entspricht dem Wert, den eine Person bereit wäre, für eine Reisezeitverkürzung je Zeiteinheit zu zahlen. Je nach Fahrtkontext und individueller Bedürfnisstruktur, die z. B. von der finanziellen Situation und verfügbaren Freizeit abhängt, kann sich der ZKS intra- und interpersonell unterscheiden. Für die Analyse wird ein mittlerer ZKS für alle Verkehrsteilnehmer angenommen. Zur Berechnung der Reisezeit (t) in Abhängigkeit von der Verkehrsnachfragemenge (q) mit der Einheit [Fz/h] dienen CR-Funktionen. Eine übliche Form für eine CR-Funktion steht in Formel 18. Während a, b und c Parameter zur Kalibrierung darstellen, entspricht t<sub>0</sub> der durchschnittlichen Reisezeit im unbelasteten Netz. Bei q<sub>max</sub> handelt es sich um die Kapazitätsgrenze der Strecke mit der Einheit [Fz/h].

$$\text{Formel 18: } t = t_0 * \left( 1 + a * \left( \frac{q}{q_{\max} * c} \right)^b \right)$$

Der Kurvenverlauf der CR-Funktion lässt sich in zwei Bereiche unterteilen. Bis zum Erreichen der praktischen Leistungsfähigkeit steigt die Reisezeit langsam mit zunehmender Belastung an. Nach Überschreiten des Wertes geht der Verkehrsfluss vom stabilen in den instabilen Zustand über. Als Folge sinkt die durchschnittliche Geschwindigkeit, und die mittlere Reisezeit steigt im weiteren Funktionsverlauf mit zunehmender Belastung plötzlich steil an. Die praktische Leistungsfähigkeit einer Strecke liegt in etwa bei 85 bis 95% der Kapazitätsgrenze ([36], 276).



**Abbildung 6: Bestimmung des Preises anhand der Grenzkosten nach Pigou**

Die mittleren Zeitkosten je Fahrer auf einer Strecke sind anhand der Kurve der Durchschnittskosten (DK) in Abbildung 6 dargestellt. Bei niedriger Verkehrsnachfrage ist der Kurvenverlauf flach. Es entstehen keine oder nur vernachlässigbar geringe zusätzliche Zeitkosten mit jedem weiteren Fahrer, weil genügend Raum vorhanden ist und die Verkehrsteilnehmer sich nicht gegenseitig behindern. Im Gegensatz dazu steigen die DK mit jedem weiteren Fahrer auf der Straße überproportional an, wenn die Belastung hoch ist. Da die DK von allen Verkehrsteilnehmern getragen werden, handelt es sich dabei um interne oder private Kosten. Während der einzelne Fahrer, der zusätzlich auf die Strecke fährt, stets nur die DK wahrnimmt, beeinflusst er mit seinem Verhalten immer auch die Reisezeit der anderen, die bereits auf der Straße unterwegs sind. Wie groß dieser externe Effekt ausfällt, lässt sich durch eine Grenzkostenbetrachtung ermitteln. Als Grenzkosten (GK) werden im Allgemeinen die zusätzlichen Kosten für eine weitere Produktionseinheit bezeichnet ([37], 26). Somit geben die GK die Zeitkosten an, die ein zusätzlicher Verkehrsteilnehmer für sich selbst und für alle anderen Nachfrager verursacht, die gleichzeitig die Straße nutzen. Folglich entspricht der Abstand zwischen der DK- und GK-Kurve der Höhe der zusätzlichen Kosten, die durch einen weiteren Verkehrsteilnehmer entstehen, aber nicht von ihm gedeckt werden. Infolgedessen spricht man auch von externen oder sozialen Kosten ([27], 39).

$$\text{Formel 19: } TK = DK(x) * x$$

Formal lassen sich die GK als erste Ableitung der totalen Kosten berechnen. In der vorliegenden Betrachtung erhält man die totalen Kosten durch die Addition der individuellen Kos-

ten aller Verkehrsteilnehmer, was nach Formel 19 gleichbedeutend mit dem Produkt aus DK und der Anzahl der Fahrten ist. Die Berechnung der GK steht in Formel 20.

$$\text{Formel 20: } GK = TK' = \frac{\partial TK}{\partial x}$$

Bei einer niedrigen Verkehrsnachfrage entspricht der Kurvenverlauf der GK in Abbildung 6 dem der DK, weil es kaum zur gegenseitigen Beeinträchtigung durch die Fahrzeuge auf der Strecke kommt. Folglich beschränken sich die zusätzlichen Kosten allein auf die Kosten, die für den zusätzlichen Fahrer selbst entstehen. Bei einer höheren Belastung steigen die GK aber stärker als die DK, weil ein dazu kommendes Fahrzeug nicht nur Kosten für sich selbst, sondern auch für die übrigen Fahrzeuge erzeugt, die unterwegs sind. Die GK sind also höher als die DK. Außerdem wird die Differenz umso größer, je kritischer ein zusätzliches Fahrzeug für den Verkehrsablauf ist, d. h. je weiter sich die Nachfrage der Kapazitätsgrenze nähert.

Um festzustellen, welche Belastung sich bei welchem Preis einstellen wird, muss ein Gleichgewichtszustand zwischen Zahlungsbereitschaft und Höhe des Preises gefunden werden. Verkehrsteilnehmer unternehmen genau dann eine Fahrt, wenn die damit verbundenen Kosten den Nutzen nicht übersteigen. Die Zahlungsbereitschaft drückt also den Nutzen einer Fahrt aus, während die relevanten Kosten den DK entsprechen, die in der vorliegenden Betrachtung nur die Zeitkosten beinhalten. Folglich stellt sich nach Formel 21 an Stelle  $x'$  in Abbildung 6 ein Gleichgewichtszustand ein, wo sich die Nachfrage- und Durchschnittskostenkurve schneiden. In diesem Punkt ist der Preis  $p'$ , den die Verkehrsteilnehmer zu bezahlen bereit sind, genauso hoch wie die Kosten, die eine Fahrt verursacht ([25], 22-27).

$$\text{Formel 21: } d(x) = DK(x)$$

Der Lösungsvorschlag von Pigou besteht aus einer Steuer, die jeden Fahrer mit den externen Kosten konfrontiert, die sein Verhalten für die anderen verursacht. Daher muss die Höhe der Steuer der Differenz zwischen den sozialen GK und den privaten DK entsprechen. Jeder einzelne Fahrer muss jetzt in seiner eigenen Kosten-Nutzen-Betrachtung den für ihn entstehenden Nutzen, d. h. seine Zahlungsbereitschaft, mit den privaten DK plus die Steuer vergleichen ([38], 107). Als Ergebnis stellt sich in Abbildung 6 ein neuer Gleichgewichtszustand an der Stelle  $x''$  ein. Anhand der grafischen Darstellung kann man auch die Höhe der Pigou-Steuer ablesen, indem man die Differenz aus  $p''$  und  $p'$  bildet.

### 2.3.4 Akzeptanz

Ein wichtiges Thema bei der Einführung von Straßenbenutzungsgebühren ist die Akzeptanz durch die Verkehrsteilnehmer und die damit zusammenhängende politische Durchsetzbarkeit ([25], 2). Zwei wichtige Voraussetzungen für die Akzeptanz durch den Nutzer sind Transparenz und Fairness. Die Transparenz kann sich einerseits auf die Verwendung der Einnahmen beziehen, wobei die Akzeptanz steigt, wenn die Gebühr zur Finanzierung oder für den laufenden Erhalt und Betrieb in die Verkehrsinfrastruktur zurückfließt ([39], 121-123). Andererseits darf insbesondere ein räumlich und zeitlich differenziertes Mautsystem nicht beliebig komplex werden und damit die kognitive Kapazität der Verkehrsteilnehmer übersteigen. Daher sind die Preistransparenz und eine einfache Bedienung sehr wichtig für die Akzeptanz von Straßenbenutzungsgebühren. In diesem Zusammenhang kann Verkehrstelematik einen positiven Beitrag leisten. Fairness kann v. a. dann erreicht werden, wenn die Maut verursachergerecht erhoben wird, wobei allerdings die soziale Gerechtigkeit weitere Fragen aufwirft.

Einen Überblick zur Akzeptanz von Straßenbenutzungsgebühren geben z. B. Schade und Schlag [40], [41].

## 2.4 Modellbildung für den Personenverkehr

Ein Modell ist die „symbolische Repräsentation der Wirklichkeit unter Angabe von Bestandteilen und Zusammenhängen“ ([42],15). In der Verkehrsplanung verfolgen Modelle das Ziel, den Verkehr abzubilden, was sich im Ergebnis als Belastung der Infrastruktur darstellen lässt. Dabei reicht es aber nicht aus, den Ist-Zustand zu berechnen, sondern es geht v. a. darum, Verkehr in der Zukunft zu prognostizieren. Außerdem sollte das Modell verdeutlichen, welche Stellgrößen die Entwicklung beeinflussen ([43], 9). In der Verkehrstechnik bilden die Modelle insbesondere Fahrzeugbewegungen ab. Sie dienen z. B. der Untersuchung von Engpässen im Streckenverlauf oder Einstellungen von Lichtsignalanlagen an Knoten ([44], 82-92). Da es in dieser Arbeit um die Modellierung von Entscheidungen zur Abfahrzeit und Routenwahl geht, die in den Bereich der Verkehrsplanung fallen, sollen an dieser Stelle verkehrstechnische Modelle nicht weiter erläutert werden. Nur Kapitel 2.6.2 geht kurz auf Grundlagen eines verkehrstechnischen Modells ein, das in dieser Arbeit zur Verkehrsflusssimulation verwendet wird.

### 2.4.1 Verkehrsverhalten

Für die Erstellung von Verkehrsmodellen in der Verkehrsplanung müssen die Ursachen für Verkehr erforscht werden. Deshalb stehen Menschen mit ihrem Verhalten im Mittelpunkt der Betrachtung, weil sie für die Ortsveränderungen verantwortlich sind. Folglich geht es bei der Erstellung von Verkehrsmodellen darum, Erkenntnisse über Sachverhalte und Wirkungszusammenhänge zu gewinnen, die beim Verkehrsteilnehmer zu einer beobachteten Ausprägung des Verhaltens führen.

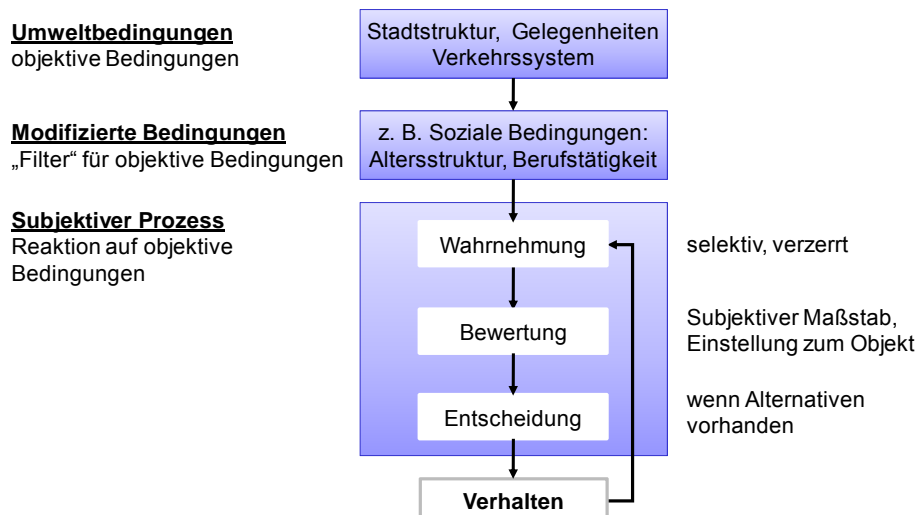


Abbildung 7: Entstehung von Verhalten

Verhalten kann nach Abbildung 7 als Ergebnis eines subjektiven Prozesses aus Wahrnehmung, Bewertung und Entscheidung aufgefasst werden. Subjektivität bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Wahrnehmung eines Menschen immer selektiv und verzerrt ist. Ferner beeinflussen individuelle Maßstäbe und Einstellungen zum jeweiligen Gegenstand die Bewertung, und eine Entscheidung bezieht sich immer nur auf die von einer Person wahrgenommenen Alternativen. Schließlich prägt das aus diesem Prozess resultierende Verhalten die individuelle Erfahrung, die wiederum die Wahrnehmung beeinflusst. Es handelt sich also

um einen komplexen, rückgekoppelten, individuellen Vorgang. Dabei gibt es zwar auch objektive Umweltbedingungen, aber zwischen der Umwelt und dem Verhalten einer Person steht immer ein subjektiver Filter.

Eine große Herausforderung bei der Erforschung des Verkehrsverhaltens besteht darin, die Prozesse mit ihrer Struktur und ihren Wirkmechanismen empirisch zu erheben. Meistens ist man nur in der Lage, das Endprodukt als resultierendes Verhalten zu messen. Zusammenhänge zwischen Ursache und Wirkung bleiben dabei verborgen. Des Weiteren kann man häufig aufgrund finanzieller Einschränkungen immer nur einen Ausschnitt des gesamten Verhaltens erfassen, weil nur kleine Stichproben der Grundgesamtheit empirisch untersucht werden können. Damit verbunden sind die allgemeinen Stichprobenprobleme wie zufällige und systematische Fehler. Zufallsfehler entstehen z. B. durch besondere Ereignisse am Erhebungstag, die nicht vorausgesehen werden konnten. Zu systematischen Fehlern gehören z. B. das Non-Response-Verhalten oder wiederkehrende Fehler beim Ausfüllen des Fragebogens. Letztlich geht es bei der Bewertung der Qualität von empirischen Daten maßgeblich um die Frage, wie repräsentativ die Ergebnisse einer Studie sind ([43], 23-26).

## 2.4.2 Konstruktion von Verkehrsmodellen

Die Erstellung von Modellen besteht aus einem iterativen Prozess zwischen Modellentwicklung und Modellanwendung. Am Anfang steht ein inhaltliches Konzept (1), das mögliche Strukturen, Wirkungszusammenhänge und Einflussgrößen auf das Verkehrsverhalten darstellt. Allerdings kann sich die Beschreibung des Forschungsgegenstandes im Laufe der Bearbeitung aufgrund zunehmender Erkenntnis ändern. Zunächst ergeben sich daraus aber die Anforderungen an die Daten (2). Schwierigkeiten bei empirischen Studien zum Verkehrsverhalten wurden bereits im vorangehenden Kapitel angesprochen.

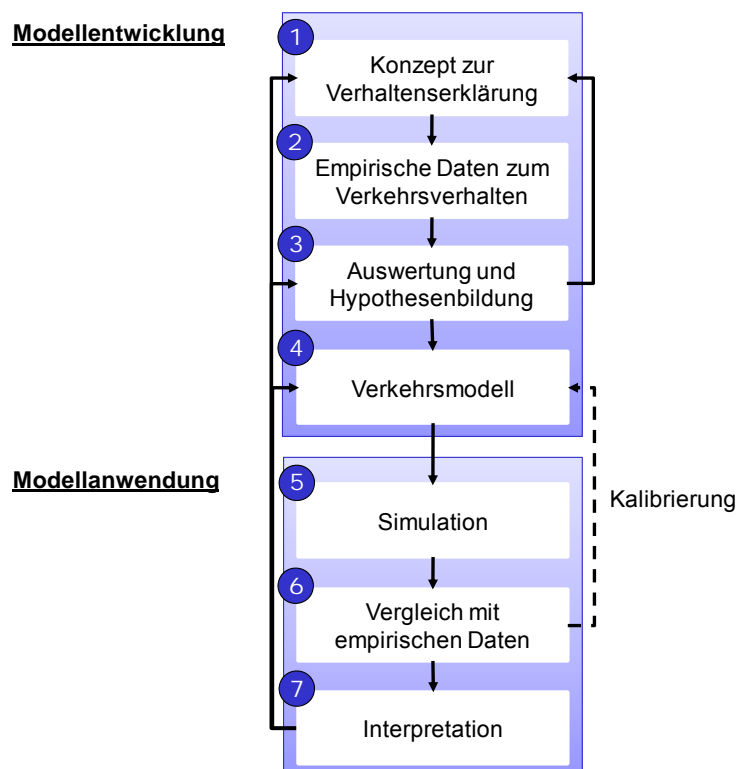


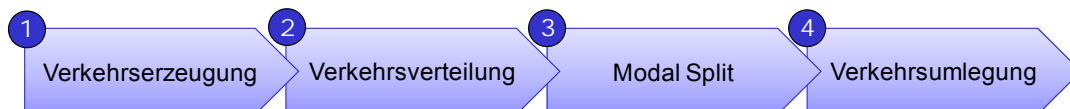
Abbildung 8: Entwicklung und Anwendung eines Verkehrsmodells

Während der Datenauswertung (3) geht es darum, Hypothesen zu formulieren. Dabei begrenzt maßgeblich die Datenqualität die analytischen Möglichkeiten. Anhand der Auswer-

tungsergebnisse kann es dann bereits nach dem dritten Schritt zu einer ersten Iteration kommen, um das Konzept anzupassen. Das Verkehrsmodell (4) fasst die aufgestellten Hypothesen in einem Algorithmus zusammen. Es ist somit eine formalisierte Repräsentation der komplexen Zusammenhänge in der realen Welt. Nach der Anwendung des Modells in einer Simulation (5) stehen Daten bereit, die mit Kenngrößen des Verkehrs verglichen (6) werden müssen. Abweichungen zwischen den Simulationsergebnissen und den Vergleichsdaten können zu Anpassungen von Einflussgrößen im Modell führen. Bei der Kalibrierung muss man aber stets zwischen der Logik des Modells und der Gültigkeit der Vergleichswerte abwägen, weil letztlich auch die Eckdaten die realen Verkehrsverhältnisse niemals vollkommen abbilden können. Während der Kalibrierung oder nach der Interpretation der Ergebnisse (7) können sich Verbesserungen des Modells z. B. auf die Modifikation von Parametern, die Überarbeitung der Variablen oder auf grundlegende Änderungen des Modellkonzepts beziehen. Folglich können die Anpassungen sowohl das Verkehrsmodell (4) als auch die Hypothesenbildung (3) und das zugrunde liegende Konzept (1) betreffen und weitere Iterationen des Prozesses notwendig machen ([43], 32-36).

### 2.4.3 Das klassische Verkehrsmodell

Das klassische Verkehrsmodell stammt aus den 60er Jahren. Es besteht nach Abbildung 9 aus vier Stufen. Vor der Anwendung müssen noch der Raum und die zu betrachtenden Verkehrsnetze modelliert werden. Dazu wird das Untersuchungsgebiet in Verkehrszellen eingeteilt, die als Quelle oder Ziel einer Ortsveränderung dienen. Außerdem werden die Zonen über Strukturdaten beschrieben. Dazu gehören Angaben zur Bevölkerung, wie Altersstruktur, Haushaltsgrößenverteilung und Berufstätigkeit. Ferner müssen Daten zu den Gelegenheiten, wie Arbeits- und Ausbildungsplätze sowie Einkaufs- und Freizeitmöglichkeiten, gesammelt werden. Für das Verkehrsnetz werden Widerstände je Verkehrsmittel benötigt, die meistens über Reisezeiten und Kosten angegeben werden.



**Abbildung 9: Vier-Stufen-Modell**

Auf der ersten Stufe des klassischen Verkehrsmodells geht es um die Verkehrserzeugung (1). Dahinter verbirgt sich die Frage, wie viele Ortsveränderungen in einer Verkehrszelle starten und enden. Als Ergebnis erhält man also das Quell- und Zielverkehrsaufkommen der Zonen. Danach folgt die Verkehrsverteilung (2), die klären muss, wie viele Fahrten zwischen zwei Verkehrszellen stattfinden. In der Verbindung mit dem ersten Schritt ergibt sich eine Quelle-Ziel-Matrix aller Fahrten. Beim Modal Split (3) geht es um das Verkehrsmittel, womit eine Person seine Ortsveränderung vornimmt. Folglich liegen Fahrtenmatrizen je Verkehrsmittel vor. Die Verkehrsumlegung (4) berechnet im letzten Schritt die Belastung im Streckennetz ([45], 22-24).

Die Stufenstruktur hat in den letzten Jahrzehnten viel Kritik hervorgerufen, weil es nicht angemessen ist, den Menschen einen schrittweisen Entscheidungsprozess zu unterstellen. Diese künstliche Struktur hat aber den Vorteil, von dem komplexen Gesamtprozess einer individuellen Verkehrsentscheidung nur Teilaspekte zu betrachten. Somit bestehen bessere Möglichkeiten zur Kontrolle der Modellrechnungen. Außerdem können Fehler, die aufgrund der Komplexität entstehen, eher identifiziert werden ([43], 71).

Die Vorgehensweise des klassischen Verkehrsmodells besteht darin, bereits nach der ersten Stufe die Fahrten zu aggregieren. Daher kann man im weiteren Verlauf immer nur Strombündel zwischen einer Quelle und einem Ziel betrachten, die ggf. nach verhaltenshomogenen Personengruppen zusammengefasst sind. Folglich erhält man für die Verkehrskennzahlen nur Mittelwerte für jede Gruppe. In diesem Zusammenhang spricht man auch von makroskopischen Modellen oder Aggregatdatenmodellen.

Mikroskopische Modelle oder Individualverhaltensmodelle rücken den einzelnen Menschen in den Mittelpunkt der Betrachtung. Sie bilden Personen mit ihrem Verhalten ab, das durch Maßnahmen beeinflussbar ist. Wie beim klassischen Modell gliedert sich die mikroskopische Vorgehensweise in die Schritte Verkehrsentstehung, Zielwahl, Verkehrsmittelwahl und Routenwahl im Rahmen der Verkehrsumlegung. Auch mikroskopische Modelle sind zwar nicht in der Lage, das exakte Verhalten von Verkehrsteilnehmern abzubilden. Aber sie bieten den Vorteil, dass auf jeder Modellstufe die Konsistenz und Plausibilität des Verhaltens geprüft und beurteilt werden kann. Denn über die verschiedenen Modellierungsschritte geht die Information, welche Eigenschaften und welches Verkehrsverhalten eine Person hat, nicht mehr durch die Aggregation verloren ([46], 70).

#### 2.4.4 Verkehrsumlegungsverfahren

Da der Schwerpunkt dieser Arbeit auf der Wahl einer Route und Abfahrtszeit liegt, soll die vierte Stufe des klassischen Verkehrsmodells genauer betrachtet werden. Sie besteht für den MIV aus einer Routensuche und Wegewahl. Bei einer dynamischen Betrachtung muss die Abfahrtszeit mit einbezogen werden. Eine Eingangsgröße ist das Verkehrsangebot als Streckennetz. Die Verkehrsnachfrage wird durch Fahrtenmatrizen für Quelle-Ziel-Beziehungen definiert. Ergebnisse sind z. B. Belastungen einzelner Strecken und Routen sowie dazugehörige Reisezeiten.

Bezeichnung	Betrachtungszeitraum	Zeitachse	Systemzustand
Statische Umlegung mit wiederkehrendem Systemzustand (within-day static)	Ein Tag oder Teil eines Tages (z. B. Spitzenstunde)	Nein	Wiederholt sich regelmäßig
Dynamische Umlegung mit wiederkehrendem Systemzustand (within-day dynamic)	Ein Tag, Teil eines Tages oder mehrere Tage	Ja	Wiederholt sich regelmäßig
Dynamische Umlegung mit veränderlichem Systemzustand (day-to-day dynamic)	Mehrere Tage	Ja	Verändert sich im Laufe der Zeit
Spontanumlegung	Teil eines Tages	Ja	Verändert sich im Laufe der Zeit

**Tabelle 2: Klassifizierung von Umlegungsverfahren**

Tabelle 2 klassifiziert Umlegungsverfahren in Abhängigkeit des betrachteten Zeitraums, des Vorhandenseins einer Zeitachse und des Systemzustands. Falls keine Zeitachse existiert, handelt es sich um ein statisches Umlegungsverfahren („within-day static“). Folglich bezieht sich der Betrachtungszeitraum immer nur auf ein Intervall, wie z. B. einen Tag oder die Spitzenstunde. Das Verkehrsangebot und die Verkehrsnachfrage sind konstant, wodurch sich als Ergebnis der Systemzustand im betrachteten Zeitraum nicht verändert und regelmäßig

wiederholt. Das Ziel einer statischen Umlegung ist es, den im langfristigen Mittel zu erwartenden Netzzustand zu berechnen. Somit eignet sich diese Methode für die Bewertung von langfristig geplanten Infrastrukturmaßnahmen ([47], 128).

Statische Umlegungsmodelle kommen an ihre Grenzen, wenn es darum geht, Nachfragespitzen, temporäre Kapazitätsreduzierungen, zeitweise Überlastungen von Netzelementen sowie die Entstehung und Auflösung von Staus abzubilden ([48], 367). Um den zeitlichen Verlauf einer Fahrt im Netz darzustellen, beinhalten dynamische Verfahren neben der Routensuche und Wegewahl zusätzlich ein Bewegungsmodell. Somit kann man den betrachteten Zeitraum in mehrere Intervalle unterteilen und ein zeitlich variables Verkehrsangebot und eine veränderte Verkehrsnachfrage modellieren. Das Ergebnis sind dann zeitabhängige Belastungen und Fahrtzeiten.

Bei einem dynamischen Umlegungsverfahren mit sich wiederholenden Systemzuständen („within-day dynamic traffic assignment“, WDDTA) wählen Verkehrsteilnehmer ihre Route und den Abfahrtszeitpunkt unter regelmäßig wiederkehrenden, gleichen Bedingungen. Dieses Verfahren können Verkehrsplaner zur Bewertung von Infrastrukturmaßnahmen einsetzen. Im Gegensatz zu statischen Verfahren können Verkehrssituationen differenziert nach Tageszeiten analysiert werden. Zur Abbildung von Lernverhalten eignet sich die dynamische Verkehrsumlegung mit sich veränderndem Systemzustand („day-to-day dynamic traffic assignment“, DDDTA). Hierbei wird von einem dynamischen Prozess ausgegangen, in dem sich Verkehrsangebot und Verkehrsnachfrage verändern und sich gegenseitig beeinflussen.

Die Spontanumlegung dient zur Berechnung von Netzbelastungen, die sich aufgrund einer plötzlich variierenden Nachfrage oder neuer Netzkapazitäten einstellen. Bei einer Berücksichtigung von Annahmen über die Verfügbarkeit von Informationen und zu Befolgungsgraden eignet sich das Verfahren insbesondere zur Bewertung von Steuerungsmaßnahmen durch dynamische Verkehrsbeeinflussungsanlagen oder Verkehrsleitzentralen ([47], 129). Ferner können dynamische Umlegungsverfahren für Zustandsberechnungen und Prognosen in Verkehrsinformationsdiensten verwendet werden.

## **2.4.5 Modellierung von Entscheidungen**

Das klassische Verkehrsmodell konfrontiert Verkehrsteilnehmer auf der zweiten bis vierten Stufe mit Situationen, in denen sie sich für einen Zielort, ein Verkehrsmittel und eine Route entscheiden müssen. Es gibt mehrere Methoden, um Entscheidungsverhalten zu modellieren. So können z. B. Algorithmen für Optimierungsverfahren, wie neuronale Netze, genetische Algorithmen oder Heuristiken zur Entscheidungsfindung dienen. Fraglich ist nur, ob diese das menschliche Verhalten näherungsweise abbilden. Im Verkehrswesen werden häufig regelbasierte oder diskrete Wahlmodelle angewendet, die in einem Gesamtmodell auch miteinander verknüpft werden können.

### *2.4.5.1 Regelbasierte Modelle*

Regelbasierte Modelle bestehen aus „Wenn-dann-Anweisungen“ ([18], 206-211). So kann sich die Entscheidungsfindung entlang eines Pfades über mehrere Verzweigungen entwickeln bis schließlich ein Ergebnis gefunden wird. Als Vorgehensweise zur Erstellung eines regelbasierten Modells werden anhand von empirischen Daten „Wenn-dann-Anweisungen“ abgeleitet, welche den Entscheidungsprozess für eine Person oder Gruppe beschreiben.

Regelbasierte Modelle können sowohl deterministisch als auch stochastisch sein. Determi-



nistisch bedeutet, dass der Algorithmus stets klar definierte und reproduzierbare Ergebnisse liefert. Für stochastische Modelle muss für jede Alternative eine Wahrscheinlichkeit hergeleitet werden, dass sich eine Person oder Gruppe für die entsprechende Alternative entscheidet. Die Wahrscheinlichkeit kann sich z. B. über eine Verteilung aus den empirischen Daten für einen bestimmten Einflussfaktor ergeben. Ein Vorteil der regelbasierten Modellierung besteht darin, dass die Wahlfreiheit besser berücksichtigt werden kann, indem über deterministische Regeln sehr unwahrscheinliche Ergebnisse ausgeschlossen werden. Ein Nachteil kann darin bestehen, dass komplexe Entscheidungsbäume die Unübersichtlichkeit des Modells erhöhen und die Fehlersuche bei nicht plausiblen Ergebnissen erschweren.

#### 2.4.5.2 Diskrete Wahlmodelle

Diskrete Wahlmodelle stammen aus der Ökonometrie und gehen davon aus, dass jeder Entscheider seinen individuellen Nutzen maximieren will. Damit verbunden ist die Annahme des Homo oeconomicus als rational handelnden Menschen mit stabilen Vorlieben, der perfekt über alle Alternativen informiert ist. Folglich entscheidet sich jede Person für die Variante, die ihr den höchsten Nutzen verspricht.

Für die Anwendung des Modells muss zuerst der Nutzen (U) jeder Alternative (i) berechnet werden. Die Nutzenfunktion (U<sub>i</sub>) enthält nach Formel 22 erklärende, messbare Variablen (x) mit Gewichtungsfaktoren (λ) sowie einen stochastischen Fehlerterm (ε<sub>i</sub>), der die unbekannt, nicht messbaren Erklärungsvariablen abbildet oder fehlerhaft erfasste Einflussgrößen ausgleichen soll. Die Konstante (λ<sub>0</sub>) drückt schließlich eine gleichbleibende Vorliebe oder Abneigung für die jeweilige Alternative aus.

$$\text{Formel 22: } U_i = \lambda_0 + \sum_{j=1}^n (\lambda_{ij} * x_{ij}) + \varepsilon_i$$

Der verdeckte Nutzenanteil (ε<sub>i</sub>) weist eine Wahrscheinlichkeitsverteilung mit dem Erwartungswert von Null auf. Nimmt man z. B. eine Normalverteilung an, handelt es sich um ein Probit-Modell. Dieses besitzt jedoch den Nachteil, dass das Integral einer Normalverteilung keine geschlossene Form hat. Deshalb kann es nur näherungsweise bestimmt werden. Einen Ausweg bietet das Logit-Modell, das für alle Fehlerterme (ε<sub>i</sub>) annimmt, dass sie unabhängig von einander sind und einer Gumbel-Verteilung folgen. Die Gumbel-Verteilung ist der Normalverteilung sehr ähnlich, bietet aber den Vorteil, dass das Integral eine geschlossene Form hat und deshalb berechnet werden kann. Üblicherweise werden die Parameter der Nutzenfunktion über statistische Verfahren anhand von empirischen Daten geschätzt.

$$\text{Formel 23: } p_i = \frac{e^{U_i}}{\sum_{j=1}^n (e^{U_j})} \quad (\text{für alle } j=1, \dots, i, \dots, n)$$

Formel 22 stellt ein multinomiales Logit-Modell dar, das in dieser Arbeit zur Abbildung der Entscheidungen verwendet wird. Mithilfe des berechneten Nutzens kann somit die Auswahlwahrscheinlichkeit für eine Alternative berechnet werden. Ein Überblick über diskrete Wahlmodelle steht z. B. bei Ben-Akiva und Lerman [49] sowie Train [50].

$$\text{Formel 24: } p_i = \frac{e^{U_i} * E_i}{\sum_{j=1}^n (e^{U_j} * E_j)} \quad (\text{für alle } j=1, \dots, i, \dots, n)$$

Eine wichtige Annahme für die Anwendung des Logit-Modells ist, dass die Alternativen voneinander unabhängig sind. Dies ist bei der Routenwahl nicht der Fall, wenn es bei den konkurrierenden Routen Teilstücke gibt, die sich überlappen. Eine Erweiterung, welche das Problem von sich überlappenden Wegen bei der Auswahl berücksichtigt, ist das C-Logit-Modell nach Cascetta in Formel 24, das die Eigenständigkeit einer Route (i) durch einen so genannten „commonality factor“ (E) berücksichtigt ([48], 205-207).

## 2.5 Empirische Daten zum Umgang mit Verkehrsinformationen und Verhalten bei Straßenbenutzungsgebühren

Die in dieser Arbeit verwendeten Daten stammen aus einer empirischen Erhebung im Jahr 2004, die im Rahmen des Projektes OVID vom Institut für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe (TH) durchgeführt wurde [51]. Das Akronym OVID steht für „Stärkung der Selbst-Organisationsfähigkeit im Verkehr durch Informations- und kommunikationsgestützte Dienste“. Kern des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projektes war die Entwicklung einer Simulationsplattform zur Untersuchung der Wirkung von Informationen auf das Verkehrssystem [52].

### 2.5.1 Erhebungskonzept

Das Ziel der Erhebung war, Reaktionen von Verkehrsteilnehmern auf Meldungen qualitativ hochwertiger Informationssysteme mit und ohne Straßenbenutzungsgebühren zu untersuchen. Das analysierte Verhalten, das für diese Arbeit wichtig ist, betrifft nach Abbildung 10 die Wahl der Route und des Abfahrtszeitpunktes. Die gesammelten Daten dienen zur Parameterschätzung für ein Logit-Modell, das die Entscheidungen der Personen vor der Fahrt abbilden soll und in Kapitel 3.2.2 näher erläutert wird.

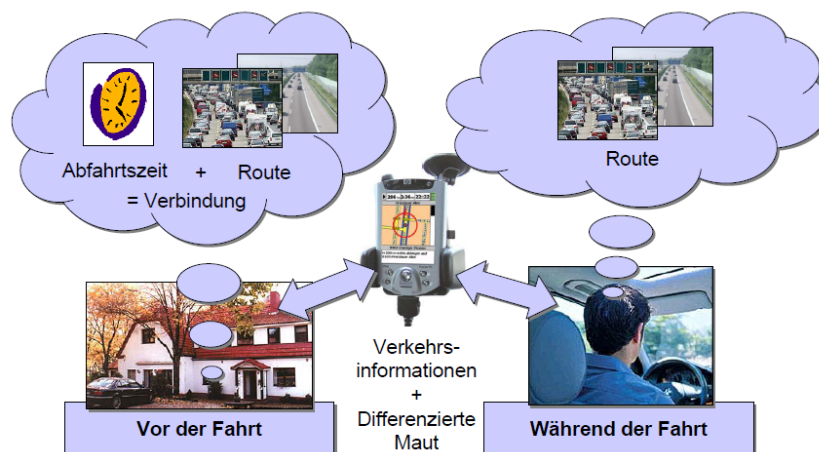


Abbildung 10: Entscheidungssituation des Verkehrsteilnehmers

Obwohl die Wachstumsraten für den Absatz von Navigationsgeräten, insbesondere in den letzten Jahren, stark gestiegen sind, war die Marktdurchdringung zum Zeitpunkt der Studie im Jahr 2004 noch relativ gering. Aus diesem Grund war zu erwarten, dass für eine Befragung kaum auf Kenntnisse der Verkehrsteilnehmer im Umgang mit individuellen, dynamischen Verkehrsdiensten zurückgegriffen werden konnte. Ferner gibt es in Deutschland keine Erfahrungen mit einer allgemeinen Pkw-Maut. Immer, wenn es um Erhebungen zu Sachverhalten geht, über welche die Probanden nicht anhand eigener Erlebnisse berichten können, stellen Stated-Preferences-Verfahren (SP-Verfahren) eine angemessene Methode dar. Der SP-Ansatz soll die Frage beantworten: "Was würden Sie tun, wenn ...?". Dazu werden dem

Befragten vorab definierte Entscheidungssituationen angeboten, die von ihm verlangen, seine Haltungen und Reaktionen auszudrücken.

Ein Erhebungsverfahren ist jedoch nur so gut, wie es imstande ist, reales Verhalten abzubilden. Jede Person befindet sich in ihrer eigenen sozialen und kulturellen Umgebung mit ihren persönlichkeitspezifischen Werten und Normen. Um dieses individuelle Umfeld besser abbilden zu können, sollte bei jedem SP-Verfahren eine Befragung nach dem Revealed-Preference-Verfahren (RP-Verfahren) vorangestellt werden. Dabei handelt es sich um die Erhebung von offengelegten Präferenzen anhand von Handlungen aus der Vergangenheit, d. h. Verhalten, welches der Proband tatsächlich durchgeführt hat ([53], 274).

Die vorliegende Studie bestand aus einem kurzen telefonischen Interview und einer etwa einstündigen Befragung im Computerlabor. Um an der Erhebung teilzunehmen, musste man einen Führerschein besitzen und selbst ab und zu mit dem Pkw Fahrten mit einer Entfernung über 30 Kilometer durchführen. Im Labor wurden zuerst in einer Mischung aus RP- und SP-Verfahren Daten zur Soziodemographie, Erfahrung mit technischen Informationsmedien, Ortskenntnis sowie zur eigenen Einschätzung des Zeitkostensatzes erhoben. Da die Eingangsbefragung als „Computer Aided Personal Interview“ (CAPI) durchgeführt wurde, konnten Angaben zum persönlichen Kontext, wie Fahrtzweck und Zeitkostenwert, als Eingangsgrößen für die nachfolgende computerbasierte Simulation von Fahrten übernommen werden. Am Schluss hatte der Proband die Möglichkeit, die gesamte Erhebung und insbesondere die virtuellen Reisen zu evaluieren.

## **2.5.2 Durchführung simulierter Fahrten am Computer**

Um in dieser Studie valide Ergebnisse zu erhalten, muss ein Proband sich die Reisesituation so gut wie möglich vorstellen können, in der er individuelle, dynamische Verkehrsdienste nutzen würde. Daher ist es das Ziel der simulierten Fahrten, den Teilnehmer mithilfe eines animierten Fragebogens am Computer die Möglichkeit zu geben, sich besser in den beschriebenen Reisekontext hineinversetzen zu können. Durch die Interaktion mit dem Programm ist es möglich, individuelle Rahmenbedingungen, wie den Fahrtzweck „Arbeit“ für Berufstätige, in die Befragungssituation zu übernehmen. Außerdem simuliert die Software drei Reisen von Karlsruhe nach Mannheim und zurück, um einen Bezug zu einem realen Raum zu schaffen, den man sich vorstellen kann.

Abbildung 11 zeigt eine Beispielsituation während eines simulierten Weges. Auf der linken Seite des Bildschirms (1) ist ein Ereignis während der Fahrt beschrieben, wo sich der Proband gerade zwischen Karlsruhe-Durlach und Bruchsal befindet. Der Kasten in der rechten, oberen Ecke (2) beschreibt den Fahrtkontext. Es handelt sich um die erste Reise. Der Proband fährt gerade von Karlsruhe nach Mannheim, um jemanden zu besuchen. Termindruck besteht nicht. Anhand der Statusanzeige (3) kann der Proband sein aktuelles Geldbudget ablesen sowie Angaben zur Abfahrts- und Reisezeit.

Jede Reise konfrontiert die Testperson vor und während der Fahrt mit Situationen, in denen sie Entscheidungen hinsichtlich der Nutzung von Informationen, des Verkehrsmittels, der Abfahrtszeit und der Route treffen muss. In Abhängigkeit von der Wahl folgt das nächste Ereignis. Wenn sich z. B. jemand entschlossen hat, einen Informationsdienst zu nutzen, kommt als nächstes die entsprechende Meldung. Damit der Nutzungsgrad von individualisierten Informationen nicht automatisch bei 100% liegt, wurde als Hürde ein Preis eingebaut, der für den Bezug individueller Informationen bezahlt werden muss und den Anschaffungspreis des Empfangsgerätes widerspiegeln soll. Somit beeinflusst jede Entscheidung das virtuelle

Geldbudget, womit der Teilnehmer seine Ausgaben für Benzin, Bahnfahrkarte, Verkehrsinformationen und ggf. Straßenbenutzungsgebühren begleichen kann.



**Abbildung 11: Beispiel für eine Situationsbeschreibung im Simulationsspiel**

Nach jeder Fahrt werden Reisezeit, Unpünktlichkeit und Geldausgaben miteinander verrechnet und als Ergebnis auf einem Konto gespeichert. Der Punktestand soll den Probanden während der Erhebung dazu veranlassen, wie in der Realität zu handeln, indem er Geld und Zeit in seine Entscheidungen einbezieht. Das Ziel des Simulationsspiels aus Sicht des Probanden besteht also darin, einen möglichst hohen Kontostand am Ende der Erhebung zu erreichen. Um dies zu schaffen, muss er die Abzüge von dem vorgegebenen Geldbudget minimieren, indem er nach kurzer Reisezeit ohne hohe Geldausgaben pünktlich am Zielort eintrifft.

Merkmale	Szenario I	Szenario II	Szenario III
Angebot an Verkehrsdiensten	Radioverkehrsfunk Internet am PC Onboard-Navigation	Radioverkehrsfunk PTA Standard Service PTA Premium Service	Radioverkehrsfunk PTA Standard Service PTA Premium Service
Aussagequalität für individuelle Informationen	80%	90%	95%
Pkw-Maut	nein	nein	Ja

**Tabelle 3: Merkmale der Szenarien**

Die simulierten Fahrten unterscheiden sich je Szenario nach Tabelle 3 bezüglich der Informationsdienste und Straßenbenutzungsgebühren. Das Szenario I soll mit der Beschaffung von Informationen über den Verkehrsfunk im Radio, das Internet am PC und fest eingebauten Navigationsgeräten im Fahrzeug der Situation im Jahr 2004 entsprechen. Daher ist hier die Aussagequalität der Informationsdienste am niedrigsten, und es gibt keine allgemeine

Maut für Pkw. Die Aussagequalität bezieht sich auf die Richtigkeit von Stauinformationen, prognostizierte Reisezeiten und Umleitungsempfehlungen der individuellen Verkehrsdienste. Man kann sie als Produkt aus Genauigkeit und Eintreffenswahrscheinlichkeit der Meldungen ausdrücken. Die zufällige Veränderung der Meldungsqualität soll verdeutlichen, dass die Verkehrsdienste sich auch irren können und man ihnen nicht blind vertrauen kann. Für das Jahr 2004 wurde eine Wahrscheinlichkeit von 80% angenommen, dass die Informationen der individuellen Dienste richtig sind. Ferner steigt der Preis, den man für eine Abfrage von Informationen zu entrichten hat, mit der Aussagequalität des Dienstes in der Reihenfolge Radio, Internet, Onboard-Navigation, wobei Informationen über das Radio kostenlos sind.

Szenario II und III beziehen sich auf die Zukunft. Dafür wird angenommen, dass jeder Verkehrsteilnehmer die Möglichkeit hat, sich durch mobil einsetzbare „Personal Travel Assistants“ (PTA) individuell und dynamisch zu informieren. Gegenüber der Onboard-Navigation hat das mobil einsetzbare Gerät den Vorteil, dass es sowohl vor als auch während der Fahrt komfortabel einsetzbar ist. Außerdem beziehen sich die Informationen neben einer Routen- und Abfahrtszeitempfehlung mit voraussichtlichen Fahrtkosten und prognostizierter Reisezeit auch auf Angaben zu einer alternativen Reise mit der Bahn. In der Befragung kann sich der Proband zwischen einem Standard- und einem etwas teureren Premium-Dienst entscheiden. Der Unterschied zwischen den Angeboten besteht darin, dass der schnellere Premium-Dienst seine Kunden automatisch bei Verschlechterungen der Verkehrslage informiert, während der Kunde beim Standard-Dienst immer selbst aktiv werden muss. Außerdem wird davon ausgegangen, dass es auch in der Zukunft noch Verkehrsfunk im Radio geben wird. Im Gegensatz zu Szenario II gibt es im dritten Untersuchungsfall eine belastungsabhängige Maut für Pkw. Da angenommen wird, dass dieses Szenario am weitesten in der Zukunft liegt ist hier durch technischen Fortschritt die Aussagequalität der Informationsdienste am höchsten. [54]

## 2.5.3 Stichprobe

### 2.5.3.1 Schichtung

Die Erhebung bezieht sich auf die Einwohner von Karlsruhe. Es konnten alle erwachsenen Personen teilnehmen, die einen Führerschein besitzen und als Fahrer mit dem Pkw Reisen über 30 Kilometer durchführen. Zusätzlich wurde die Stichprobe nach den folgenden drei Typen geschichtet, um Autofahrer mit verschiedenem Verkehrsverhalten in unterschiedliche Gruppen einzuteilen:

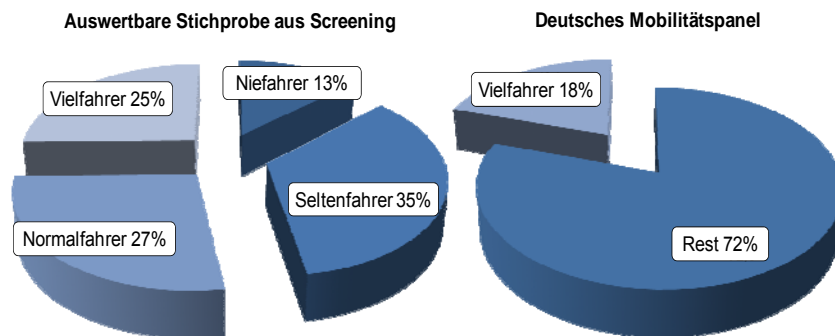
1. *Vielfahrer* mit mehr als einer Fahrt über 30 Kilometer je Woche,
2. *Normalfahrer* mit höchstens einer Fahrt über 30 Kilometer je Woche oder mindestens zwei Fahrten pro Monat,
3. *Seltenfahrer* mit höchstens einer Fahrt über 30 Kilometer im Monat oder seltener.

Durch die Schichtung entspricht die Stichprobe eher der Zusammensetzung von Verkehrsteilnehmern, die man an einem Straßenquerschnitt antrifft. Denn Verkehrserhebungen, wie das Deutsche Mobilitätspanel (MOP) [55] zeigen, dass vor allem wenige Hochmobile den Großteil der Verkehrsleistung ausmachen. Daher soll der größte Teil der Stichprobe aus Vielfahrern bestehen. Auf der anderen Seite darf der Anteil an Normal- und Seltenfahrern nicht zu klein werden, da sonst keine zuverlässigen Aussagen über diese beiden Gruppen gemacht werden können.

Fahrertyp	Vorgabe [%]	absolute Häufigkeit	relative Häufigkeit [%]
<b>Vielfahrer</b>	50	197	49,0
<b>Normalfahrer</b>	35	144	35,8
<b>Seltenfahrer</b>	15	61	15,2
<b>Summe</b>	100	402	100

**Tabelle 4: Verteilung der Fahrertypen in der Stichprobe**

Die Vorgaben für die Schichtung stehen in Tabelle 4. Danach soll die Stichprobe zu 50% aus Viel-, zu 35% aus Normal- und zu 15% aus Seltenfahrern bestehen. Aus dem Screening, das vorab am Telefon durchgeführt wurde, können 2417 Datensätze für die Auswertung verwendet werden. Nachdem die Alters- und Haushaltsgrößenverteilung in der Stichprobe anhand der Grundgesamtheit von Karlsruhe mit entsprechenden Gewichten korrigiert wurde, erhält man eine Verteilung nach Fahrertypen, die in Abbildung 12 dargestellt ist. Personen, die selbst keine Fahrten über 30 Kilometer mit dem Pkw durchführen, werden als Niefahrer bezeichnet.



**Abbildung 12: Verteilung der Fahrertypen im Screening und im Deutschen Mobilitätspanel**

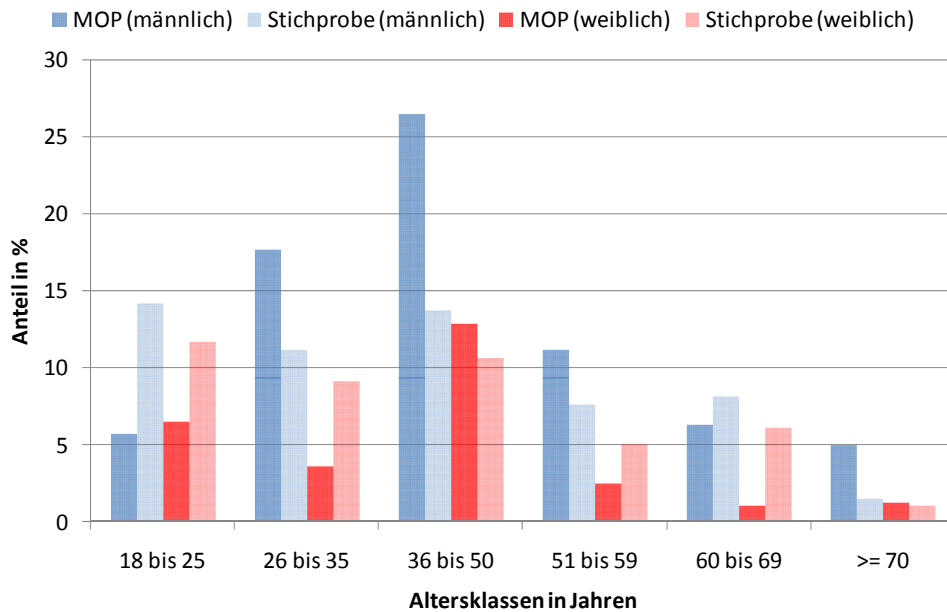
Anhand der für Deutschland repräsentativen, einwöchigen Befragung im MOP kann man die Vielfahrer identifizieren. Danach fällt auf, dass der Anteil in der Stichprobe mit 25% im Vergleich zu den 18% im MOP etwas zu hoch ausfällt. Dies kann ggf. mit einer Selektivität der Fragestellung zusammenhängen, die v. a. Vielfahrer anspricht, die den größten Nutzen durch Verkehrsinformationen erwarten können. Schließlich wurden während des Screening 402 Personen für die Haupterhebung rekrutiert.

### 2.5.3.2 Soziodemografische Merkmale der Probanden

Aufgrund der geschichteten Stichprobe in der Erhebung dürfen die soziodemografischen Merkmale der Probanden nicht mit der Grundgesamtheit von Karlsruhe verglichen werden, weil das Mobilitätsverhalten in den Vergleich mit einbezogen werden muss. Dieses ist entsprechend der oben genannten Definition für die Grundgesamtheit von Karlsruhe nicht bekannt. Stattdessen können die Vielfahrer aber aus den für Deutschland repräsentativen Daten des Mobilitätspanels bestimmt und für einen Vergleich mit der Stichprobe heran gezogen werden.

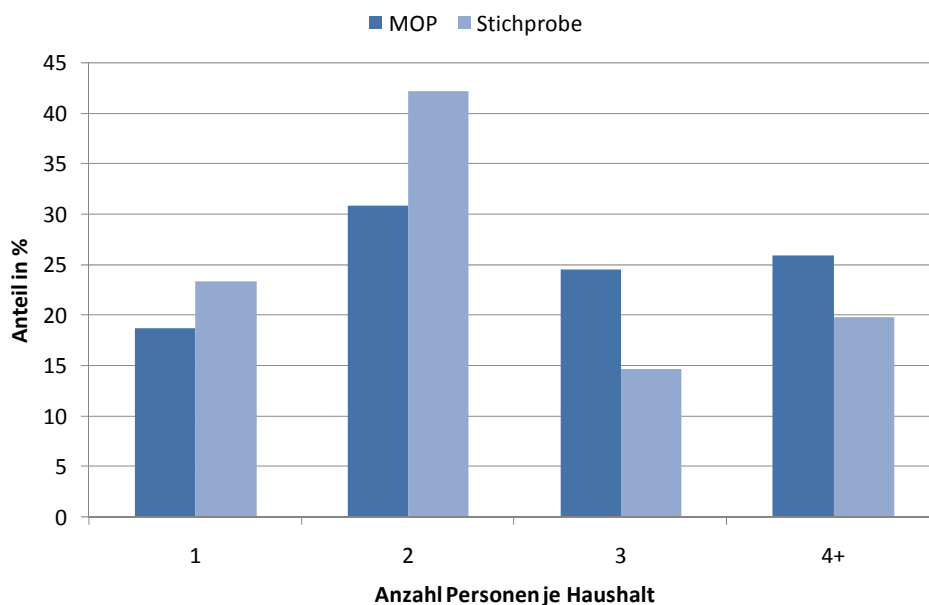
Abbildung 13 zeigt die Altersverteilung der Probanden nach Geschlecht im Vergleich mit den Daten aus dem MOP. Der Anteil der männlichen Vielfahrer im MOP ist durch eine dunkel- und aus der Stichprobe durch eine hellblaue Säule gekennzeichnet. Entsprechend sind die Anteile der Frauen im MOP rot und in der Stichprobe rosa dargestellt. Anhand der Paneldaten wird deutlich, dass Vielfahrer v. a. männlich und zwischen 26 und 50 Jahren alt sind. In

diesen Altersklassen und bei den über 70-jährigen fehlen Männer in der Stichprobe. Dafür gibt es zu viele männliche Testpersonen in der Altersklasse zwischen 18 und 25 Jahren und insgesamt zu viele Frauen.



**Abbildung 13: Verteilung der Altersklassen nach Geschlecht bei Vielfahrern**

Die Verteilung der Haushaltsgrößen zeigt in Abbildung 14, dass Vielfahrer hauptsächlich in Mehrpersonenhaushalten leben. Dies ist insofern auffällig, als mittlerweile der Anteil der Einpersonenhaushalte unabhängig vom Verkehrsverhalten mit über 35% am höchsten ist. Eine Erklärung dafür ist, dass v. a. ältere Menschen in Einpersonenhaushalten leben und diese weniger mobil sind. In der Stichprobe sind allerdings die Ein- und Zweipersonenhaushalte überrepräsentiert, was damit zu tun haben könnte, dass Menschen in Haushalten mit mehr als zwei Personen weniger flexibel in ihrer Zeiteinteilung sind, um an der Erhebung teilzunehmen, weil ggf. Kinder im Haushalt leben.



**Abbildung 14: Verteilung der Haushaltsgrößen bei Vielfahrern**

Abbildung 15 zeigt die Berufstätigkeit von Vielfahrern. Die Paneldaten verdeutlichen, dass über 60% der Vielfahrer Vollzeit und ca. 10% Teilzeit beschäftigt sind. Während in der Stichprobe der Anteil der Teilzeiterwerbstätigen gut getroffen wurde, fehlen etwa 10% an Vollzeit-

erwerbstätigen. Dies hängt wahrscheinlich auch wieder mit dem erhöhten zeitlichen Aufwand der Studie zusammen, weil Vollzeitbeschäftigte zeitlich weniger flexibel sind als z. B. Rentner oder Studenten.

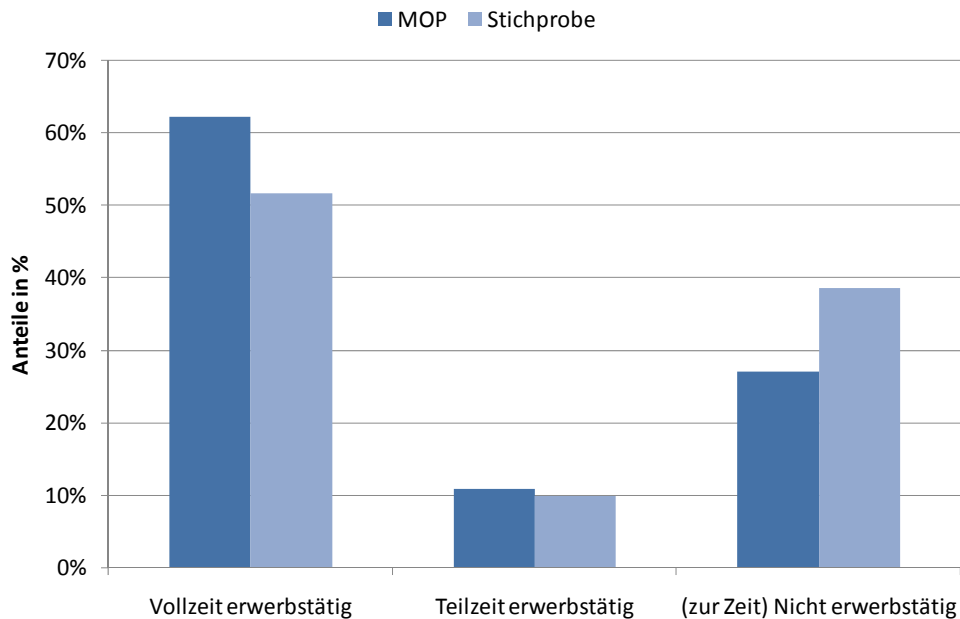


Abbildung 15: Berufstätigkeit von Vielfahrern

### 2.5.4 Auswertung von Nutzungs- und Befolgungsgrad

Abbildung 16 stellt das Nutzungsverhalten von Pre- und On-Trip-Informationen jeweils für die Szenarien II und III dar. In Abbildung 17 bezieht sich das Befolgungsverhalten nur auf die individualisierten Verkehrsdienste. Ferner wurden für die Auswertung der Entscheidungen vor der Fahrt alle Probanden berücksichtigt. Während der Fahrt sind diejenigen Personen weggefallen, die sich für den Zug als Verkehrsmittel entschieden haben und für die damit keine Notwendigkeit mehr bestand, Verkehrsinformationen zu nutzen.

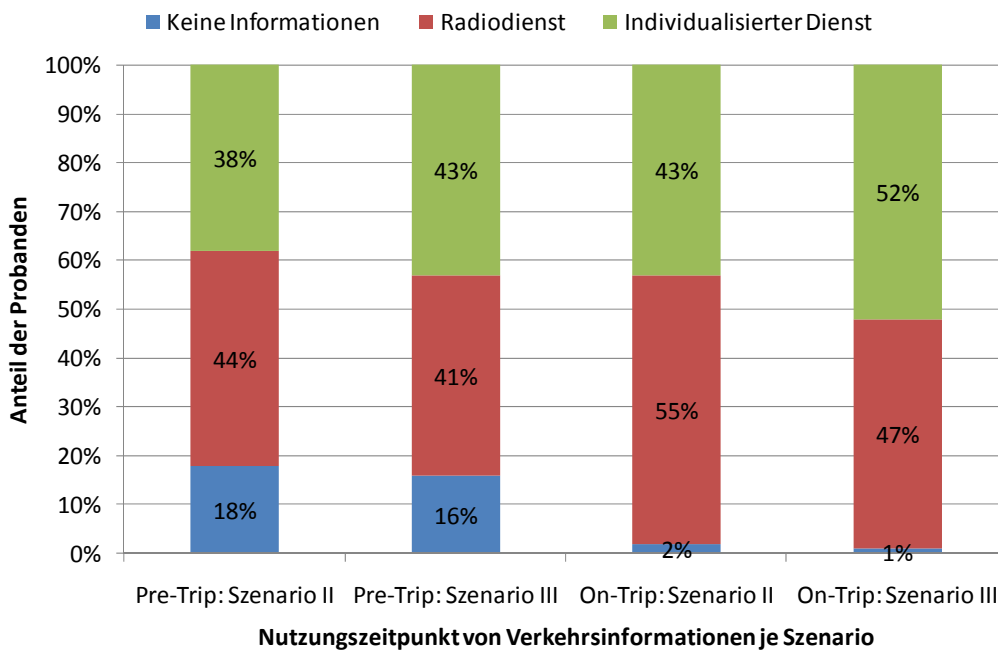
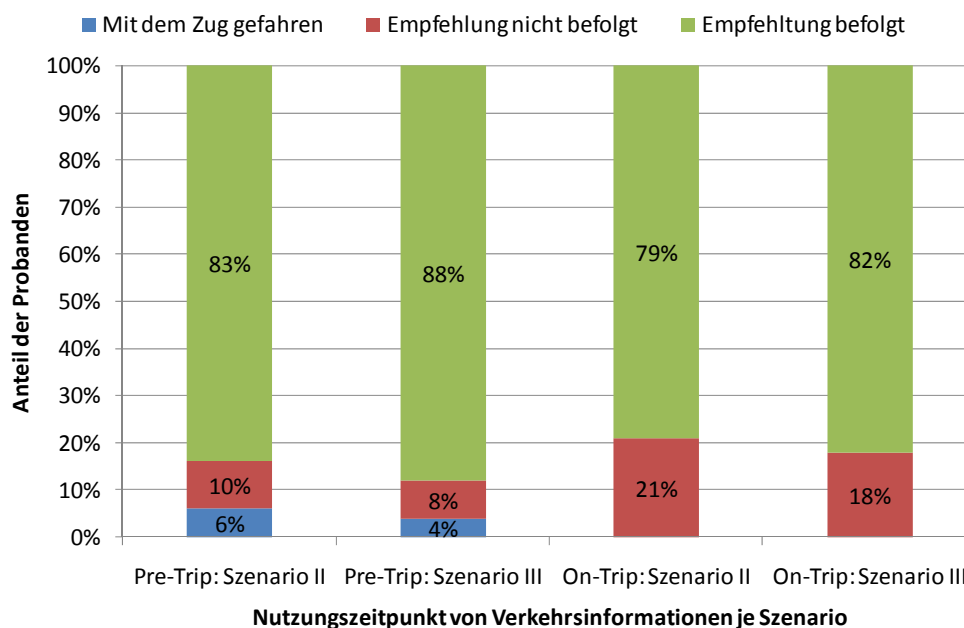


Abbildung 16: Nutzungsverhalten von Verkehrsinformationen in empirischer Studie



Abbildung 16 verdeutlicht, dass der Nutzungsgrad von Verkehrsinformationen in der empirischen Studie insgesamt sehr hoch ausfällt. Ein Anteil von 82% bzw. 84% der Studienteilnehmer nutzte Pre-Trip-Informationen. Während der Fahrt steigerte sich der Anteil sogar auf 98% in Szenario II und 99% in Szenario III. Der höhere Nutzungsgrad für On-Trip-Informationen ist verständlich, weil Personen während der Fahrt direkt von den vorherrschenden Verkehrszuständen betroffen sind. Dagegen müssen die Verkehrsteilnehmer vor der Fahrt vorausschauend handeln und selbst veranlassen, dass ein Dienst sie über die Verkehrslage informiert. Ferner kann man erkennen, dass der Anteil Personen, der kollektive Radiodienste verwendet, ähnlich hoch ist, wie der Anteil an Nutzern von individuellen Verkehrsdiensten. Dies ist ebenfalls plausibel, auch wenn der Zugang zu den individualisierten, hochwertigeren Verkehrsdiensten in der Simulation relativ einfach war. Denn einerseits war der Radioverkehrsdienst im Gegensatz zum individualisierten Dienst kostenfrei, und andererseits war er den Probanden aus ihrem alltäglichen Leben bereits bekannt. Der leicht gestiegene Anteil individueller Informationen vor und während der Fahrt im Szenario III weist darauf hin, dass sich das Vertrauen in die neue Technik im Laufe der Erhebung erhöht hat.

Der Befolgungsgrad für individualisierte Verkehrsdienste fällt nach Abbildung 17 mit Werten zwischen 79% und 88% ebenfalls sehr hoch aus. Wie schon beim Nutzungsverhalten ist auch bei der Befolgung eine leichte Zunahme der Quote von Szenario II nach III zu beobachten, was die These mit einem höheren Vertrauen verstärkt.



**Abbildung 17: Befolgungsverhalten von Verkehrsinformationen in empirischer Studie**

Außerdem fällt auf, dass bei Pre-Trip- höhere Befolgungsraten gemessen werden als bei On-Trip-Informationen. Dies ist insofern schlüssig, als man vor der Fahrt mehr Handlungsoptionen besitzt. Ferner muss man sich vor der Fahrt auf das verlassen, was einem der Verkehrsdienst sagt, weil man selbst noch keine eigenen Erfahrungen mit der aktuellen Verkehrslage gemacht hat, wenn man noch nicht losgefahren ist. Falls das Vertrauen in den Dienst hoch ist, wie es in der Studie offensichtlich der Fall war, befolgt man die Meldung eher.

Letztlich kann man aus den Ergebnissen schließen, dass die Nutzungs- und Befolgungsraten hoch sind, wenn der Zugang einfach und die Qualität der Meldungen gut ist. Trotzdem wird auch bei einem höheren Ausstattungsgrad mit Verkehrstelematik in der Zukunft der Nut-

zungs- und Befolgungsgrad eher niedriger ausfallen als in der empirischen Studie, weil der Zugang nicht so einfach sein wird wie in der Befragungssituation. Daher kann man davon ausgehen, dass in der Studie höchstens die oberen Grenzen gemessen wurden und die Werte in der Realität sicherlich niedriger ausfallen werden.

## 2.6 Beschreibung der verwendeten Software

Zur Ergänzung der in dieser Arbeit entwickelten Modelle werden die Softwares VISUM und VISSIM der PTV AG verwendet. „VISUM ist ein Programm für die rechnergestützte Verkehrsplanung, das der Analyse und Planung des Systems Verkehr dient.“ ([56], 1-1). In VISUM sind mehrere Verkehrsumlegungsmodelle implementiert. In dieser Arbeit wird das Verfahren „Dynamisches Nutzergleichgewicht“ verwendet, um Routensätze im MIV für die Wahl einer Initialroute und die Empfehlungen eines Verkehrsdienstes zu generieren. Kapitel 2.6.1 gibt einen kurzen Überblick auf die verwendete Funktion.

„VISSIM ist ein mikroskopisches, zeitschrittorientiertes und verhaltensbasiertes Simulationsmodell zur Nachbildung von Stadt- und Außerortsverkehr“. In VISSIM bewegen sich einzelne, so genannte Fahrer-Fahrzeug-Einheiten durch ein Netz. Sie lassen sich durch die technische Spezifikation eines Fahrzeugs, durch das Verhalten der Fahrer und Abhängigkeiten zwischen Fahrer-Fahrzeug-Einheiten charakterisieren ([57], 20-23). Folglich findet VISSIM seine Anwendung eher im verkehrstechnischen Kontext und wird in dieser Arbeit zur Verkehrsflusssimulation eingesetzt. Außerdem dient es zur Abbildung von On-Trip-Informationen und der Routenwahl während der Fahrt. Kapitel 2.6.2 beschreibt kurz das in VISSIM implementierte Verkehrsflussmodell.

### 2.6.1 Verkehrsumlegung mit PTV VISUM

Das in VISUM eingebaute Verfahren „Dynamisches Nutzergleichgewicht“ berechnet eine Gleichgewichtsumlegung über eine angegebene Umlegungsperiode mit einer zeitlich veränderlichen Eingabe von Nachfrage und Angebot ([56], 7-184). Im Gegensatz zum statischen Nutzergleichgewicht müssen die Kanten- und Wegemodellvariablen nicht nur in der räumlichen, sondern auch in der zeitlichen Dimension miteinander konsistent sein.

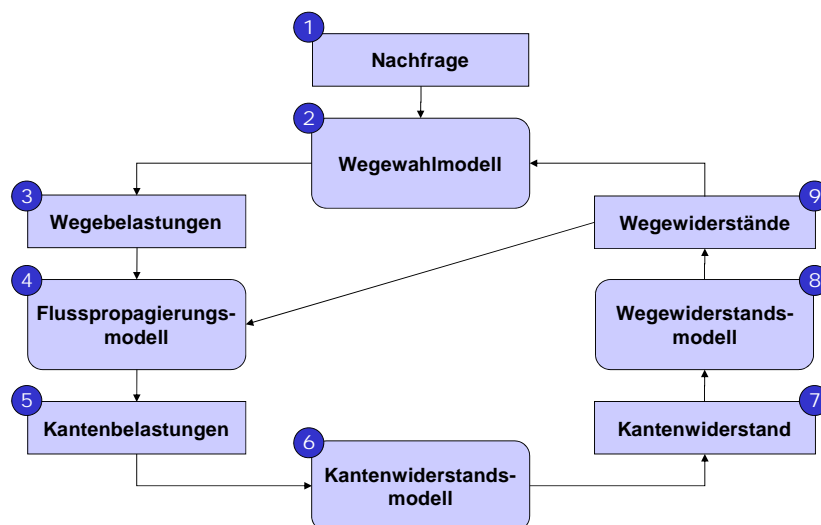


Abbildung 18: Dynamisches Nutzergleichgewicht

Abbildung 18 gibt einen Überblick über das gesamte Umlegungsmodell. Für eine zeitlich differenzierte Verkehrsnachfrage (1) wird je Zeitintervall eine Wegesuche und Wegewahl (2)

durchgeführt. Dabei folgt die Aufteilung der Fahrten bei der Wegewahl dem ersten Wardrop'schen Prinzip. Da im dynamischen Fall eine Verbindung eine Route ersetzt, muss die Fahrtdauer alternativer Wege in Bezug auf das Abfahrtszeitintervall gleich groß sein, damit sich ein Nutzeroptimum einstellt. Als Ergebnis der Routenwahl liegen die Wegebelastungen je Zeitintervall vor (3).

Als nächstes bewegt ein makroskopisches, kontinuierliches Verkehrsflussmodell die Fahrten auf ihrer Route durch das Netz (4). Dafür sind neben den Belastungen auch die Widerstände (9) als Reisezeiten notwendig. Makroskopische Verkehrsflussmodelle bilden das kollektive Verhalten mehrerer Fahrzeuge auf einer Strecke durch die drei Größen der Verkehrsdichte (K), Verkehrsstärke (Q) und Geschwindigkeit (V) ab.

Als Ergebnis aus dem Bewegungsmodell erhält man die Straßenbelastungen (5), die in ein Kantenwiderstandsmodell (6) eingehen, das die einzelnen Streckenwiderstände (7) je Zeitscheibe berechnet. Mithilfe der Kantenwiderstände können dann in einem Wegewiderstandsmodell (8) die Routenwiderstände (9) neu berechnet werden, die einerseits das Wegewahl- (2) und andererseits das Flusspropagierungsmodell (5) verwendet. Einen genaueren Überblick auf das Modell gibt das VISUM-Handbuch ([56], 2-182 – 2-215).

## 2.6.2 Verkehrsflusssimulation mit PTV VISSIM

Zur Modellierung des Verkehrsflusses wurden in VISSIM ein psycho-physisches Fahrzeugfolgemodell für die Längsbewegung und ein regelbasiertes Modell für die Querbewegung implementiert, die auf Arbeiten von Wiedemann ([57], 105) zurückgehen. Das Fahrzeugfolgemodell basiert auf Wahrnehmungsschwellen, die in Abbildung 19 dargestellt sind. Danach kann sich ein Autofahrer in einem der folgenden vier Zustände befinden: freies Fahren, Annäherung, Folgen und Bremsen. Über die Wahrnehmungsschwellen geht eine Person von einem in den anderen Zustand über.

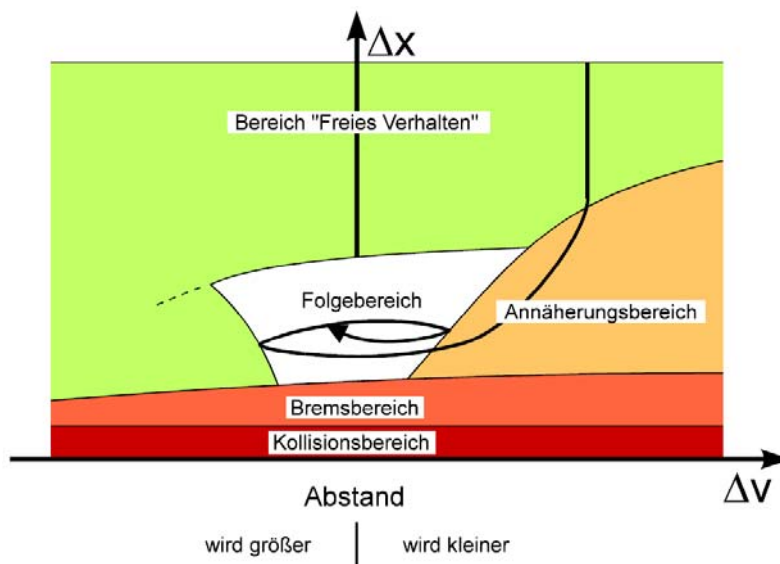


Abbildung 19: Fahrzeugfolgemodell nach Wiedemann ([58], 22)

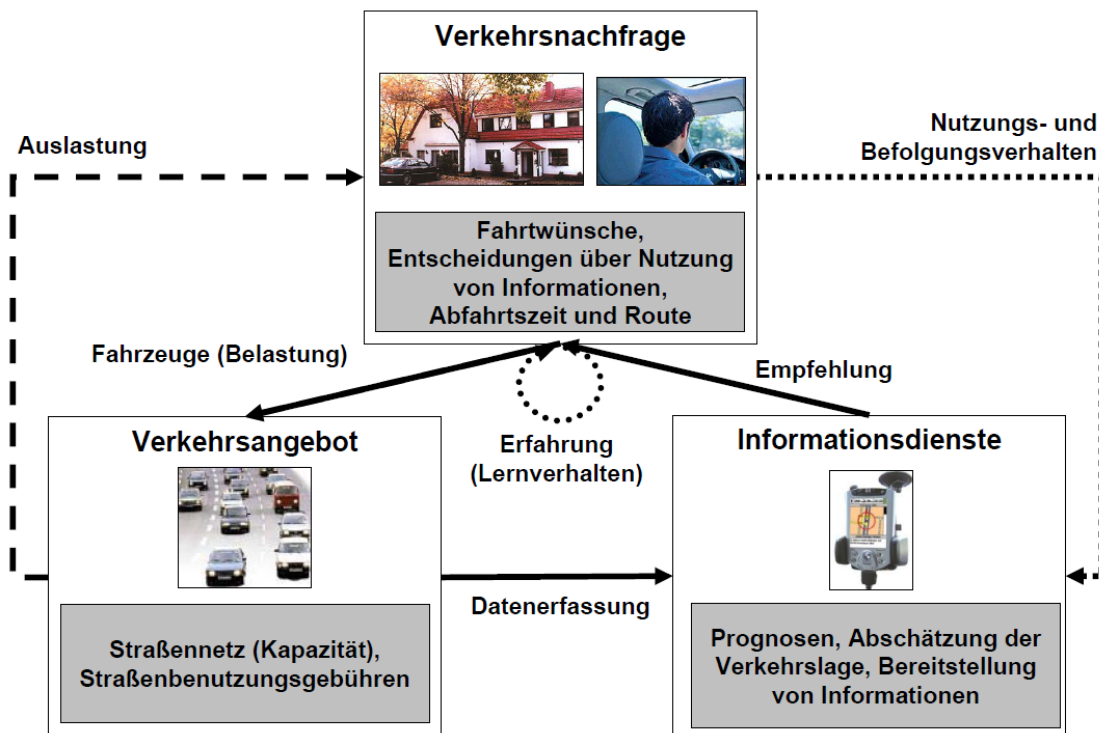
Im Bereich „freies Verhalten“ ist der Fahrer unbeeinflusst und handelt unabhängig vom voraus fahrenden Fahrzeug. Daher versucht er, seine Wunschgeschwindigkeit zu erreichen und zu halten. Im „Annäherungsbereich“ beeinflusst das vorausfahrende Fahrzeug das eigene Fahrverhalten. Sobald der Verkehrsteilnehmer mit dem Erreichen seiner Wahrnehmungsschwelle erkennt, dass er sich zu dicht am vorderen Fahrzeug befindet und schneller fährt

als dieses, beginnt er zu bremsen. Während die Person eines schnelleren Fahrzeuges dem vorausfahrenden Pkw folgt, dauert der Bremsvorgang solange an bis seine individuelle Wahrnehmungsschwelle in Bezug auf den Abstand zum vorderen Auto erreicht wird. Die Geschwindigkeit sinkt dann bis zum Erreichen einer weiteren Wahrnehmungsschwelle, worauf der Fahrer wieder leicht beschleunigt. Somit wechseln sich im „Folgebereich“ ständig Phasen des Bremsens und Beschleunigens ab. Falls der Abstand zum Vordermann plötzlich unter den gewünschten Sicherheitsabstand sinkt und damit wieder die Wahrnehmungsschwelle erreicht, reagiert der Fahrer mit einer mittleren bis starken Verzögerung. Damit geht der Zustand in den „Bremsbereich“ über ([57], 105-108).

In Bezug auf die Querbewegungen unterscheidet VISSIM die beiden Situationen eines notwendigen und eines freien Spurwechsels. Ein notwendiger Spurwechsel dient dazu, die nächste Verbindungsstrecke einer Route zu erreichen. Ein freier Spurwechsel wird durchgeführt, um mehr Platz zu haben oder mit einer höheren Geschwindigkeit zu fahren. Damit ein Fahrzeug die Spur wechselt, muss zuerst immer eine Zeitlücke in Fahrtrichtung gefunden werden. Die Größe der Lücke hängt von beiden Geschwindigkeiten ab, und zwar der des Spurwechslers und der des von hinten kommenden Fahrzeugs, das auf dem Fahrstreifen fährt, auf die der Spurwechsler fahren will. Außerdem hängt sie bei einem notwendigen Spurwechsel auch von der „Aggressivität“ ab, d.h. von der jeweiligen maximalen Verzögerung der Fahrzeuge ([57], 109-111).

### 3 Ein Modell zur Analyse von Verkehrsinformationen und belastungsabhängigen Preisen im Straßenverkehr

Ein Modell zur Analyse der Wirkungen von Verkehrsinformationen im MIV und Straßenbenutzungsgebühren muss die Wechselwirkungen zwischen Verkehrsangebot, Informationsdienst und dem Verhalten der Verkehrsteilnehmer berücksichtigen, die in Abbildung 20 dargestellt sind. Dabei gibt es mehrere Betrachtungsebenen. Zuerst gibt es ein Feedback zwischen den einzelnen Entscheidungen von Pkw-Fahrern und der Belastung auf den Straßen. Einerseits hängt die Netzauslastung davon ab, wie viele Fahrzeuge (Belastung) unterwegs sind. Andererseits beeinflusst die Höhe der Auslastung die Autofahrer bei ihrer Routen- und Verbindungswahl. Zwischen Verkehrsnachfrage und Angebot steht der Verkehrsdienst, dessen Empfehlungen auf Abschätzungen der Verkehrslage und Datenerfassung basieren. Ferner kann der Verkehrsdienst das Nutzungs- und Befolgungsverhalten der Verkehrsteilnehmer in den Prognosen berücksichtigen. Außerdem bestehen Rückkopplungen durch Lernprozesse, die das Modell bei der Wahl einer Verbindung mit Straßenbenutzungsgebühren berücksichtigen soll.



**Abbildung 20: Wechselwirkungen zwischen Mensch, Verkehrsablauf und Informationsdienst**

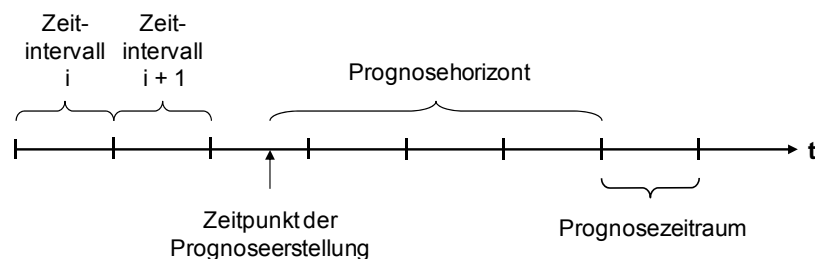
Die Einbeziehung von Rückkopplungen macht es notwendig, eine zeitliche Komponente in das Modell einzubauen. Mikroskopische Modelle zur Beschreibung des Verkehrsablaufs sind grundsätzlich dynamisch, weil sie die Bewegung einzelner Fahrzeuge im Netz abbilden. Ferner sind mikroskopische Verkehrsflusssimulationen am besten dazu geeignet, Rückstaus und daraus resultierende Reisezeiten plausibel abzubilden. Eine weitere Anforderung an das Gesamtmodell ist die Abbildung eines Verkehrsdienstes mit hoher Qualität.

Im Folgenden werden die Modellierung des Informationsdienstes und der Entscheidungen von Verkehrsteilnehmern im Zusammenhang mit der Routen- und Verbindungswahl beschrieben. Das Netzmodell und die Generierung von Fahrten mit dem Pkw werden jeweils bei den entsprechenden Anwendungsfällen in Kapitel 4 erläutert.

### 3.1 Verkehrsinformationsdienst

Der modellierte Verkehrsdienst bietet seinen Nutzern individualisierte, dynamische Empfehlungen an. Dabei kann es sich vor Fahrtantritt um mehrere Verbindungen, d. h. Routen mit alternativen Abfahrtszeiten, für die gewünschte QZ-Beziehung handeln. Während der Fahrt erhält der Reisende eine Meldung über die optimale Route von seiner aktuellen Position bis zum Ziel. Kollektive Verkehrsinformationen, wie z. B. durch Wechselverkehrszeichen oder den Verkehrsfunk im Radio, sollen vernachlässigt werden. Diese Annahme kann damit begründet werden, dass die individualisierten Dienste mit maßgeschneiderten Angeboten eher die Wünsche der einzelnen Verkehrsteilnehmer treffen als kollektive Systeme und sich deshalb langfristig durchsetzen.

Pre- und On-Trip-Informationen werden in diesem Modell auf unterschiedliche Weise erstellt. Informationen vor Fahrtantritt basieren auf einer Prognose und werden mithilfe des Programms VISUM implementiert. Zur Erzeugung von Informationen während der Fahrt wird die Funktion der dynamischen Zielführung aus dem Programm VISSIM genutzt. In beiden Fällen entstehen die Informationen in einem Rückkopplungsprozess mit der Verkehrsnachfrage.



**Abbildung 21: Begriffe im Zusammenhang mit Verkehrsprognosen**

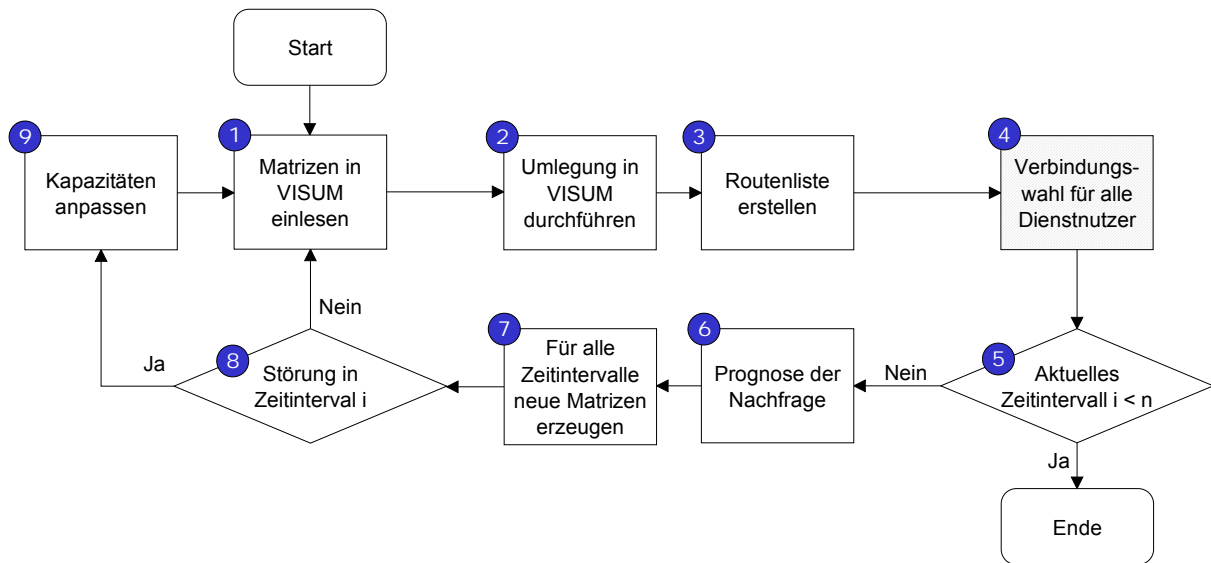
Zunächst werden einige Begriffe definiert, die in Abbildung 21 dargestellt sind. Ein *Zeitintervall* entspricht der Dauer, über welche die Daten aggregiert und ausgewertet werden. In der vorliegenden Untersuchung betrachtet der Verkehrsdienst Zeiträume mit einer Länge von fünf Minuten. Anhand der Berechnungen des Verkehrsdienstes können zu jedem Zeitpunkt während der Simulation Voraussagen für ein kommendes Zeitintervall, dem *Prognosezeitraum*, erstellt werden. Zwischen dem *Zeitpunkt der Prognoseerstellung* und dem Prognosezeitraum liegt der *Prognosehorizont*, der mehrere Zeitscheiben umfassen kann.

#### 3.1.1 Pre-Trip-Informationen

##### 3.1.1.1 Konzept

Abbildung 22 zeigt den Ablauf zur Erstellung von Pre-Trip-Informationen. Zu Beginn lädt der Informationsdienst Verkehrsnachfragematrizen in VISUM (1) und führt eine dynamische Umlegung durch (2). Die erste Umlegung verwendet Matrizen, die auf Vergangenheitsdaten basieren und einen typischen Verlauf der Nachfrageganglinie darstellen. Das Ergebnis ist eine Routenliste mit Reisezeiten und Kosten als Grundlage für die Empfehlungen vor der Fahrt (3). Die Frage, an wen der Dienst welche Informationen verteilt, muss schließlich bei der Verbindungswahl (4) bearbeitet werden, weil der Nutzer mit seinem Fahrtwunsch dafür benötigt wird. Der Kasten wurde schraffiert dargestellt, weil die dazu gehörenden Entscheidungsmodelle eigene Module darstellen, die das nachfolgende Kapitel 3.2 genauer erläutert. Wenn das letzte Intervall des Untersuchungszeitraums erreicht wird (5), ist die Simulation zu Ende. Falls es sich nicht um das letzte Zeitintervall handelt, folgt nach der Verbindungswahl die Rückkopplung zwischen dem Informationsdienst und der Verkehrsnachfrage. Der Dienst

prognostiziert die zukünftigen Fahrten mit einem Verfahren zur exponentiellen Glättung (6) und erzeugt neue Matrizen (7). Der Prognosealgorithmus wird in Kapitel 3.1.1.3 näher erklärt.



**Abbildung 22: Ablauf zur Generierung von Pre-Trip-Informationen**

Falls ein Untersuchungsfall mit einer Störung des Verkehrsablaufs berechnet werden soll (8), müssen die Netzkapazitäten angepasst werden (9). Folglich wird in dem betroffenen Zeitraum ein anderes Netzmodell für die Umlegung geladen, das die Kapazitätsanpassungen auf den entsprechenden Streckenabschnitten enthält. Bevor eine neue Umlegung durchgeführt wird, liest das Programm die aktualisierten Matrizen in VISUM ein (1). Das neue Ergebnis (2) ist dann die Entscheidungsgrundlage für die nächste Verbindungswahl (4).

### 3.1.1.2 Annahmen zur Datenerfassung

Da der Schwerpunkt dieser Arbeit nicht darin besteht, Methoden zur Verkehrsdatenerfassung, Stauerkennung oder Verkehrsprognose zu entwickeln, werden dazu einige Annahmen getroffen. In Bezug auf die Datengrundlage wird davon ausgegangen, dass Onboard Units in den Fahrzeugen dem Verkehrsdienst den Fahrtantritt mit Quelle, Ziel und Abfahrtszeit übermitteln. Ähnliche Daten gibt es heute als FCD, die allerdings nur die aktuelle Position des Fahrzeugs und ggf. die momentane Geschwindigkeit senden. Informationen bei Fahrtantritt über Quelle und Ziel sind zwar gegenwärtig noch nicht verfügbar, aber man kann davon ausgehen, dass Verkehrsdienste umso besser über die aktuelle Nachfrage Bescheid wissen, je höher der Nutzungsgrad ist und je mehr sie über das Befolgungsverhalten ihrer Kunden wissen. Denn Fahrtantrittsmeldungen entsprechen den Reisewünschen, die Verkehrsteilnehmer über Anfragen an die Verkehrsdienste senden.

Ferner können Informationsdienste Daten über Fahrtverläufe mithilfe von Onboard Units erfassen und für ihre Prognosen verwenden. Die Menge gesammelter Daten kann sehr groß werden, falls z. B. ein elektronisches, satellitenbasiertes Mautsystem für Pkw eingeführt wird und der Ausstattungsgrad mit Geräten zur Ortung von Fahrzeugen gegen 100% geht. Allerdings müssen bei der Erfassung von Fahrtverläufen stets datenschutzrechtliche Belange beachtet werden. Wenn man davon ausgeht, dass Datenschutzprobleme gelöst werden können, müsste man mit den zusätzlichen Daten relativ gut in der Lage sein, die aktuelle Verkehrsnachfrage von einer Quelle zum Ziel abzuschätzen.

Im Fall einer Störung wird aus Vereinfachungsgründen darauf verzichtet, Stauerkennungsverfahren zu implementieren. Stattdessen wird angenommen, dass der Verkehrsdienst geeignete Verfahren bereits verwendet und zusätzlich die Polizei oder sonstige Stellen den Dienstbetreiber über Störungen des Verkehrsablaufs mit Ort, Ausmaß und Länge benachrichtigen. Folglich werden Kapazitätsreduktionen während der Simulation einfach gesetzt und bei den Prognosen berücksichtigt. Heutzutage stehen zwar noch keine Algorithmen für eine sichere Stauerkennung zur Verfügung. Aber die Annahme einer guten Identifizierung von Staus als Voraussetzung für einen qualitativ hochwertigen Dienst kann damit gerechtfertigt werden, dass es in der Zukunft Verfahren geben wird, die aufgrund einer sich verbessernden Datenlage Verkehrsstörungen mit hoher Wahrscheinlichkeit erkennen können.

### 3.1.1.3 Prognose der Verkehrsnachfrage

Mithilfe der Fahrtantrittsmeldungen ist in dieser Untersuchung stets die aktuelle Nachfrage bekannt, die mit einer typischen, „historischen“ QZ-Matrix abgeglichen wird. Durch den Vergleich von tatsächlicher und erwarteter Nachfrage für eine QZ-Beziehung lässt sich nach Formel 25 ein relativer Fehler  $RF_{q,z,i}$  für ein Zeitintervall  $i$  berechnen, indem man die tatsächlich gemessene Nachfrage auf einer QZ-Beziehung  $X_i$  durch die erwartete Nachfrage  $E_i$  teilt.

$$\text{Formel 25: } RF_{q,z,i} = \frac{X_{q,z,i}}{E_{q,z,i}}$$

Gibt es eine Abweichung zwischen aktueller und erwarteter Nachfragematrix, wird für die Kurzfristprognose davon ausgegangen, dass es auch in der Zukunft zu einer Änderung in diese Richtung kommt. Daher schreibt der Algorithmus die Abweichung durch exponentielles Glätten über die Zeit fort. Entsprechend zeigt Formel 26, wie der relative Fehler  $RF_{q,z}$  geschätzt werden kann, mit dem die Matrizen für die kommenden Zeitintervalle je QZ-Beziehung angepasst werden. Der Parameter  $\alpha$  kann zwischen 0 und 1 liegen. Liegt er nahe 0, gehen aktuell gemessene Werte nur langsam in die Prognose ein. Je mehr sich der Parameter 1 nähert, desto schneller passt sich die Vorhersage an die aktuellen Messwerte an. Da es sich hier um eine Kurzfristprognose handelt, sollen aktuelle Messwerte schnell berücksichtigt werden. Daher wird der Parameter  $\alpha$  auf 0,7 gesetzt.

$$\text{Formel 26: } RF_{q,z} = \alpha * RF_{q,z,i} + (1 - \alpha) * RF_{q,z,i-1}$$

Mit diesem Algorithmus können Phänomene, wie eine veränderte Nachfrage z. B. aufgrund von Witterungsbedingungen, gut nachgezeichnet werden. Eine entscheidende Stellgröße ist die Länge des betrachteten Zeitintervalls, weil sich Tendenzen, z. B. wegen einer Verschiebung der Abfahrtszeit, erst mit einer entsprechenden Verzögerung auf die aktualisierte Nachfragematrix auswirken. An seine Grenzen stößt der Algorithmus bei spontanen, unregelmäßigen Änderungen der Nachfrage.

### 3.1.1.4 Berechnung der Netzbelastung

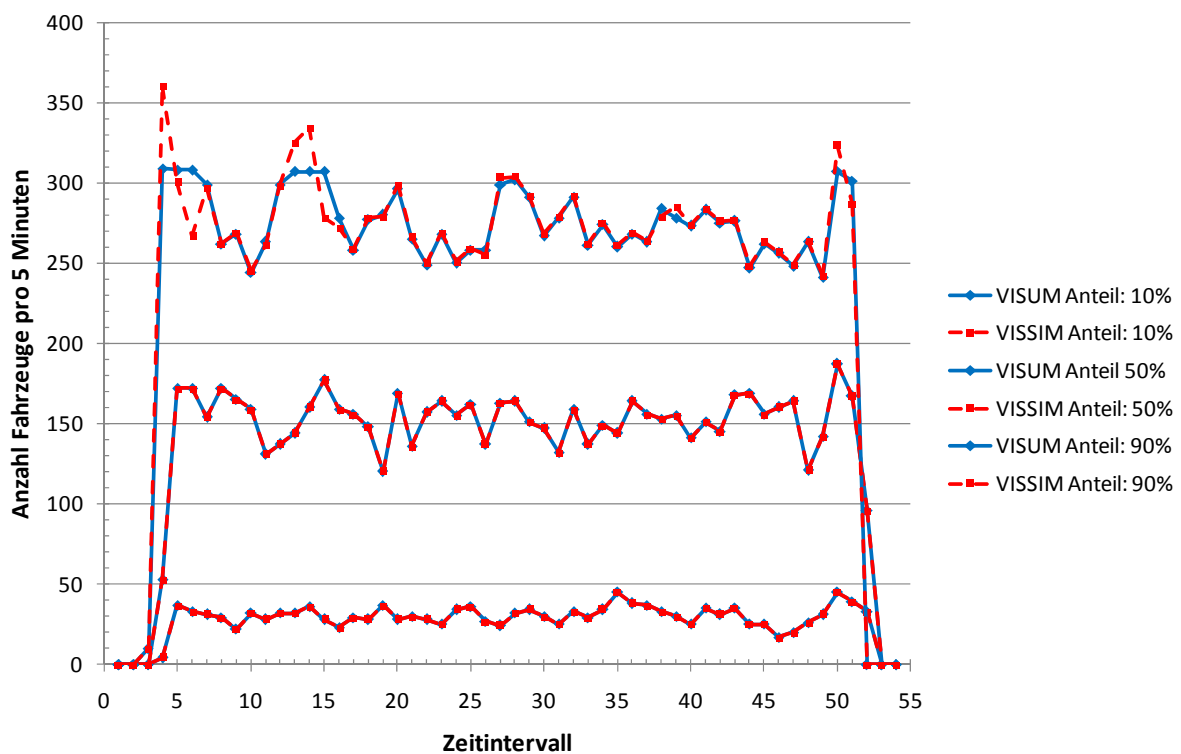
Nachdem die Anzahl der Fahrten prognostiziert und in Matrixform geschrieben wurde, müssen die Kapazitäten der betroffenen Strecken reduziert werden, falls eine Störung des Verkehrsablaufs vorliegt. Dann wird das Netz durch eine dynamische Umlegung mit der erwarteten Verkehrsnachfrage belastet. Diese Vorgehensweise bildet den idealen Zustand ab, dass 100% der Verkehrsteilnehmer über die wahren Widerstände im Netz informiert sind. Somit wird stets der optimale Verkehrszustand bei vollkommener Information als Grundlage für



die Generierung der Empfehlungen berechnet. Als Ergebnis erhält der Verkehrsdienst die Reisezeiten für alle Routen zur Erstellung von Empfehlungen.

### 3.1.1.5 Kalibrierung

Bei der Kalibrierung geht es darum, die Belastungen in VISSIM, welches das Straßennetz abbildet, mit den Werten aus VISUM, das die Berechnungen des Verkehrsdienstes darstellt, abzustimmen. Abbildung 23 vergleicht die Belastung zwischen den Berechnungsergebnissen in VISUM und VISSIM auf einer Zufahrtstrecke in einem einfachen, symmetrischen Straßennetz im Untersuchungsfall ohne Störungen, Informationen und Preise. Das entsprechende Netzmodell wird später in Kapitel 4.2.1 näher erläutert. Die betrachtete Nachfrage variiert zwischen 10, 50 und 90% der Matrix, die zu einer Netzauslastung von ca. 100% führen würde. In VISSIM wurde direkt zu Beginn der Zufahrtskannte am Querschnitt gemessen. Die Darstellung verdeutlicht, dass über alle Zeitintervalle die Belastungen in VISUM und VISSIM sehr gut übereinstimmen. Lediglich bei einer hohen Nachfrage mit einem Anteil von 90% kommt es zu kleinen Abweichungen.



**Abbildung 23: Vergleich der Belastung in VISSIM und VISUM auf äußerer Strecke**

Abbildung 24 zeigt die Belastungen auf einer inneren Strecke des betrachteten Straßennetzes. Danach wird deutlich, dass die Nachfrage am Querschnitt in VISSIM wesentlich stärker schwankt als in VISUM, was u. a. an der Wunschgeschwindigkeitsverteilung liegen kann. VISUM rechnet immer mit einer mittleren Geschwindigkeit. Außerdem streuen die Werte sowohl in VISSIM als auch in VISUM umso stärker, je höher die Nachfrage ist. Dies ist plausibel, weil bei höherer Nachfrage die gegenseitige Beeinflussung der Verkehrsteilnehmer zunimmt und dadurch der Verkehrsfluss instabiler wird. Als Folge ist auch die Variation der Geschwindigkeiten größer.



Abbildung 24: Vergleich der Belastung in VISSIM und VISUM auf innerer Strecke

### 3.1.2 On-Trip-Informationen

Da der Schwerpunkt dieser Arbeit auf der Modellierung von Pre-Trip-Informationen liegt, wird für On-Trip-Informationen die bestehende Funktion der dynamischen Zielführung in VISSIM benutzt. Damit können individuelle, dynamische Verkehrsdienste während der Fahrt abgebildet werden, welche die Routenwahl der Verkehrsteilnehmer beeinflussen. Das Zielführungssystem sucht ausgehend von der aktuellen Position des Pkw einen neuen besten Weg zum Zielort. Dabei benutzt es für eine Bestwegsuche die generalisierten Kosten basierend auf den Reisezeiten aus der aktuellen Simulation.

Allerdings müssen die für die Routensuche vom Zielführungssystem verwendeten Reisezeiten nicht aus dem aktuellen Auswertungsintervall stammen. Stattdessen kann der Benutzer eine Versatzzeit eingeben, wonach die Reisezeitmessungen dem Informationsdienst erst mit einer zeitlichen Verzögerung zur Verfügung stehen. Damit können Laufzeiten für die Datenerfassung, Übertragung und Verarbeitung abgebildet werden. Auslöser für eine neue Wegesuche durch das Zielführungssystem ist ein festes Zeitintervall, das der Benutzer wie die Versatzzeit als so genannten Zielführungstakt einstellen muss ([57], 395).

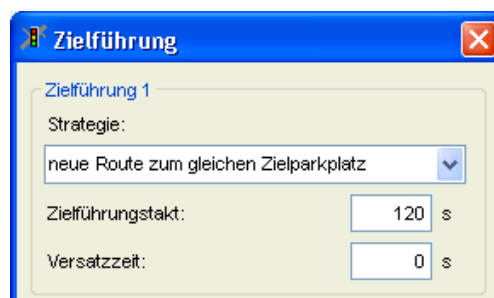


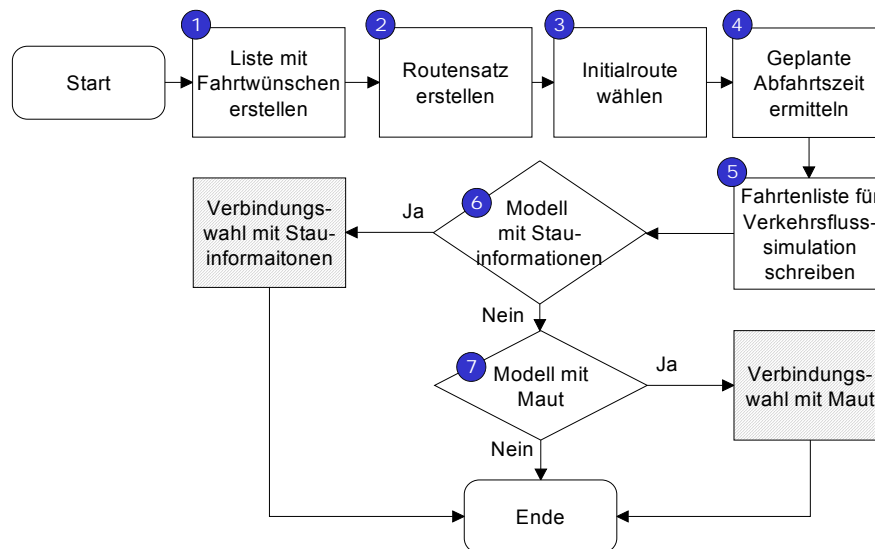
Abbildung 25: Einstellungen für die Zielführung

Wie in Abbildung 25 zu erkennen ist, wurden für die durchgeführte Untersuchung ein Zielführungstakt von 120 Sekunden und eine Versatzzeit von 0 Sekunden eingegeben. Das Auswertungs- oder Bewertungsintervall beträgt 300 Sekunden. Somit berechnet der Dienst stets

für Zeitintervalle von fünf Minuten neue mittlere Reisezeiten für alle Strecken. Anhand dieser Einstellungen wird ein sehr schneller und damit hochwertiger Dienst abgebildet.

### 3.2 Entscheidungen der Verkehrsteilnehmer

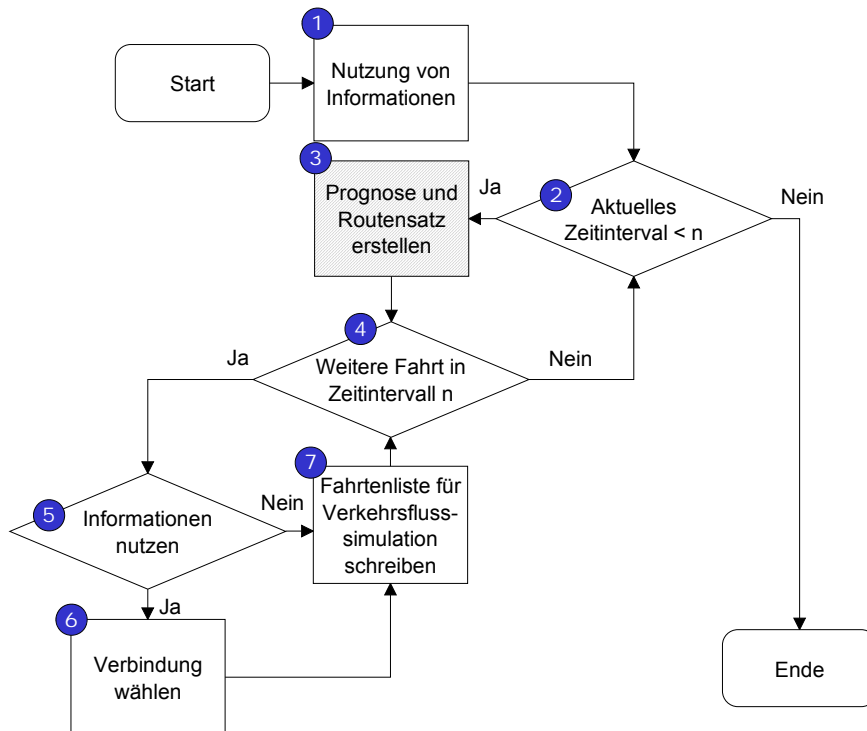
Abbildung 26 zeigt den Modellablauf für Entscheidungen der Verkehrsteilnehmer vor Fahrtantritt. Ausgangspunkt ist die Erstellung einer Liste mit Fahrtwünschen (1), die in Abhängigkeit vom Anwendungsfall kurz in den Kapiteln 4.2.2. und 4.3.2 erläutert wird. Als nächstes wird die Verkehrsnachfrage auf das Straßennetz umgelegt. Das Ergebnis ist ein Routensatz für alle QZ-Beziehungen (2). Aus den gefundenen Wegen wählen alle Reisenden ihre Initialroute (3). Dann berechnet das Programm mithilfe der Reisezeit, der gewählten Route und der Wunschankunftszeit den geplanten Abfahrtszeitpunkt (4) und schreibt das Ergebnis in die Fahrtenliste zur Eingabe für die Verkehrsflusssimulation (5). Damit ist die Wahl einer Initialroute für das Modell ohne Maßnahmen abgeschlossen. Bei den Untersuchungsfällen mit Stauinformationen (6) und einer belastungsabhängigen Maut (7) unterscheidet sich der weitere Modellablauf. Entsprechend beschreiben Abbildung 27 und Abbildung 28 den Inhalt der schraffierten Kästen.



**Abbildung 26: Fahrtwünsche und Entscheidungen der Verkehrsteilnehmer vor Fahrtantritt**

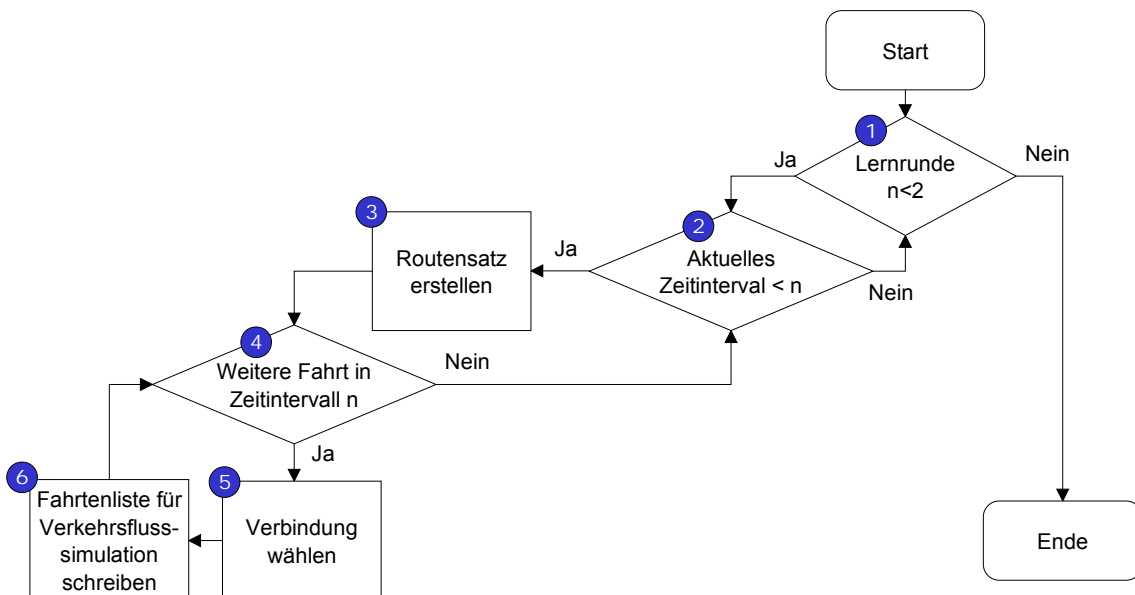
Für das Modell mit Stauinformationen muss das Programm nach Abbildung 27 für jede Fahrt bestimmen, ob der Verkehrsteilnehmer Informationen nutzt oder nicht (1). Danach beginnt eine Iteration über alle Intervalle des Untersuchungszeitraums bis das Ende der Simulationsdauer erreicht ist (2). Die Länge eines Zeitintervalls beträgt fünf Minuten. Vor einer Verbindungswahl berechnet der Verkehrsdienst die Verkehrslage. Anhand der gefundenen Routensätze generiert das Programm Empfehlungen (3). Dieses Verfahren wurde bereits im vorangehenden Kapitel 3.1 beschrieben. Danach prüft der Algorithmus für jede Fahrt innerhalb eines Zeitintervalls (4), ob Stauinformationen genutzt werden sollen (5). Wenn dies der Fall ist, führen die Verkehrsteilnehmer anhand der Informationen eine Verbindungswahl durch (6). Dabei kann der Reisende seine Startzeit auf einen früheren oder späteren Zeitraum verschieben oder wie geplant abfahren. Das Ergebnis der Entscheidung wird in eine Fahrtenliste geschrieben (7), die in die Verkehrsflusssimulation eingeht. Reisen, für die keine Stauinformationen genutzt werden sollen, übernimmt das Programm sofort mit der gewählten Initialroute in die Fahrtenliste. Nachdem alle Fahrtwünsche abgearbeitet sind (4), überprüft die

Software den nächsten Zeitraum (2). Der Algorithmus endet, wenn das letzte Zeitintervall für den betrachteten Untersuchungszeitraum erreicht ist.



**Abbildung 27: Verbindungswahl mit Stauinformationen**

Abbildung 28 beschreibt den Ablauf für die Verbindungswahl mit einer belastungsabhängigen Maut. Um das Lernverhalten der Verkehrsteilnehmer abzubilden, wird das Modul zwei Mal durchlaufen (1). Durch die Iteration haben die Verkehrsteilnehmer noch einmal die Möglichkeit, auf Entscheidungen der anderen Fahrer zu reagieren. Denn wenn sich jemand früh für seine Abfahrtszeit entschieden hat, kann es passieren, dass andere Verkehrsteilnehmer später ihre Abfahrt auch auf früher verschieben und somit die Nachfrage im betroffenen Zeitintervall plötzlich größer wird als zuerst erwartet wurde. Testläufe mit mehreren Iterationen haben gezeigt, dass die Ergebnisse bereits nach einem zusätzlichen Durchlauf konvergieren, weil so gut wie keine Verschiebungen der Abfahrtszeit mehr beobachtet werden können.



**Abbildung 28: Verbindungswahl mit einer belastungsabhängigen Maut**

Nachdem das Programm überprüft hat, wie oft das Modul bereits durchlaufen wurde, beginnt als nächstes eine Iteration über die einzelnen Zeitintervalle des Untersuchungszeitraums (2). Zu Beginn jeder Zeitspanne mit einer Dauer von fünf Minuten wird ein neuer Routensatz erzeugt (3), der als Grundlage für die Verbindungswahl (5) aller Verkehrsteilnehmer im aktuellen Zeitraum dient (4). Das Ergebnis der Verbindungswahl wird in die Fahrtenliste (7) geschrieben, die in die Verkehrsflusssimulation eingeht. Das Programm endet, wenn die Verbindungswahl für alle Verkehrsteilnehmer des letzten Zeitintervalls abgeschlossen ist und der Algorithmus zwei Mal durchlaufen wurde.

### 3.2.1 Nutzung von Verkehrsinformationen

#### 3.2.1.1 Bestimmung des Nutzungsgrades

Genauso wie die Höhe der Nachfrage stellt die Anwendung von Informationsdiensten eine Rahmenbedingung in dieser Arbeit dar, die in Form verschiedener Nutzungsgrade als Sollverteilung gesetzt wird. Folglich kann man das Modell insofern vereinfachen, als man den Ausstattungsgrad auf 100% setzt und den Nutzungsgrad so modelliert, dass die gewünschten Anteile informierter Fahrten herauskommen. Indessen könnte man auch den Ausstattungsgrad modellieren und dann einen Nutzungsgrad von 100% annehmen. Schlussendlich werden aus der Nachfrageliste zufällig so viele Fahrten ausgewählt bis der gewünschte Anteil informierter Verkehrsteilnehmer erreicht wird.

#### 3.2.1.2 Festlegung des Nutzungszeitpunktes

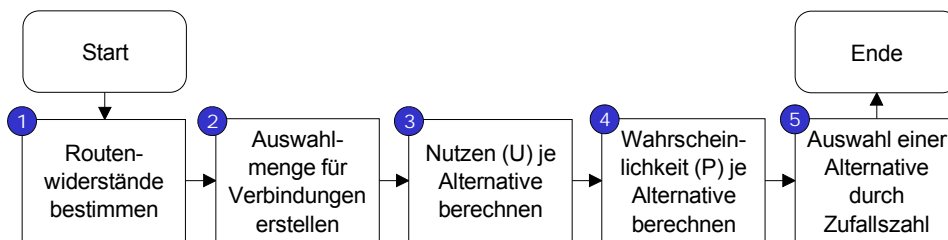
Neben der Frage, ob ein Pkw-Fahrer einen Verkehrsdienst verwendet, muss das Modell auch abbilden, wann er eine Empfehlung bekommt. Verkehrsteilnehmer können sowohl vor als auch während der Fahrt ihr Zielführungssystem nutzen. Dabei gibt es die beiden Möglichkeiten, dass eine Person selbst aktiv Informationen anfordert oder der Verkehrsdienst sich automatisch meldet, wenn aufgrund einer Veränderung der Verkehrslage die Empfehlung einer alternativen Verbindung oder Route sinnvoll ist. Aus Vereinfachungsgründen wird angenommen, dass sich die Reisenden vor Fahrtantritt immer selbst informieren und stets der letzte Abruf vor einer Fahrt modelliert wird, der dann die Grundlage für die Entscheidung über eine Route und Abfahrtszeit bildet. Außerdem ist für die Modellierung des Anfragezeitpunktes zu beachten, dass vor Fahrtbeginn noch genügend Zeit vorhanden sein muss, um auf eine Meldung mit einer Verlegung der Abfahrtszeit reagieren zu können.

**Formel 27:** 
$$ZI_{\text{Anfrage}} = (ZI_{\text{Abfahrt}} - \text{Rüstzeit}) - \text{INTEGER}(\text{Anfragezeitraum} * ZZ)$$

Da die Unsicherheit von Voraussagen umso größer wird, je weiter der Prognosehorizont ist, wurde der Zeitraum für Anfragen auf eine Stunde bzw. zwölf Fünfminutenintervalle vor der nächsten Fahrt begrenzt. Ferner wurde die Annahme getroffen, dass die Anfragezeitpunkte sich währenddessen gleich verteilen. Schließlich ergibt sich das Zeitintervall für die Anfrage  $ZI_{\text{Anfrage}}$  nach Formel 27 als Differenz aus der geplanten Abfahrt  $ZI_{\text{Abfahrt}}$  minus eine Rüstzeit und dem ganzzahligen Produkt aus der Dauer des Anfragezeitraums und einer gleichverteilten Zufallszahl (ZZ). Während der Fahrt meldet sich das Zielführungssystem mit der Empfehlung einer neuen Route automatisch.

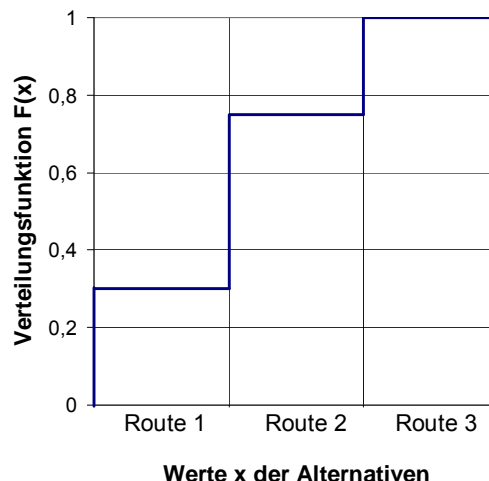
### 3.2.2 Routen- und Verbindungswahl vor Fahrtantritt

Nachdem festgelegt wurde, ob und wann jemand einen Verkehrsdienst nutzt, stellt sich die Frage, wer auf eine Meldung wie reagiert. Außerdem ist zu klären, wie ein Verkehrsteilnehmer seine Initialroute wählt und wie Fahrer ihre Abfahrtszeit aufgrund von belastungsabhängigen Preisen anpassen. Im Zusammenhang mit der Steuerung der Verkehrsnachfrage über Informationen und belastungsabhängige Preise, wäre es auch denkbar, keine Verbindung zu wählen, weil die Person ggf. ein alternatives Verkehrsmittel nutzt oder ganz auf ihre Reise verzichtet. Die Entscheidungsalternative, eine Fahrt im MIV zu unterlassen, soll in dieser Arbeit aber vernachlässigt werden, weil die Wahrscheinlichkeiten insgesamt als gering einzuschätzen sind ([3], 123-125), ([6], 183). Eine Ausnahme wäre allerdings ein Untersuchungsfall für eine City-Maut, der bei einem guten ÖV-Angebot größere Verlagerungsmengen zwischen den Verkehrsmitteln erwarten lässt.



**Abbildung 29: Ablauf der Wahl einer Verbindung vor Fahrtantritt mit Informationen**

Abbildung 29 stellt den Ablauf für die Wahl eines Weges oder einer Verbindung dar. Zuerst müssen die Widerstände berechnet werden (1). Danach können diejenigen Alternativen bestimmt werden, die in die Auswahlmenge für das Entscheidungsmodell kommen (2). Anschließend wird der Nutzen jeder Alternative berechnet (3). Schließlich kann anhand des Nutzens die Wahrscheinlichkeit ermittelt werden (4), mit welcher sich der Verkehrsteilnehmer für eine Alternative entscheidet (5).



**Abbildung 30: Verteilungsfunktion**

Die Summe der Auswahlwahrscheinlichkeiten über alle Alternativen eines Routensatzes ist gleich Eins. Da es sich bei der Routen- oder Verbindungswahl um diskrete Entscheidungen handelt, kann die Verteilungsfunktion für die Wahrscheinlichkeiten je Alternative, wie in Abbildung 30, in einer Treppenfunktion dargestellt werden ([59], 51-53). Daraus ergibt sich für jede Alternative eine Wahrscheinlichkeit, die zwischen einer unteren und oberen Grenze liegt, niemals aber kleiner Null oder größer Eins wird. Über die Monte-Carlo-Methode wird jeder Fahrt eine Zufallszahl zwischen Null und Eins zugewiesen. Mithilfe der Zufallszahl kann

dann die Alternative gewählt werden, die genau in den Bereich zwischen einer unteren und oberen Grenze für die Wahrscheinlichkeit fällt.

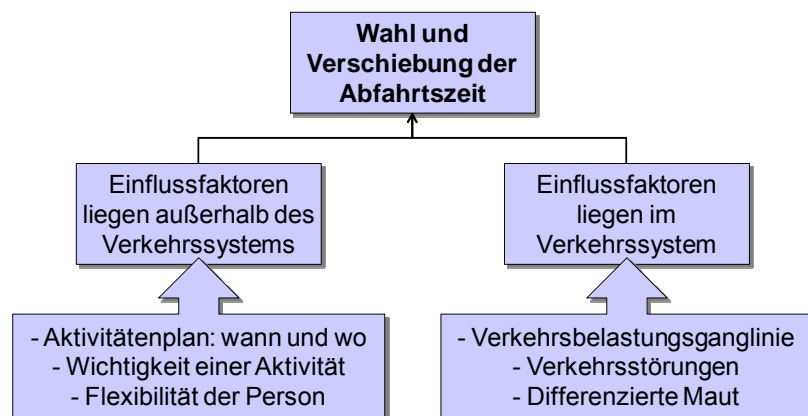
### 3.2.2.1 Einflussfaktoren

#### 3.2.2.1.1 Routenwahl

Es gibt viele objektive und subjektive Einflussfaktoren auf die Routenwahl. Die wichtigste und in empirischen Studien am häufigsten genannte Einflussgröße ist die Reisezeit. Weitere Faktoren sind z. B. die Kosten, Entfernung, Ortskenntnis, Beschilderung des Streckennetzes, Sicherheit der Strecke und eine schöne Aussicht ([12], 58-61). Ferner spielen die Erfahrungen und die Gewohnheit eine große Rolle bei der Wegewahl. Das Verhalten bildet sich in einem längeren Lernprozess aus. Häufig besitzen Menschen dann eine gewisse Trägheit, wenn es um Verhaltensänderungen geht. Daher passen Verkehrsteilnehmer ihre Routenwahl meistens nicht unmittelbar an, auch wenn die Verkehrslage sich ändert ([60], 68-71). Dies beeinflusst die Wirkung von Verkehrsinformationen und Straßenbenutzungsgebühren auf die Wegewahl. Folglich kann man davon ausgehen, dass es so etwas wie einen Schwellenwert gibt, der überschritten werden muss, bevor Verkehrsteilnehmer ihr Verhalten ändern. Einen guten Überblick auf die Grundlagen zur Routenwahl geben z. B. Bovy und Stern [18].

#### 3.2.2.1.2 Wahl der Abfahrtszeit

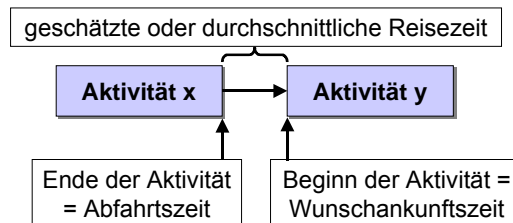
Nach Abbildung 31 kann man die Gründe für eine Verschiebung der Abfahrtszeit danach unterscheiden, ob sie verkehrssystembedingt sind oder nicht. Im Wesentlichen liegen die Einflussfaktoren auf die Wahl der Abfahrtszeit außerhalb des Verkehrssystems. Denn durch die Aktivitäten an einem Tag ist vorgegeben, wann sich jemand wo aufhalten wird. Dabei bestimmen die Wichtigkeit der Aktivität und die Flexibilität der Person die Festlegung der Wunschankunftszeit. Auswertungen zur Flexibilität und dem Grad ihrer zeitlichen Gebundenheit von Verkehrsteilnehmern stehen z. B. bei Lipps ([61], 72-73).



**Abbildung 31: Einflussfaktoren auf die Wahl der Abfahrtszeit**

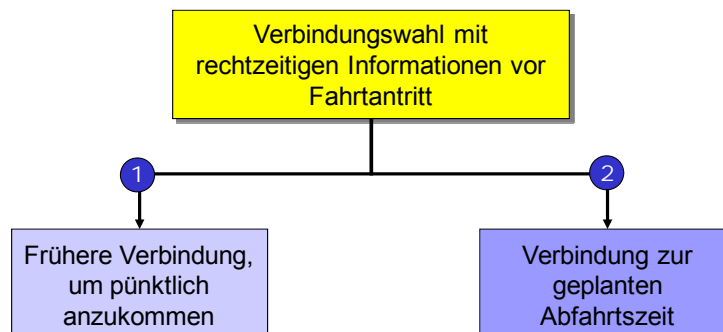
Um nicht verkehrsbedingte Verschiebungen der Abfahrtszeit abzubilden, müsste der Tagesablauf mit den Aktivitäten der Menschen simuliert werden. Dazu bräuchte man Wahrscheinlichkeiten, dass sich eine Aktivität verspätet oder früher beendet wird als erwartet. Ferner müsste man Aktivitäten individuell nach ihrer Wichtigkeit bewerten. Da es in dieser Arbeit aber nicht darum geht, Aktivitäten-basierte Ansätze zur Modellierung des Personenverkehrs zu entwickeln, werden nur verkehrssystembedingte Verschiebungen der Abfahrtszeit berücksichtigt, die durch Verkehrsinformationen oder eine Maut beeinflusst werden.

Üblicherweise legt ein Verkehrsteilnehmer die Wunschankunftszeit am Zielort aufgrund seiner geplanten Aktivität fest. Die Abfahrtszeit im MIV lässt sich dann nach Abbildung 32 berechnen, indem man die geschätzte oder durchschnittliche Reisezeit von der Wunschankunftszeit abzieht. In Abhängigkeit von der Auslastung des Straßennetzes gibt es zu unterschiedlichen Tageszeiten verschieden schnelle Verbindungen. Im Allgemeinen fährt man im Straßenverkehr zur geplanten Abfahrtszeit los, wenn man keine Störungen erwartet und voraussichtlich pünktlich ankommen wird.



**Abbildung 32: Bestimmung der Abfahrtszeit in Abhängigkeit von der Wunschankunftszeit**

Störungen des Verkehrsablaufs können zu unvorhergesehenen Verzögerungen führen. Falls ein Verkehrsdienst den Reisenden rechtzeitig über Fahrtzeiten informiert, kann er seine Abfahrtszeit auf einen früheren oder späteren Termin verschieben. Grundsätzlich kann man also zwei Motive unterscheiden. Einerseits verlegt jemand die Abfahrtszeit auf einen früheren Zeitpunkt, um trotz längerer Reisezeiten noch pünktlich oder nicht allzu spät anzukommen. Andererseits verschiebt ein Fahrer seine Abfahrtszeit auf einen früheren oder späteren Termin, um so eine hinsichtlich seines Optimierungskriteriums bessere Verbindung zu wählen. Das Optimierungskriterium kann sich nach dem individuell wichtigsten Einflussfaktor, wie z. B. der Zeit, richten. Alternativ können aber auch mehrere Einflussgrößen über eine generalisierte Kostenfunktion betrachtet werden.



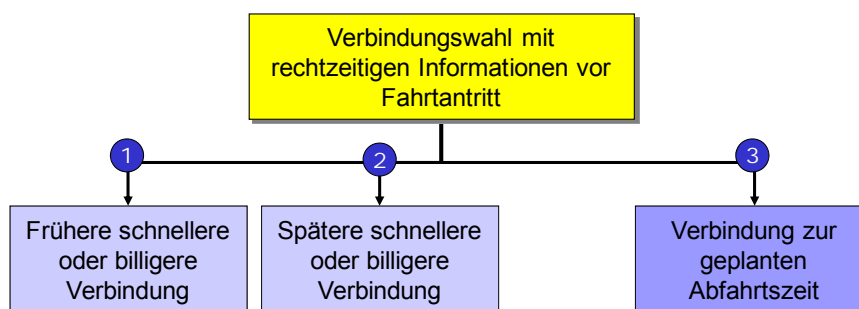
**Abbildung 33: Verschiebung der Abfahrtszeit, um pünktlich anzukommen**

Abbildung 33 zeigt die Entscheidungssituation, wenn die Wunschankunftszeit wegen Verkehrsstörungen nicht mehr erreicht werden kann. Eine Voraussetzung für die Verschiebung der Abfahrtszeit auf einen früheren Termin ist, dass man rechtzeitig informiert wird. Dabei müssen eine Trägheit mit welcher die Entscheidung getroffen wird und Rüstzeiten berücksichtigt werden. Wird ein Fahrer nicht rechtzeitig informiert, muss er eine voraussichtliche unpünktliche Ankunft in Kauf nehmen.

Grundsätzlich ist die Bereitschaft groß, die Abfahrtszeit auf einen früheren Zeitpunkt zu verschieben, wenn ein wichtiger Termin eingehalten werden muss (1). Dieser Fall tritt immer dann ein, wenn die nachfolgende Aktivität am Zielort wichtiger ist als die aktuelle Tätigkeit am Ausgangsort. Dagegen wird man sich eher dazu entscheiden, den ursprünglich gewählten Abfahrtszeitpunkt beizubehalten (2), falls die aktuelle Aktivität wichtiger ist als die nachfolgende. Somit liegt in diesem Fall die Ursache für die Entscheidung außerhalb des Verkehrssystems.

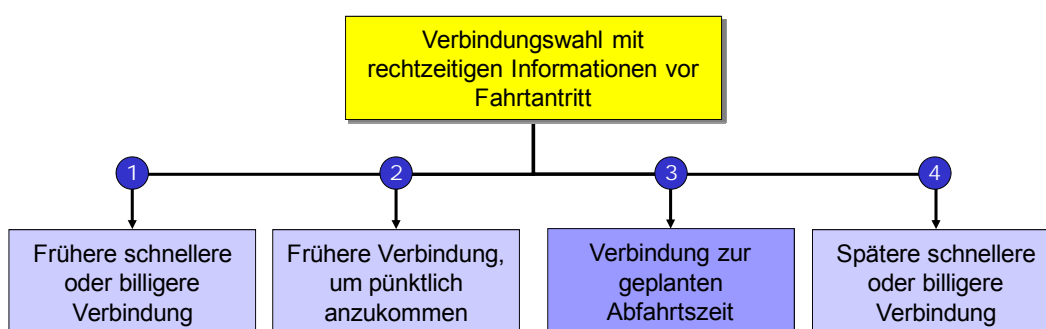


Falls es innerhalb eines Zeitraums nicht so wichtig ist, wann man ankommt bzw. losfährt, kann man die beste Route hinsichtlich der generalisierten Kosten wählen. Diese Entscheidungssituation ist in Abbildung 34 abgebildet. Dabei kann es sich entweder um eine frühere (1) oder spätere (2) Verbindung handeln. Ein Beispiel für eine Verschiebung der Abfahrtszeit, bei dem es nicht so genau auf den Zeitpunkt der Ankunft ankommt, sind Pendelwege bei flexibler Arbeitszeit oder Freizeitwege. Ferner könnten sich z. B. Eltern bei einer längeren Fahrt mit ihren Kindern für die schnellste Verbindung innerhalb einer Zeitspanne entscheiden, damit die Kinder möglichst kurz angeschnallt im Auto sitzen müssen. Generell ist davon auszugehen, dass je länger die Reise dauert oder je teurer sie wird, desto eher verschiebt eine Person die Abfahrtszeit. Außerdem ist eine Voraussetzung für die Verschiebung, dass man die durch die schnellere Reise gewonnene Zeit sinnvoll nutzen kann. Dies ist z. B. bei Aktivitäten mit Terminen nicht unbedingt der Fall.



**Abbildung 34: Verschiebung der Abfahrtszeit, um bessere Verbindung zu wählen**

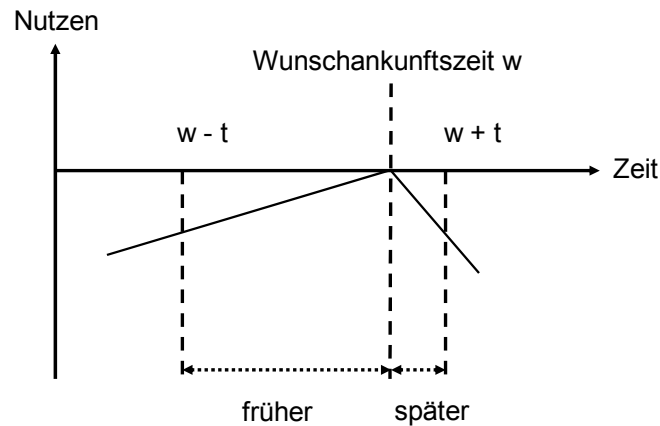
Für die Modellierung werden die beiden Entscheidungssituationen, die sich aufgrund aktueller Verkehrsinformationen ergeben, wie in Abbildung 35 zusammengefasst. Der Grund dafür ist, dass man nichts Genaues darüber weiß, wie häufig und warum sich Verkehrsteilnehmer in welchen Situationen für eine Verschiebung der Abfahrtszeit entscheiden. Es sind auch keine empirischen Daten bekannt, wie z. B. Termindruck über die Fahrtzwecke verteilt ist. Die vorliegende Studie, die in Kapitel 2.5.3 ausgewertet wurde, gibt erste Anhaltspunkte, wie sich Verkehrsteilnehmer in Zusammenhang mit Verkehrsinformationen bei der Verschiebung von Abfahrtszeiten verhalten.



**Abbildung 35: Entscheidungsalternativen vor Fahrtantritt**

Abbildung 36 zeigt den möglichen Verlauf einer Nutzenfunktion, wie Verkehrsteilnehmer zu frühes oder zu spätes Ankommen bewerten ([60], 86). Danach ist es schlimmer, zu spät anzukommen als zu früh. Denn die Nutzenfunktion verläuft flacher für frühere und steiler für spätere Ankunftszeiten. Dieser Verlauf der Nutzenfunktion deckt sich mit Befunden aus der empirischen Studie, dass Verkehrsteilnehmer stets einen Puffer bei der Reisezeit mit einrechnen. Denn auch wenn die Abfahrtszeit aufgrund einer Empfehlung vorverlegt werden soll, wird sie noch weiter nach vorne gelegt, um sicher zu sein, dass man pünktlich ankommt und um Ungenauigkeiten des Verkehrsdienstes abzufedern. Daraus lässt sich schließen,

dass man lieber etwas früher ankommt als zu spät. Da es sich bei der empirischen Studie aber um eine SP-Befragung handelte, war es relativ einfach, Zeiten zu verschieben. Schließlich ging es nicht um reale, sondern hypothetische Situationen, in denen die Personen nicht in ihren Tagesablauf mit den sich daraus ergebenden Verpflichtungen eingebunden waren.



**Abbildung 36: Nutzenfunktion bei Verschiebung der Abfahrtszeit**

### 3.2.2.2 Routen- und Verbindungswiderstände

Für die Suche von Routen oder Verbindungen benötigt man deren Widerstände. Eine Widerstandsfunktion lässt sich anhand der Einflussfaktoren aufstellen, welche die Wahl der Route und Abfahrtszeit bestimmen. Bei der Kombination mehrerer Einflussfaktoren handelt es sich um eine generalisierte Kostenfunktion. Um die einzelnen Einflussgrößen miteinander vergleichen zu können, müssen sie auf dieselbe Einheit umgerechnet werden. Dazu bietet sich z. B. an, den Widerstand in Geldeinheiten auszudrücken. Die Reisezeit kann mit Zeitkostensätzen verschiedener Personengruppen und die Entfernung über den Kraftstoffverbrauch pro Kilometer bewertet werden. Ferner kann der Preis aufgrund einer Maut direkt in die Funktion eingehen. In dem Einflussfaktor Reisezeit sind bereits andere Kriterien enthalten, wie z. B. die Anzahl Halte oder die Auslastung.

$$\text{Formel 28: } GC_k = \beta_1 * t + \beta_2 * c$$

Formel 28 beinhaltet die beiden Variablen Reisezeit ( $t$ ) und Kosten ( $c$ ) mit ihren Gewichtungsfaktoren  $\beta_1$  und  $\beta_2$  zur Berechnung der generalisierten Kosten ( $GC$ ) für eine Strecke ( $k$ ). Die Kosten beziehen sich auf die Maut und sind deshalb nur für die Untersuchungsfälle mit Straßenbenutzungsgebühren relevant. In den Fällen ohne Maut ist die Ausprägung für die Kosten gleich Null. Nachdem der Widerstand für jede Kante im Netz berechnet wurde, können mit Formel 29 die generalisierten Kosten eines Weges ( $R$ ) als Summe über die Widerstände aller Kanten ( $k$ ) des Weges ( $R$ ) berechnet werden.

$$\text{Formel 29: } GC_R = \sum_{k \in R} GC_k$$

### 3.2.2.3 Erstellung der Auswahlmenge

Die Erstellung des Routensatzes für eine QZ-Beziehung, aus dem eine Person einen Weg auswählt, ist nicht trivial. Zwar ist es relativ einfach, in einem Netz, bestehend aus Knoten und Kanten, die beste Route zu bestimmen. Es gibt aber keinen Algorithmus, der gleichzeitig die erst-, zweit- und drittbeste Route berechnet. Somit besteht die Schwierigkeit darin, aus theoretisch sehr vielen Möglichkeiten die sinnvollen Varianten herauszufiltern ([12], 51-52).

Modelltechnisch behilft man sich häufig damit, dass man bei der Routensuche iterativ vorgeht. In mehreren Schritten werden die gefundenen Wege mit einem Teil der Nachfrage belastet. Da der Widerstand in Form der Reisezeit mit zunehmender Belastung steigt, kann im nächsten Iterationsschritt ein anderer Pfad als optimale Route gefunden werden.

```
HHNr, PersNr, Q, Z, AbSek, AbZI, Zweck, Beruf, Alter
1766, 2, 3, 1, 0, 1, 4, 6, 30
1767, 1, 3, 1, 0, 1, 4, 7, 76
2925, 1, 4, 2, 0, 1, 5, 7, 68
21, 1, 1, 3, 1, 1, 5, 7, 62
1777, 2, 3, 1, 1, 1, 7, 4, 24
2940, 4, 4, 2, 1, 1, 4, 4, 18
1791, 2, 3, 1, 2, 1, 2, 2, 42
1, 1, 1, 3, 3, 1, 2, 1, 44
631, 2, 2, 4, 3, 1, 5, 1, 30
```

**Abbildung 37: Beispiel für eine Fahrtenliste**

In dieser Arbeit generiert eine dynamische Umlegung eine Routenliste für den Untersuchungszeitraum. Dafür werden entsprechend der betrachteten Netzauslastung verschiedene Nachfragemengen verwendet. Die notwendigen Matrizen werden aus einer Fahrtenliste erzeugt, indem alle Fahrtwünsche je Zeitintervall von fünf Minuten zusammengefasst werden. Abbildung 37 stellt einen Ausschnitt der Fahrtenliste dar, in der z. B. die Haushalts- (HHNr) und Personennummer (PersNr), der Ausgangs- (Q) und Zielort (Z), die Abfahrtszeit (AbSek) und das dazu gehörige Zeitintervall (AbZI) stehen.

```
Origin;Destination;Index;NumNodes;Length[m];Nodes;Bel(AP);(Bel1);(Bel2);(Bel3);(Bel4);(Bel
1;3;1;8;19700; 11 - 13 - 15 - 45 - 47 - 37 - 34 - 32;3195;75;87;95;101;104;107;110;112;11
1;3;2;12;19700; 11 - 13 - 18 - 202 - 204 - 206 - 208 - 28 - 26 - 36 - 34 - 32;2205;75;88;
2;4;1;8;19700; 21 - 23 - 26 - 36 - 38 - 48 - 44 - 42;3200;80;93;101;107;110;111;112;113;1
2;4;2;12;19700; 21 - 23 - 27 - 101 - 103 - 105 - 107 - 17 - 15 - 45 - 44 - 42;2200;80;93;
3;1;1;8;19700; 31 - 33 - 38 - 48 - 46 - 16 - 14 - 12;3197;80;95;105;111;114;116;116;117;1
3;1;2;12;19700; 31 - 33 - 35 - 25 - 27 - 101 - 103 - 105 - 107 - 17 - 14 - 12;2203;80;59;
4;2;1;8;19700; 41 - 43 - 47 - 37 - 35 - 25 - 24 - 22;3176;82;96;104;109;112;112;112;111;1
4;2;2;12;19700; 41 - 43 - 46 - 16 - 18 - 202 - 204 - 206 - 208 - 28 - 24 - 22;2224;82;61;
```

**Abbildung 38: Beispiel für eine Routenliste**

Abbildung 38 zeigt einen Ausschnitt der Wegeliste als Ergebnis der Umlegung. Sie enthält z. B. die folgenden Angaben: Quelle (Origin), Ziel (Destination), Länge (Length[m]), Knotenfolge (Nodes) sowie Belastung (Bel), Reisezeiten und Straßenbenutzungsgebühren je Zeitintervall. Zur Erstellung der Auswahlmenge mit den Alternativen für die Wege- oder Verbindungswahl müssen Routen- und Fahrtenliste miteinander verglichen werden. Anhand der Angaben über eine Fahrt können dann die infrage kommenden Wege aus der Routenliste für die Auswahlmenge zusammengestellt werden. Die genaue Vorgehensweise wird in den folgenden Kapiteln erläutert.

### 3.2.2.3.1 Initialroute

Unabhängig davon, ob ein Pkw-Fahrer Verkehrsinformationen nutzt oder nicht, wird vor Fahrtbeginn immer ein Routensatz erzeugt, aus dem er eine Initialroute wählt. Dahinter steht die Annahme, dass eine Person mit Beginn ihrer Reiseplanung stets eine grobe Vorstellung darüber hat, auf welcher Route sie ans Ziel kommt. Außerdem legt sie in Abhängigkeit von der geschätzten Reise- und Wunschankunftszeit ihre geplante Abfahrtszeit fest. Eine Vorstellung über die Route und Reisezeit erhält der Verkehrsteilnehmer z. B. über seine Ortskenntnis. Alternativ kann er sich auch mit einer Karte oder bei anderen Personen informieren. Daher handelt es sich stets um subjektive Einschätzungen und individuelle Präferenzen, wobei den Fahrern meistens bewusst ist, dass zu verschiedenen Zeitpunkten unterschiedliche Wege optimal sein können.

Für die Erstellung der Initialrouten kann also davon ausgegangen werden, dass sie nicht exakt die tatsächlich zu erwartenden Verkehrszustände zur geplanten Abfahrtszeit widerspiegeln, sondern die allgemeinen Erfahrungen aller Verkehrsteilnehmer, die sie sich über einen längeren Lernprozess angeeignet haben. Um die verschiedenen persönlichen Einschätzungen der Verkehrsteilnehmer widerzuspiegeln, können die Widerstände bei der Routensuche zufällig variiert werden ([56], 2-185). Somit werden bei einer Umlegung nicht immer die Wege mit den objektiv besten Widerständen gewählt. Reduzierte Streckenkapazitäten wegen spontaner Verkehrsstörungen werden nicht gesetzt, weil sie nicht zur Routine der Verkehrsteilnehmer gehören. Das Suchkriterium ist die Reisezeit.

### 3.2.2.3.2 Verbindungen bei Nutzung von Verkehrsinformationen vor der Fahrt

Der Routensatz für die Wahl einer Verbindung mit Pre-Trip-Informationen basiert auf den Berechnungen des Verkehrsdienstes. Für die Wegesuche wird nach der Reisezeit optimiert. Ferner berücksichtigt der Verkehrsdienst in den entsprechenden Zeitintervallen Kapazitätsreduzierungen aufgrund von spontan auftretenden Störungen. Die Auswahlmenge besteht, wie in Abbildung 35 dargestellt, aus ein bis vier Verbindungen. Bei der ersten Alternative handelt es sich stets um die Initialroute mit der entsprechend berechneten Startzeit. Außerdem sucht der Verkehrsdienst anhand der aktuellen Datenlage eine neue Verbindung, um pünktlich zum gewünschten Termin anzukommen. Falls das neu berechnete vor dem geplanten Zeitintervall für die Abfahrt liegt, müsste der Verkehrsteilnehmer seine Startzeit auf früher verlegen, um sein Ziel noch zur Wunschankunftszeit zu erreichen.

Ferner können zur Auswahlmenge noch eine weitere, frühere und eine spätere Verbindung hinzukommen. Dafür müssen deren generalisierte Kosten unter dem Wert der Verbindung liegen, um pünktlich anzukommen, der zusätzlich um einen Prozentsatz  $\pi$  verkleinert wird. Die prozentuale Verringerung des Vergleichswertes geht auf empirische Erkenntnisse ein, wonach Verkehrsteilnehmer ihre Abfahrtszeit oder Routenwahl erst verändern, wenn ein Schwellenwert für eine Verbesserung überschritten ist ([18], 117). Für diese Untersuchung wird für  $\pi$  ein mittlerer Wert von 0,1 angenommen. Folglich muss die Alternative im Durchschnitt mindestens zehn Prozent besser sein, bevor sie in die Entscheidung mit einbezogen wird. Um die verschiedenen persönlichen Präferenzen abzubilden, wurde der Wert von  $(1-\pi)$  zufällig variiert. Für die Streuung wurde eine Normalverteilung mit einer Standardabweichung von 0,025 angenommen. Letztlich ist der Schwellenwert ein Maß für die Trägheit der Verkehrsteilnehmer, ihr Verhalten zu ändern.

Einerseits gibt es Sachzwänge, wonach ein früherer Abfahrtszeitpunkt nicht in der Vergangenheit und eine spätere Startzeit nicht außerhalb des Untersuchungszeitraumes liegen dürfen. Andererseits sind Menschen in ihrer Terminplanung nicht unbegrenzt flexibel. Daher wurde für die Verbindungswahl die Annahme getroffen, dass Verkehrsteilnehmer ihren Abfahrtszeitpunkt maximal 20 Minuten nach vorne oder hinten verlegen. Die folgenden beiden Regeln fassen die Vorgehensweise noch einmal zusammen. Dabei ist der Ausgangspunkt für die Suche einer früheren oder späteren Verbindung immer das Intervall  $ZI_i$  mit der geplanten Abfahrtszeit für die Route, um pünktlich anzukommen.

1. Wenn in einem früheren Zeitintervall  $ZI_{i,j}$  eine Route gefunden wird, für welche die generalisierten Kosten  $GC_{ZI=i,j} \leq (1-\pi) * GC_{ZI=i}$  sind, und wenn das neue Zeitintervall  $ZI_{i,j}$  nicht in der Vergangenheit liegt ( $ZI_{i,j} > ZI_{\text{aktuell}}$ ), dann wähle diese als weiteren Alternativvorschlag für eine frühere Verbindung.

2. Wenn in einem späteren Zeitintervall  $ZI_{i+j}$  eine Route gefunden wird, für welche die generalisierten Kosten  $GC_{ZI=i+j} \leq (1-\pi) * GC_{ZI=i}$  sind, und wenn das neue Zeitintervall  $ZI_j$  nicht außerhalb des Untersuchungszeitraumes liegt ( $ZI_{i+j} < ZI_{max}$ ), dann wähle diese als zusätzlichen Alternativvorschlag für eine spätere Verbindung.

Findet der Verkehrsdienst keine bessere frühere oder spätere Verbindung, reduziert sich entsprechend die Auswahlmenge. Auf jeden Fall enthält der Routensatz aber die ursprünglich geplante Verbindung. Falls es in einem Zeitintervall mehrere beste Routen gibt, die gleich gut sind, muss eine Zufallsauswahl getroffen werden. Dabei erhält jede Route dieselbe Wahrscheinlichkeit, in die Auswahlmenge zu kommen.

### 3.2.2.3.3 Verbindungen bei belastungsabhängigen Preisen

Für die Untersuchungen mit Straßenbenutzungsgebühren wird angenommen, dass der Preis über Informationsdienste allen Verkehrsteilnehmern bekannt ist und damit einen Einfluss auf die Abfahrtszeit ausübt. Folglich besteht das Optimierungskriterium für die Routensuche aus einem generalisierten Wert, der Reisezeit und Kosten miteinander verrechnet.

Ferner muss eine Verbindungswahl durchgeführt werden, wobei die Verkehrsteilnehmer eine frühere und spätere Alternative in Betracht ziehen. Die erste Alternative in der Auswahlmenge ist immer die Initialroute. Ferner werden die beiden im vorangehenden Abschnitt beschriebenen Regeln angewendet. Somit wird erneut, ausgehend von dem geplanten Abfahrtszeitraum, jeweils die nächst frühere und spätere Route gesucht, für welche die generalisierten Kosten im Mittel mindestens um 10% niedriger liegen als für den Weg zur ursprünglich geplanten Startzeit.

Eigentlich ist es nicht notwendig, die Abfahrtszeit in Zeitintervallen, d. h. diskreten Zeitschritten, zu verschieben. Denn die Entscheidung über den Startzeitpunkt könnte auch kontinuierlich optimiert werden. Dies widerspricht aber der Erfahrung, wonach man seine Abfahrtszeit eher auf kleinere Zeitintervalle eingrenzt als sie genau auf einen bestimmten Zeitpunkt festzulegen ([60], 86).

### 3.2.2.4 Schätzung der Modellparameter

#### 3.2.2.4.1 Aufbereitung der Daten für die Parameterschätzung

Die Entscheidungen der Verkehrsteilnehmer für eine Verbindung sollen durch ein multinomiales Logit-Modell abgebildet werden. Zur Parameterschätzung für die Nutzenfunktion des Modells dienen die Daten aus der empirischen Studie, die in Kapitel 2.5 vorgestellt wurde. In den Befragungssituationen ging es darum, simulierte Fahrten zwischen Karlsruhe und Mannheim am Computer durchzuführen. Es standen immer dieselben fünf Alternativen zur Auswahl, die in Tabelle 5 aufgelistet sind.

Nummer	Name	Entfernung	Reisezeit (t0)
1	A5/A6	69 km	49 Min
2	A5/A656	71 km	50 Min
3	B36	63 km	68 Min
4	B36/A6	62 km	59 Min
5	B9	70 km	63 Min

**Tabelle 5: Alternative Route zwischen Karlsruhe und Mannheim in Auswahlmenge**

Die Unterschiede zwischen den Routen liegen im Fahrt- und Personenkontext. So gibt es z. B. verschiedene Reisezeiten, Kosten, Fahrtzwecke, Abfahrts- bzw. Ankunftszeiten und Verkehrssituationen. Da sich die Erhebung auf eine ganz konkrete QZ-Relation bezieht und die Ergebnisse aber in einem anderen Straßennetz angewendet werden sollen, werden die Modellparameter ohne die für eine Alternative spezifische Konstante berechnet.

Für die Parameterschätzung wurden diejenigen Entscheidungssituationen herangezogen, in denen der individuelle Informationsdienst zwei alternative Empfehlungen gegeben hat. Die eine Meldung bezog sich auf eine Verbindung, um pünktlich zur Wunschankunftszeit das Ziel zu erreichen und die andere auf eine schnellere oder bezüglich der Maut kostengünstigere Route mit alternativer Abfahrtszeit. Bei der letzteren würde der Verkehrsteilnehmer nicht mehr zur Wunschankunftszeit eintreffen, sondern in einem größeren Zeitraum davor oder danach. Folglich bestand die Auswahlmenge immer aus sechs Alternativen, wobei zwei Wahlmöglichkeiten jeweils eine Empfehlung des Verkehrsdienstes darstellten. Außerdem wurden anhand von drei Szenarien verschiedene Rahmenbedingungen je virtueller Fahrt gesetzt. Daher werden die Parameter für die Untersuchungsfälle ohne Maut anhand der Daten aus Szenario II und mit Straßenbenutzungsgebühren aus Szenario III geschätzt.

**Männlich**

<b>Variable</b>	<b>N</b>	<b>Mean</b>	<b>Std Dev</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>
<b>A5/A6</b>	1362	49	13	20	100
<b>A5/A565</b>	1350	54	14	25	105
<b>B36</b>	1266	69	19	25	135
<b>B36/A6</b>	1266	59	16	21	115
<b>B9</b>	1440	64	18	30	120

**Weiblich**

<b>Variable</b>	<b>N</b>	<b>Mean</b>	<b>Std Dev</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>
<b>A5/A6</b>	1188	52	16	20	120
<b>A5/A565</b>	1086	58	19	25	160
<b>B36</b>	1080	72	20	30	135
<b>B36/A6</b>	1080	62	17	26	115
<b>B9</b>	1284	67	22	30	150

**Tabelle 6: Geschätzte Fahrtzeiten je Route vor dem Simulationsspiel**

Die Entscheidungssituation in der empirischen Studie war so aufgebaut, dass dem Probanden nur für die durch den Verkehrsdienst empfohlenen Routen die Reisezeit und Kosten vorgegeben waren. Für die übrigen Alternativen wurden keine Angaben gemacht, weil der angenommene Verkehrsdienst für die Routensuche immer nur den besten Weg berechnet und empfiehlt. Daher musste der Teilnehmer für die anderen Routen vor jeder Entscheidung eigene Annahmen treffen. Zur Erhebung der individuellen Einschätzung der Reisezeiten wurde jede Person zu Beginn der Befragung aufgefordert, die vermutete Reisezeit je Route nennen. Folglich könnten anhand der Eingaben die fehlenden Werte für die Parameterschätzung vervollständigt werden.

Das Ergebnis für die geschätzte, mittlere Reisezeit in Minuten (Mean) mit den Werten für die Standardabweichung (Std Dev), das Minimum (Min) und Maximum (Max) je Route steht in Tabelle 6. Vergleicht man die Mittelwerte mit Zahlen aus der Routenplanung in Tabelle 5 fällt auf, dass diese sehr nahe beieinander liegen. Außerdem kann man feststellen, dass die Frauen im Mittel stets eine etwas höhere Reisezeit schätzen als die Männer. Anhand der Minima und Maxima kann man erkennen, dass es für alle Routen in beide Richtungen Extrem-

werte gibt. Diese hohen Abweichungen, insbesondere hinsichtlich einer sehr schnellen Reisezeit, lassen Eingabefehler, vorschnelle Antworten (z. B. Stadtgrenze zu Stadtgrenze), mangelnde Erfahrung oder einfach eine verzerrte Wahrnehmung vermuten. Auch wenn es nach oben eine größere Toleranz geben sollte, weil die Reisezeit in Abhängigkeit von der Auslastung stark ansteigen kann, gibt es zumindest nach unten eine physische Grenze, wie schnell man mit dem Pkw fahren kann, um ans Ziel zu kommen. Aufgrund der teilweise extremen Abweichungen sind die Einschätzungen aus der Eingangsbefragung eher ungeeignet, um die fehlenden Reisezeiten zu ergänzen.

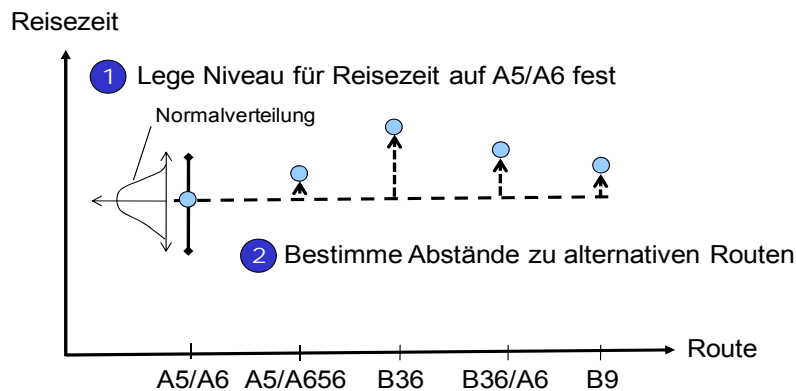
Route	Name	Szenario	N	Mean [Min]	StdDev	Min [Min]	Max [Min]	Rz [Min]
1	A5/A6	1	298	714	14.8	660	750	66
		2	276	717	12.3	630	750	63
		3	301	719	9.9	680	750	61
2	A5/A656	1	203	714	15.2	660	760	66
		2	110	715	12.6	670	740	65
		3	109	717	11.5	660	738	63
3	B36	1	71	706	18.5	630	760	74
		2	63	709	12.0	690	760	71
		3	44	706	11.3	690	720	74
4	B36/A6	1	27	708	24.1	645	760	72
		2	25	710	11.4	690	731	70
		3	17	717	8.1	700	730	63
5	B9	1	95	709	16.0	660	760	71
		2	73	707	14.1	648	727	73
		3	53	707	14.1	660	725	73

**Tabelle 7: Abfahrtszeiten je Route und Szenario**

Eine weitere Möglichkeit zur Vervollständigung der Daten besteht darin, anhand der für die virtuellen Fahrten tatsächlich gewählten Abfahrtszeiten und der Wunschankunftszeit die durchschnittlich vermutete Reisezeit auf einer Route zu berechnen. Ein Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass Erfahrungen aus der vorangegangenen virtuellen Fahrt berücksichtigt werden können und die Werte besser zum Kontext der Befragung passen.

Tabelle 7 zeigt die Stichprobengröße (N) und die Mittelwerte (Mean) für die gewählten Abfahrtszeiten je Route. In den Befragungssituationen variierte die Wunschankunft zwischen 9:00, 13:00 und 19:00 Uhr. Um eine möglichst große Menge von Beobachtungen je Route und Szenario zu erhalten, wurden die Wunschankunftszeiten für die Auswertung auf 13:00 Uhr normiert, was 780 Minuten entspricht. Demzufolge wurden auch die Abfahrtszeiten angepasst. Außerdem enthält die Tabelle die Standardabweichungen (StdDev), Minima (Min) und Maxima (Max). Durch einen Vergleich der Standardabweichungen je Route ist ein Lernprozess zu beobachten, weil die Werte vom ersten bis zum dritten Szenario immer kleiner werden. Ferner wurde anhand der Wunschankunftszeit die vermutete, durchschnittliche Reisezeit (Rz) berechnet. Diese ist pro Route etwas höher als bei den Schätzungen aus der Eingangsbefragung in Tabelle 6 oder den Berechnungen des Routenplaners in Tabelle 5.

Ein möglicher Grund dafür ist, dass die Probanden in der Befragung davon ausgehen konnten, dass es während der virtuellen Fahrt zu Störungen im Verkehrsablauf kommen kann. Somit wurde wahrscheinlich ein Puffer mit eingeplant, um trotzdem noch pünktlich ans Ziel zu kommen.



**Abbildung 39: Vorgehensweise zu Bestimmung der geschätzten Reisezeit einer Route**

Schließlich wurde anhand der Auswertungen die in Abbildung 39 dargestellte Vorgehensweise gewählt, um die fehlenden Reisezeiten für die Parameterschätzung zu ergänzen. Dafür wurde die Annahme getroffen, dass die Vorstellung über die Reisezeit einer Route in der Bevölkerung normalverteilt ist. Dann wird die geschätzte Reisezeit für die schnellste Route über die A5/A6 zufällig aus normal verteilten Werten gezogen (1). Der Mittelwert und die Standardabweichung für die verwendete Normalverteilung entsprechen den in der Erhebung beobachteten Werten aus dem zweiten bzw. dritten Szenario für die Untersuchungsfälle ohne bzw. mit Straßenbenutzungsgebühren. Indem die Werte der zweiten und dritten virtuellen Fahrt benutzt werden, sind die Lerneffekte in den Daten enthalten. Ausgehend von der geschätzten Reisezeit für die objektiv schnellste Route über die A5/A6 ergeben sich die vermuteten Reisezeiten für die übrigen Wege, indem die spezifischen, zeitlichen Abstände addiert werden (2). Dies wurde deshalb so gemacht, weil meistens die Rangfolge richtig eingeschätzt wurde. Ferner hätte bei einer weiteren zufälligen Auswahl der Reisezeit für jede einzelne Route die Streuung so stark sein können, dass plötzlich eine andere Route die Schnellste wird.

Für die Untersuchungsfälle mit Straßenbenutzungsgebühren muss zusätzlich ein Parameter für die Maut geschätzt werden. Während der Durchführung einer virtuellen Fahrt berechnet das Programm zwar die Kosten für alle Routen. Wie bei der Reisezeit gibt der Verkehrsdienst aber nur die Werte für die empfohlenen Routen aus. Daher müssen für die Parameterschätzung erneut Annahmen für die fehlenden Werte getroffen werden. Für die Befragungssituationen war den Probanden bekannt, dass die Höhe der Gebühr von der Störung auf einer Route abhing, um den Preis abhängig von der Auslastung zu gestalten. Neben den empfohlenen Routen weist der Verkehrsdienst in Anlehnung an den heutigen Verkehrsfunk im Radio auf Störungen im relevanten Netzabschnitt hin. Folglich konnten die Teilnehmer der Studie anhand der Störungsmeldung darauf schließen, dass es auf anderen Strecken womöglich kostengünstiger oder teurer ist. Daher wurde die Annahme getroffen, dass die vom Programm berechneten Mautgebühren den Einschätzungen der Verkehrsteilnehmer entsprechen und für die Parameterschätzung verwendet werden können.



### 3.2.2.4.2 Ohne Straßenbenutzungsgebühren

Tabelle 8 enthält das Ergebnis der Parameterschätzung für die Verbindungswahl ohne Maut. Die Daten stammen aus dem Szenario II der empirischen Studie mit einer Stichprobengröße  $n=171$ . Die Schätzwerte stellen die Parameter der Variablen Reisezeit, frühere und spätere Ankunft sowie Empfehlung einer Route für eine pünktliche Ankunft dar. Der Standardfehler ist ein Maß für die Streuung des Schätzwertes. Der t-Wert ergibt sich, wenn man den Schätzwert durch den Standardfehler teilt. Anhand der Stichprobengröße und des t-Wertes kann man mithilfe der t-Verteilung feststellen, unter welches Signifikanzniveau der Schätzwert fällt. Anhand des p-Wertes in der letzten Spalte der Tabelle kann man dann direkt ablesen, wie wahrscheinlich die Signifikanz des Schätzwertes ist.

Variable	Schätzwert	Standardfehler	t-Wert	p-Wert
Reisezeit	-0,1070	0,0126	-8,50	< 0,0001
Frühere Ankunft	-0,0361	0,0131	-2,76	0,0058
Spätere Ankunft	-0,0755	0,0170	-4,44	< 0,0001
Empfehlung für pünktliche Ankunft	1,3448	0,1817	7,40	< 0,0001

**Tabelle 8: Parameter für die Verbindungswahl ohne Preise**

In Tabelle 8 haben z. B. die Parameter der Variablen Reisezeit, spätere Ankunft und Empfehlung für eine pünktliche Ankunft einen p-Wert kleiner als 0,0001. Folglich sind die Schätzwerte selbst auf einem extrem niedrigeren Niveau mit einer Wahrscheinlichkeit von über 99,99% signifikant. Damit bilden sie mit einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit das Entscheidungsverhalten ab. Auch der Parameter für die frühere Ankunft liegt mit einem p-Wert von 0,0058 mit einer Wahrscheinlichkeit von über 99% auf einem sehr hohen Signifikanzniveau.

Die Einheit für die Reisezeit wird in Minuten angegeben. Daraus folgt ein Wert von - 6,42 für die Bewertung einer Stunde Reisezeit. Das negative Vorzeichen ist plausibel, weil es bedeutet, dass der Abschlag vom Nutzen umso höher ist, je länger die Reise dauert. Das gleiche gilt auch für eine frühere und spätere Ankunft. Je größer die Abweichung von der Wunschankunftszeit wird, desto größer ist der Nutzenverlust. Das Verhältnis zwischen den Schätzwerten einer früheren und späteren Ankunftszeit beträgt ca. 2,1. Folglich ist es ungefähr doppelt so schlecht, später anzukommen als zu früh. Dieses Ergebnis bestätigt die Theorie in Abbildung 36, dass Verkehrsteilnehmer es als schlimmer empfinden, zu spät anzukommen als zu früh. Außerdem kann man am Vorzeichen sehen, dass die Empfehlung einer Route, um pünktlich anzukommen, einen positiven Einfluss auf die Entscheidung der Verkehrsteilnehmer hatte. Folglich wurde in der Studie dem Verkehrsdienst ein großes Vertrauen entgegen gebracht, sodass der Befolgungsgrad sehr hoch ausfiel. Die Modellgüte, die z. B. der Likelihood-Ratio Index (LRI) von McFadden misst, liegt bei einem Wert von 0,3784. Der LRI kann einen Wert zwischen Null und Eins annehmen, wobei die Modellgüte umso besser ist, je mehr der Wert der Eins annähert.

Variable	Schätzwert	Standardfehler	t-Wert	p-Wert
Reisezeit	-0,1026	0,0108	-9,51	< 0,0001

**Tabelle 9: Parameter für die Wahl einer Initialroute ohne Preise und beim Verkehrsdienst**

Für die Berechnung der Routensätze mit einem dynamischen Umlegungsverfahren in VISUM werden die Parameter für ein Modell ohne Informationen benötigt. Damit bleibt nur die Reisezeit als relevante Variable übrig. Die Ausgabewerte für den Parameter stehen in Tabelle 9. Danach erfüllt die Reisezeit den Signifikanztest auf einem sehr hohen Niveau von 99,99%. Ferner lässt sich ein Wert von -6,156 für die Bewertung einer Stunde ableiten. Das negative Vorzeichen ist, wie oben bereits erläutert, plausibel. Die Modellgüte fällt mit einem LRI von 0,2154 nicht besonders hoch aus, was aber damit begründet werden kann, dass nur eine Variable für die Parameterschätzung berücksichtigt wird. Denn grundsätzlich steigt die Modellgüte mit der Anzahl an Variablen mit signifikanten Parameterwerten, weil es mehr Faktoren gibt, die zur Erklärung des Entscheidungsverhaltens beitragen.

### 3.2.2.4.3 Mit Straßenbenutzungsgebühren

Die Daten für die Parameterschätzung mit Straßenbenutzungsgebühren stammen aus dem Szenario III in der empirischen Studie mit einer Stichprobengröße  $n=203$ . Für die Untersuchung mit einer Maut ist davon auszugehen, dass die Verkehrsteilnehmer die Preise für die Straßenbenutzung ungefähr kennen und diese bei der Wahl einer Verbindung berücksichtigen. Daher kommen für die Wahl einer Verbindung nach Tabelle 10 zu den Variablen Reisezeit, frühere und spätere Ankunft noch die Kosten hinzu. Alle Schätzwerte haben einen p-Wert kleiner 0,0001 und sind damit hochsignifikant.

Variable	Schätzwert	Standardfehler	t-Wert	p-Wert
Reisezeit	-0,0783	0,0127	-6,16	< 0,0001
Mautkosten	-0,4666	0,0592	-7,88	< 0,0001
Frühere Ankunft	-0,0585	0,0123	-4,76	< 0,0001
Spätere Ankunft	-0,1853	0,0286	-6,47	< 0,0001

**Tabelle 10: Parameter für die Wahl der Initialroute mit Preisen**

Durch Multiplikation des Schätzwertes für die Reisezeit mit 60 lässt sich ein Zeitkostensatz von ca. 4,7 Geldeinheiten pro Stunde berechnen. Der Nutzenabschlag für eine frühere Ankunft lässt sich durchschnittlich mit 3,51 Geldeinheiten pro Stunde und für eine spätere Ankunft mit ca. 11,12 Geldeinheiten pro Stunde berechnen. Außerdem ergibt sich aus dem Vergleich der Schätzwerte von früherer und späterer Ankunft, dass es ca. 3,2 Mal schlechter ist, zu spät anzukommen als zu früh. Im Vergleich zum Untersuchungsfall ohne Straßenbenutzungsgebühren kann man feststellen, dass es mit Preisen noch wichtiger ist pünktlich oder zumindest früher anzukommen als ohne. Schließlich hat man für die schnellere Route bezahlt und will entsprechend nicht zu spät kommen. Der LRI zur Beschreibung der Modellgüte beträgt 0,4815.

Variable	Schätzwert	Standardfehler	t-Wert	p-Wert
Reisezeit	-0,0826	0,0111	-7,43	< 0,0001
Mautkosten	-0,4019	0,0524	-7,67	< 0,0001

**Tabelle 11: Parameter für die Routenwahl mit Preisen und Verkehrsdienst**

Für die Erstellung der Routensätze mit Umlegungen in VISUM werden jetzt neben der Reisezeit auch die Mautkosten berücksichtigt. Die zeitliche Verschiebung von Fahrten wird bereits über die angepassten Fahrtenmatrizen berücksichtigt, die nach einer Verbindungswahl

in jedem Zeitintervall neu erstellt werden. In Tabelle 11 stehen die Ergebnisse der relevanten Parameterwerte für die Umlegung. Folglich ergibt sich ein Zeitkostensatz von ca. 4,96 Geldeinheiten pro Stunde. Der Wert für den LRI liegt bei 0,344.

Es wurden bei allen Berechnungen auch noch andere Variablen zum Fahrtkontext, wie z. B. Fahrtzweck oder sozioökonomische Eigenschaften der Personen wie Alter und Geschlecht in die Parameterschätzung einbezogen. Sie erwiesen sich aber alle als nicht signifikant und wurden deshalb wieder herausgenommen.

### 3.2.2.5 Entscheidungen

#### 3.2.2.5.1 Wahl einer Initialroute

Das Ergebnis der Wahl einer Initialroute dient dazu, die Ausgangslage zu beschreiben, wo sich das Verkehrssystem in einem eingeschwungenen, statischen Zustand befindet. Daher kann das Umlegungsergebnis übernommen werden, das bereits die Routenwahl für eine betrachtete Nachfragemenge enthält. Somit handelt es sich um ein einfaches Verfahren, das die Fahrten anhand einer Zufallsauswahl auf die gefundenen Routen aufteilt. Die Auswahlwahrscheinlichkeiten ergeben sich aus den Belastungsanteilen im Umlegungsergebnis. Mithilfe der Initialroute und der Wunschankunftszeit kann schließlich die geplante Abfahrtszeit berechnet werden.

#### 3.2.2.5.2 Verbindungswahl bei Nutzung von Verkehrsinformationen vor der Fahrt

Die Auswahlmenge für die Wahl einer Verbindung mit Pre-Trip-Informationen besteht aus ein bis vier Alternativen. Aus der in Kapitel 3.2.2.5.1 beschriebenen Wahl einer Initialroute ergibt sich die Verbindung mit der geplanten Abfahrtszeit. Ferner kann es noch eine spätere und zwei frühere Alternativen geben.

$$\text{Formel 30: } U_R = \lambda_1 * t_R + \lambda_2 * t_{früh} + \lambda_3 * t_{spät} + \lambda_4 * Empf$$

Zur Abbildung der Entscheidung wird ein Logit-Modell verwendet, das als diskretes Wahlmodell in Kapitel 2.4.5.2 kurz erläutert wurde. Entsprechend wird nach Formel 30 für jede Routenalternative der Nutzen ( $U_R$ ) berechnet, der von den Ausprägungen der Variablen und den geschätzten Parametern  $\lambda_1$  bis  $\lambda_4$  abhängt. Die Schätzwerte für die Parameter stehen in Kapitel 3.2.2.4.2. Die Nutzenfunktion besteht aus den Variablen Reisezeit  $t_R$  sowie den Zeiten  $t_{früh}$  und  $t_{spät}$  für das Delta zwischen Wunschankunft und wahrscheinlicher Ankunftszeit. Die Werte der Variablen  $t_{früh}$  bzw.  $t_{spät}$  sind ungleich Null, wenn es sich um eine auf früher bzw. später verschobene Route handelt. Außerdem enthält die Funktion die binäre Variable „Empfehlung für eine pünktliche Ankunft“ (Empf). Sie nimmt den Wert Eins an, wenn die Route vom Verkehrsdienst empfohlen wurde, um noch pünktlich zur Wunschankunftszeit anzukommen. Ansonsten erhält die Variable die Ausprägung Null. Die Wahrscheinlichkeit für die Auswahl einer Alternative berechnet sich im Logit-Modell nach Formel 31.

$$\text{Formel 31: } p(R_j) = \frac{e^{U_j}}{\sum_i e^{U_i}}$$

Anhand von Zufallszahlen aus einer Monte-Carlo-Simulation wählt jeder Fahrer seine Verbindung. Wenn eine frühere oder spätere Alternative gewählt wird, muss noch der Abfahrts-

zeitpunkt in Sekunden angepasst werden. Hierfür wird einfach die Verschiebungszeitspanne  $t_{\text{früh}}$  bzw.  $t_{\text{spät}}$  von der geplanten Abfahrtszeit in Sekunden abgezogen bzw. addiert.

```
2925;1;4;2;0;0.3133728096861713;41 - 43 - 46 - 16 - 18 - 202 - 204 - 206 - 208 - 28 - 24 - 22;7;100
1767;1;3;1;0;0.6376553825656349;31 - 33 - 35 - 25 - 27 - 101 - 103 - 105 - 107 - 17 - 14 - 12;6;100
1766;2;3;1;0;0.7285716185459313;31 - 33 - 35 - 25 - 27 - 101 - 103 - 105 - 107 - 17 - 14 - 12;6;100
2940;4;4;2;1;0.21993047853345227;41 - 43 - 46 - 16 - 18 - 202 - 204 - 206 - 208 - 28 - 24 - 22;7;10
1777;2;3;1;1;0.9485548989501372;31 - 33 - 38 - 48 - 46 - 16 - 14 - 12;5;1000;999;0.3491153566248833
21;1;1;3;1;0.19664638257590616;11 - 13 - 18 - 202 - 204 - 206 - 208 - 28 - 26 - 36 - 34 - 32;1;1000
1791;2;3;1;2;0.7195408645711918;31 - 33 - 35 - 25 - 27 - 101 - 103 - 105 - 107 - 17 - 14 - 12;6;100
1802;1;3;1;3;0.2670671321457725;31 - 33 - 35 - 25 - 27 - 101 - 103 - 105 - 107 - 17 - 14 - 12;6;100
631;2;2;4;3;0.8533261036883868;21 - 23 - 27 - 101 - 103 - 105 - 107 - 17 - 15 - 45 - 44 - 42;4;1000
1;1;1;3;3;0.04660199737230353;11 - 13 - 18 - 202 - 204 - 206 - 208 - 28 - 26 - 36 - 34 - 32;1;1000;
2982;1;4;2;5;0.2191913280438077;41 - 43 - 46 - 16 - 18 - 202 - 204 - 206 - 208 - 28 - 24 - 22;7;100
```

**Abbildung 40: Eingabeliste für die Simulation**

Abschließend speichert das Programm die gewählte Verbindung in der Fahrtenliste, welche die Eingangsgrößen für die Verkehrsflusssimulation enthält. Einen Ausschnitt der Liste zeigt Abbildung 40. Sie enthält u. a. die durch Semikola getrennten Werte für die Haushalts- und Personennummer des Verkehrsteilnehmers, Quelle, Ziel, Abfahrtszeit für die Fahrt, eine Zufallszahl, die Knotenfolge der Route und die Angabe, ob der Fahrer Informationsdienste nutzt oder nicht sowie weitere Variablenausprägungen.

### 3.2.2.5.3 Verbindungswahl bei belastungsabhängigen Preisen

Die Auswahlmenge für die Verbindungswahl mit Straßenbenutzungsgebühren besteht aus ein bis drei Alternativen. Die erste Alternative ist immer die Initialroute. Außerdem können noch eine frühere und spätere Verbindung hinzukommen. Die Entscheidungen werden wie im vorangehenden Kapitel mit einem Logit-Modell abgebildet. Die dazugehörige Nutzenfunktion steht in Formel 32.

$$\text{Formel 32: } U_R = \lambda_1 * t_R + \lambda_2 * c_R + \lambda_3 * t_{\text{früh}} + \lambda_4 * t_{\text{spät}}$$

Die Variablen sind die Reisezeit  $t_R$ , die Kosten aufgrund einer Maut  $c_R$  sowie die Zeiten  $t_{\text{früh}}$  und  $t_{\text{spät}}$ . Die Schätzwerte für die Parameter können aus Kapitel 3.2.2.4.3 übernommen werden.

## 3.2.3 Routenwahl während der Fahrt

Alle Fahrer ohne Verkehrsinformationen werden aus der Fahrtenliste in die Verkehrsflusssimulation eingesetzt und fahren ihre gewählte Route von der Quelle bis zum Ziel, ohne vom geplanten Fahrtverlauf abzuweichen. Verkehrsteilnehmer, die Informationsdienste nutzen, können während der Fahrt aufgrund der Empfehlungen eine Alternativroute wählen. Für Empfehlungen während der Fahrt muss eine neue Route vom aktuellen Standort des Fahrzeugs aus gesucht werden. Dafür wird die Funktion der dynamischen Zielführung in VISSIM genutzt, die in Kapitel 3.1.2 erläutert wurde. Die Auswahlmenge während der Fahrt besteht aus genau einer besten Route. Da die Fahrer in dem Entscheidungsmodell in VISSIM immer die beste Route wählen, liegt der Befolgungsgrad bei On-Trip-Informationen bei 100%. Im realen Verkehrsgeschehen ist eher mit einem trägeren und von daher niedrigeren Befolgungsverhalten zu rechnen.

## 4 Simulationsrechnungen

Die Simulationsrechnungen werden nach Abbildung 41 in die drei Bereiche Erstellung von Fahrtwünschen, Verbindungswahl vor und Routenwahl während der Fahrt unterteilt. Sie werden nacheinander abgearbeitet und sind über Fahrtenlisten miteinander verbunden.

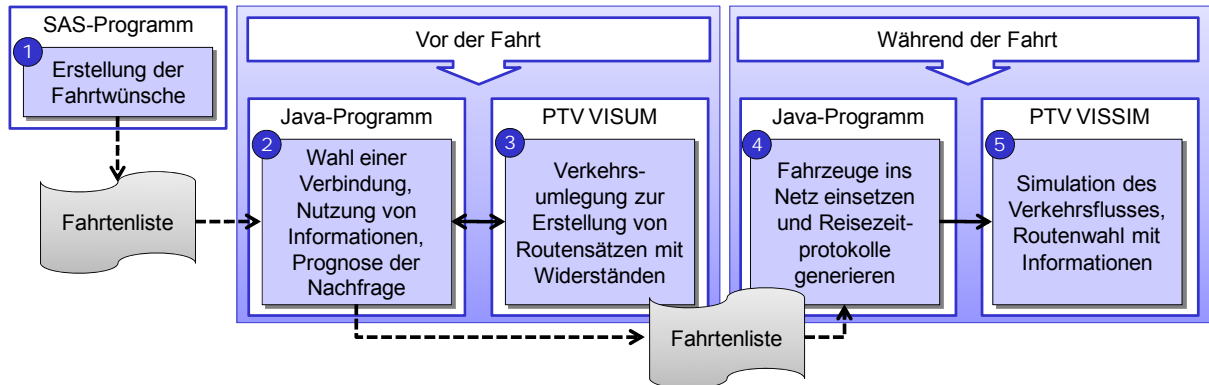


Abbildung 41: Simulationen vor und während einer Fahrt

Die Erzeugung der Verkehrsnachfrage mit Quelle, Ziel und Wunschabfahrtszeit wurde mit der Statistik- und Datenanalysesoftware SAS implementiert (1), weil die Fahrtwünsche anhand der Daten des MOP [55] erzeugt wurden, die bereits im SAS-Format vorlagen. Die Entscheidungsmodelle zur Routen- und Verbindungswahl vor Fahrtantritt sowie die Aufteilung nach Nutzern und Nichtnutzern des Verkehrsdienstes wurden in der Programmiersprache Java umgesetzt (2). Außerdem prognostiziert das Java-Programm die Nachfragematrizen, die VISUM dynamisch umlegt (3). Die Routensätze aus VISUM sollen einerseits die Ortskenntnis der Verkehrsteilnehmer ohne Informationen und andererseits die Berechnungen für Meldungen des Verkehrsdienstes abbilden. Das Ergebnis der Routen- und Verbindungswahl ist eine Fahrtenliste mit Quelle, Ziel, Abfahrtszeit und Knotenfolge für die gewählte Route. Ein weiteres Java-Programm übernimmt dann die einzelnen Fahrtwünsche aus der Liste und setzt sie als Fahrzeuge in das Straßennetz in VISSIM ein (4). VISSIM simuliert den Verkehrsfluss und erstellt über die Funktion der dynamischen Zielführung Informationen während der Fahrt. Außerdem wählen die Fahrer mit Verkehrsdiensten ihre Route aufgrund des in VISSIM implementierten Entscheidungsmodells. Die Java-Programme steuern als externe Clientsoftware VISUM und VISSIM über die COM-Schnittstelle. COM steht für „Component Object Model“ und stellt eine Schnittstelle zur Kommunikation zwischen Softwarekomponenten dar, die mit Microsoft WINDOWS Betriebssystemen laufen.

### 4.1 Kenngrößen für die Bewertung

Die Steuerung des Verkehrs durch Informationen und Preise verfolgt in dieser Arbeit das Ziel, Staus zu reduzieren und damit die Robustheit und Effizienz des Verkehrssystems zu erhöhen. Das System ist robust, wenn der Verkehrsfluss stabil und wenig anfällig für Störungen und Zusammenbrüche ist. Das bedeutet, dass Reisezeiten mit steigender Auslastung nur möglichst schwach bzw. erst spät stark ansteigen. Eine effiziente Nutzung der Straßeninfrastruktur wird dann erreicht, wenn die vorhandenen Kapazitäten möglichst hoch ausgelastet sind. Aus volkswirtschaftlicher Sicht erhöht sich die Effizienz, wenn der Gesamtnutzen gesteigert werden kann. Dies passiert, wenn die Kosten sinken, die im Verkehr über die Rei-

sezeiten berechnet werden können. Folglich muss die durchschnittliche Reisezeit über alle Verkehrsteilnehmer sinken, damit der Nutzen steigt.

Aufgrund ihrer zentralen Bedeutung wird die mittlere Reisezeit in Abhängigkeit von der Netzauslastung zur Beurteilung der Wirkung von Informationen und Preisen für die Straßenbenutzung analysiert. Durch die Anwendung einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation können Rückstaus und daraus folgende Reisezeitverlängerungen bei Überlastungen dargestellt werden. Der Bezugspunkt für die Auswertungen der Untersuchungsfälle mit Stauinformationen ist immer die Auslastung des Netzes im gestörten Zustand ohne Informationen, weil dies die Ausgangssituation ist, um Verbesserungen des Verkehrsflusses zu erzielen. Für die Akzeptanz eines Preissystems ist wichtig, dass vor Fahrtantritt bekannt sein muss, wie viel die Benutzung einer Straße wann und wo kostet. Daher dürfen bei einer spontan auftretenden Störung nicht einfach die Preise erhöht werden. Folglich wird die Wirkung von Preisen nur in Fällen mit hoher Auslastung untersucht, in denen keine Störung des Verkehrsablaufs auftritt.

Zur Berechnung der Netzauslastung wurden in Kapitel 2.1 drei Methoden vorgestellt, von denen eine für die Auswertung ausgewählt werden muss. Das erste Verfahren über die mittlere Auslastung aller Kanten würde nach Kapitel 2.1.1 in einem homogenen Netz, in dem Kapazitäten und Nachfrage gleichmäßig verteilt sind, zufriedenstellende Ergebnisse liefern. Üblicherweise ist aber das Gegenteil der Fall. Einerseits gibt es Engpässe im Straßennetz, während andererseits Bereiche noch freie Kapazitäten aufweisen. Daher würde dieser Lösungsweg tendenziell immer zu niedrige Netzauslastungen berechnen.

Wenn es Engpässe gibt und diese maßgeblich die Kapazität bestimmen, liegt es nahe, diese, wie beim zweiten Ansatz in Kapitel 2.1.2, zur Berechnung der Netzauslastung zu benutzen. Dazu müssen die beiden Größen Verkehrsnachfrage und Kapazität am Engpass bekannt sein. Die Kapazität einer Strecke stellt einen statischen Wert dar, solange keine vorübergehende Störung vorliegt. Dagegen handelt es sich bei der Verkehrsnachfrage um eine dynamische Größe, die z. B. als Verkehrsstärke am Querschnitt gemessen werden kann. Die Berechnung der Auslastung einer Kante mithilfe der gemessenen Verkehrsstärke funktioniert aber nur bei stabilem Verkehrsfluss. Denn sobald es bei hoher Nachfrage zu stockendem Verkehr kommt, nimmt die Verkehrsstärke wieder ab. Daher benötigt man für dieses Verfahren immer die Fahrtwünsche, die bei Überlastungen nicht einfach zu messen sind. Dazu müsste man nämlich den sich bildenden Rückstau beachten. Die Nachfrage könnte dann z. B. über Warteschlangenmodelle berechnet werden.

Als weitere Möglichkeit zur Bestimmung der Auslastung kann man, wie in Kapitel 2.1.3, die Reisezeiten heranziehen, die stets Wartezeiten aufgrund von Rückstaus beinhalten. Diese Methode hat aber die Schwäche, dass eine durchschnittliche Reisezeit im unbelasteten Netz ( $t_0$ ) stets zu einer Auslastung von 50% führt. Denn die Netzauslastung würde rechnerisch selbst dann schon 50% betragen, wenn nur ein einziges Fahrzeug je QZ-Beziehung mit der durchschnittlichen Reisezeit unterwegs ist. Ferner kann man zwar anhand der Ausführungen des HBS die Annahme treffen, dass die Kapazität bei einer Halbierung der Geschwindigkeit erreicht wird, woraus eine doppelt so hohe Reisezeit wie  $t_0$  folgt. Trotzdem bleibt es schwierig den Funktionsverlauf für die Netzauslastung zwischen  $t_0$  und  $2 \cdot t_0$  festzulegen. Das gleiche gilt, wenn es zu einer Überlastung des Netzes kommt.

Da alle drei Methoden ihre Schwächen haben, fällt eine eindeutige Entscheidung für ein Verfahren nicht leicht. Deshalb soll in Abhängigkeit vom Anwendungsfall entschieden werden, welches Verfahren verwendet wird. Für einen relativ kleinen Netzausschnitt, in dem die Ka-

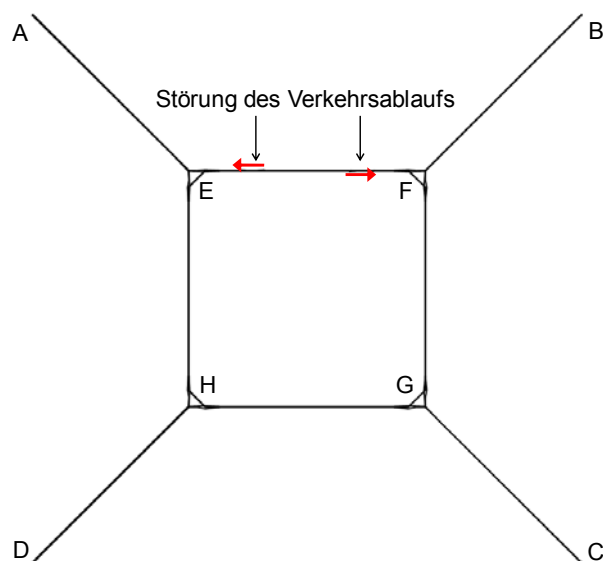
kapazitäten der Routen leicht bestimmt werden können und die Verkehrsnachfrage bekannt ist, bietet sich das Verfahren über den Engpass einer Route an. In größeren Netzen, wo es schwierig ist, die Kapazitäten aller Routen zu bestimmen und in Stadtnetzen, wo die Kapazitäten der Knoten eine wichtige Rolle spielen, ist die Methode über die mittlere Reisezeit vorteilhaft.

Schließlich soll darauf hingewiesen werden, dass in den Grafiken der folgenden Ausführungen die Messwerte zwar durch Linien miteinander verbunden sind. Dahinter steckt aber kein Kurvenverlauf einer mathematischen Funktion. Die Darstellung soll nur der besseren Veranschaulichung dienen.

## 4.2 Anwendung für ein einfaches und symmetrisches Straßennetz

### 4.2.1 Netzmodell

Abbildung 42 stellt das Untersuchungsgebiet als ein einfaches, symmetrisches Ringnetz ohne konkreten räumlichen Bezug dar. Die Einfachheit und Symmetrie haben den Vorteil, dass Wirkungen der Modelle relativ schnell erfasst werden können. Die Strecken des Netzes lassen sich in innere und äußere Kanten sowie Verbindungsrampen einteilen. Die inneren Strecken gehören zum Ring. Die Zu- und Abfahrten stellen die äußeren Kanten dar, die über Rampen in den Knoten E, F, G und H mit dem Ring verbunden sind. Bis auf die Verbindungsrampen haben alle Strecken zwei Fahrstreifen je Richtung.



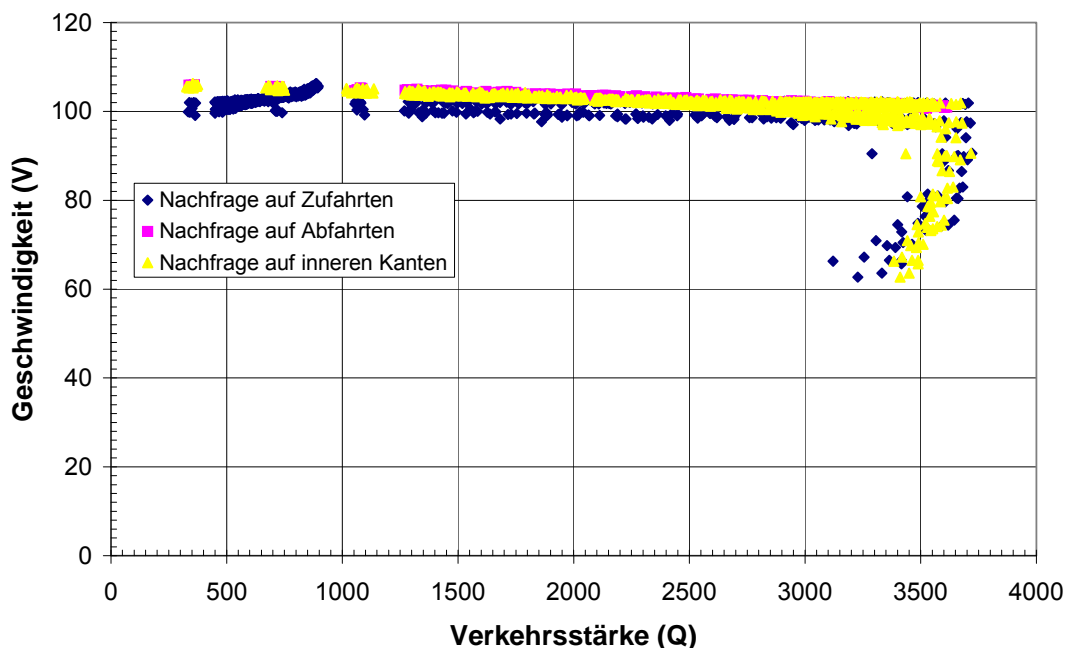
**Abbildung 42: Darstellung des untersuchten Ringnetzes**

Insgesamt werden die vier diagonal gegenüber liegenden Quelle-Ziel-Beziehungen mit einer Nachfrage belastet. Dafür bestehen jeweils zwei alternative Routen, die aufgrund der Symmetrie dieselben Eigenschaften besitzen. Die Länge einer Route beträgt ca. 19,7 km, die Reisezeit  $t_0$  im unbelasteten Netz ergibt in Abhängigkeit von der Wunschgeschwindigkeit durchschnittlich etwa 650 Sekunden oder elf Minuten. Zur Untersuchung der Wirkung von Verkehrsinformationen bei Störungen des Verkehrsablaufs wird an den in Abbildung 42 markierten Strecken vorübergehend die Kapazität reduziert.

Die Kalibrierung bezieht sich auf die Kapazitäten und Reisezeiten in den Modellen VISUM und VISSIM. Nach dem HBS liegt die Kapazität einer zweistreifigen Richtungsfahrbahn mit einem Schwerverkehrsanteil von 0%, einer Steigung unter 2% und ohne Geschwindigkeits-

begrenzung zwischen 3600 [Fz/h] für Fahrbahnen außerhalb und 4000 [Fz/h] für Strecken innerhalb von Ballungsräumen ([1], 3-13 – 3-14).

Abbildung 43 zeigt ein QV-Diagramm, das die Geschwindigkeit (V) über der Verkehrsstärke (Q) abträgt, wie sie in VISSIM an einigen Querschnitten gemessen wurde. Dafür wurden mehrere Simulationsläufe mit unterschiedlicher Nachfrage durchgeführt. Anhand des Diagramms kann man die Kapazitätsgrenze der Strecken im Netz bestimmen. Die Werte in Abbildung 43 beziehen sich auf den Untersuchungsfall ohne Störung, Informationen und Straßenbenutzungsgebühren. Die höchste Verkehrsstärke von 3717 [Fz/h] auf einer inneren Kante wurde bei einer ins Netz eingespeisten Nachfrage von durchschnittlich 3760 [Fz/h] und QZ-Beziehung gemessen. Für Zufahrten wurde eine maximale Verkehrsstärke von 3722 und für Abfahrten von 3613 [Fz/h] gezählt. Somit wird angenommen, dass die Kapazität einer zweistreifigen Richtungsfahrbahn im betrachteten Netz in etwa 3700 und einer einspurigen Kante 1850 [Fz/h] beträgt. Die entsprechenden Werte werden in VISUM gesetzt.

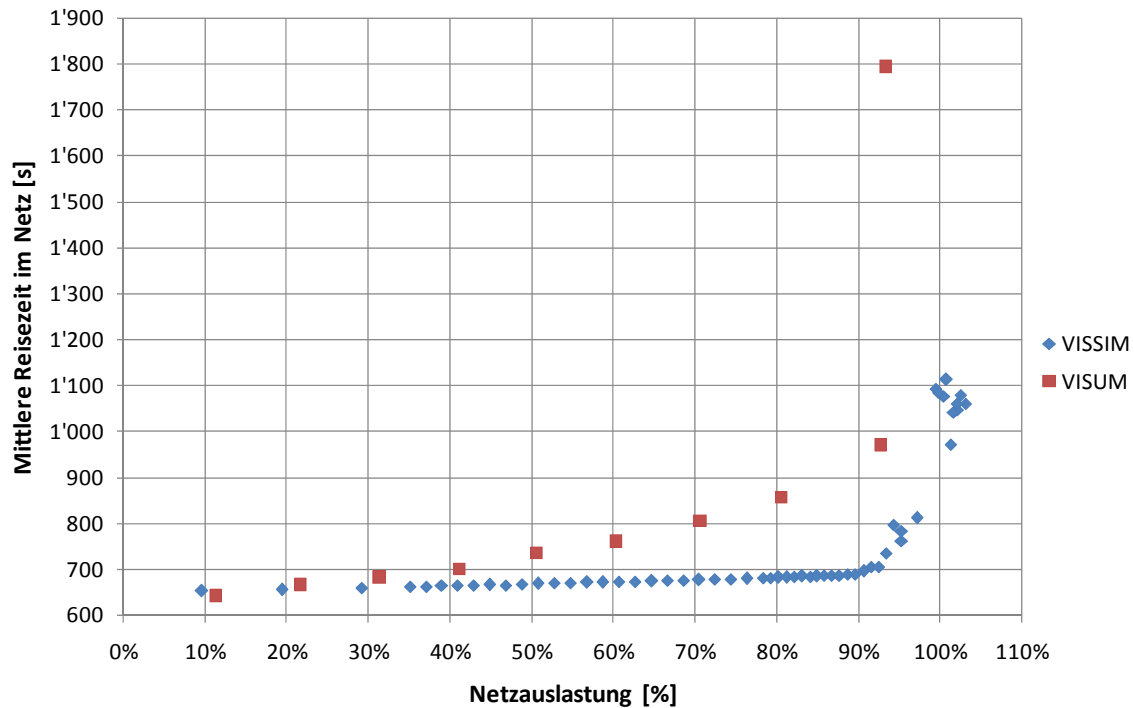


**Abbildung 43: QV-Diagramm für das Ringnetz für Untersuchungsfall ohne Maßnahmen**

Zur Berechnung der Netzauslastung kann für diesen Anwendungsfall das Berechnungsverfahren über den Engpass einer Route verwendet werden, weil es sich um ein kleines Netz handelt und die Kapazitäten der Routen durch die Kalibrierung bestimmt wurden. Außerdem ist die Nachfragemenge im Modell bekannt, weil das Simulationsprogramm die eingesetzten Fahrzeuge je Zeiteinheit protokolliert.

Abbildung 44 zeigt den Verlauf der mittleren Reisezeit im Netz in Abhängigkeit von der Netzauslastung. Die gemessenen Reisezeiten von Simulationsläufen mit VISSIM sind durch Rauten und von Umlegungen in VISUM als Quadrate dargestellt. Bei den Ergebnissen aus VISSIM wurden die Reisezeiten für alle Fahrzeuge berechnet, die innerhalb eines Zeitintervalls von einer Stunde losgefahren sind. Die Auslastung steigt über eins, weil das Netz bei einer immer höheren Nachfrage überlastet wird. Es können teilweise zwar noch Pkw in das Netz einfahren. Sie stehen dann aber unmittelbar im Stau. Somit können schließlich mehr Autos in das Netz eingesetzt werden, als über einen Querschnitt fahren. Folglich übersteigt die Nachfrage anhand der eingesetzten Fahrzeuge die Kapazität, und es bilden sich Rückstaus. Bei Erreichen der Kapazitätsgrenze in VISSIM ist die Reisezeit in etwa doppelt so hoch wie im unbelasteten Netz.





**Abbildung 44: Mittlere Reisezeit im Netz**

Bei den Ergebnissen aus VISUM ist ebenfalls der Verlauf einer CR-Kurve erkennbar, wobei ab einer Netzauslastung von ca. 90% die Reisezeit im Netz steil ansteigt. Allerdings erhöhen sich vorher die Werte in VISUM im Vergleich zur Simulation in VISSIM deutlich schneller. Der Grund dafür sind die verschiedenen Modellansätze. Letztlich kann der Unterschied in den Reisezeiten zwischen VISUM und VISSIM vernachlässigt werden, weil die Personen im Modell die Reisezeiten des Verkehrsdienstes, die mit VISUM berechnet werden, nicht mit den Reisezeiten ihrer Fahrt in VISSIM vergleichen und daraus Rückschlüsse über die Qualität des Dienstes ziehen. Somit reicht es für die Simulation aus, wenn die Reisezeiten von der Tendenz her gleich sind, auch wenn das Niveau verschieden ist.

#### 4.2.2 Verkehrsnachfrage

Im Anwendungsfall mit dem symmetrischen Ringnetz geht es um eine systematische Untersuchung der Wirkung von Verkehrsinformationen und belastungsabhängigen Preisen bei verschiedenen Netzauslastungen und Nutzungsgraden von Verkehrsdiensten. Daher ist die Anzahl Fahrten eine Einflussgröße, die für die Analyse vorgegeben und variiert wird. Außerdem hat das Untersuchungsgebiet keinen konkreten räumlichen Bezug, sodass kein Straßennetz mit spezifischen Belastungen abgebildet werden muss. Deshalb reicht es für diese Zwecke aus, eine Nachfragemenge zu generieren, welche die gewünschte Auslastung erzeugt.

Da das Modell die Verkehrsnachfrage von Pkw-Fahrern darstellen soll, liegt als Ergebnis eine Liste mit Fahrtwünschen einzelner Personen vor, die Quelle, Ziel und Abfahrtszeit beinhaltet. Ferner wird aus Vereinfachungsgründen davon ausgegangen, dass nur Fahrten mit dem Pkw betrachtet werden. Durch Umrechnung mit dem Faktor 1,1 kann eine nicht bekannte Lkw-Nachfrage berücksichtigt werden ([1], 7-13).

Für die Untersuchung eines relativ kurzen Zeitraums von bis zu zwei Stunden kann die Anzahl Fahrten über die gesamte Simulationsdauer gleichverteilt werden. Dafür werden solange zufällig Fahrten mit dem Pkw aus dem MOP gezogen, bis die gewünschte Nachfrage-

menge erreicht ist. Für die Erzeugung einer variablen Verkehrsnachfrage für einen längeren Untersuchungszeitraum wird die in Abbildung 45 dargestellte Ganglinie verwendet. Sie stellt die Verteilung der geglätteten Nachfrage mit ihrer Abfahrtszeit aus dem MOP [55] zwischen 14:30 Uhr und 19:00 Uhr dar. Die Spitzenbelastung liegt zwischen 16:00 Uhr und 16:30 Uhr.

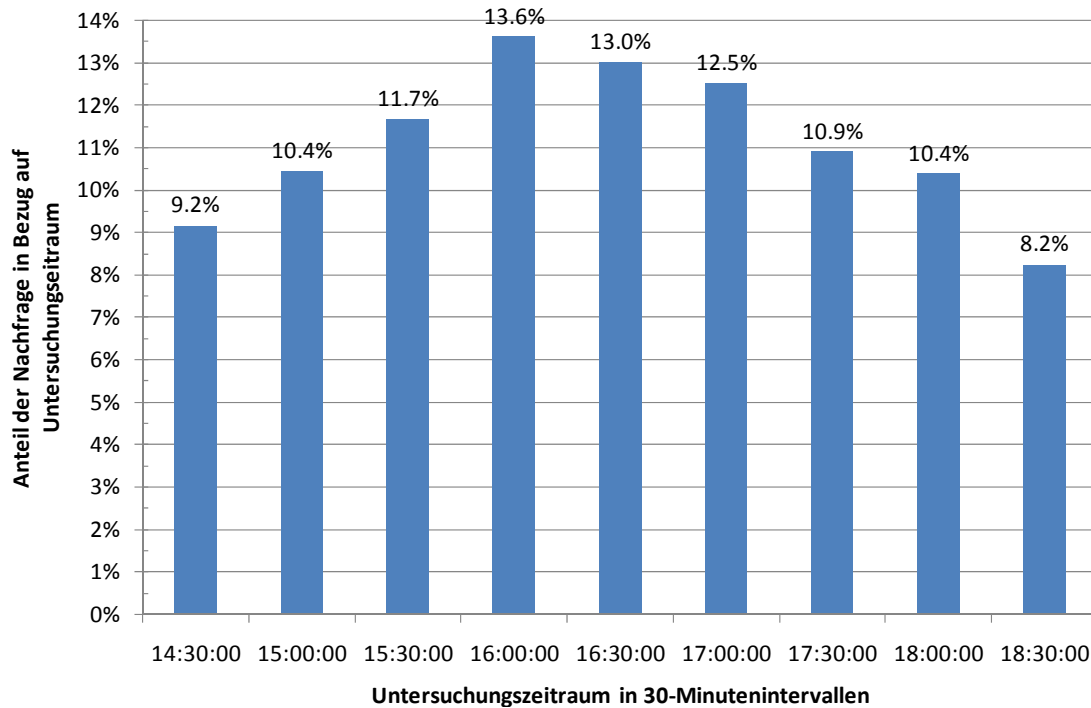


Abbildung 45: Ganglinie für die Verkehrsnachfrage im Untersuchungszeitraum

### 4.2.3 Eigenschaften der Untersuchungsfälle

Wie in Tabelle 12 dargestellt, sollen insgesamt sieben verschiedene Untersuchungsfälle I.1 bis II.4 in dem symmetrischen Ringnetz analysiert werden. Sie unterscheiden sich in den Ausprägungen der Variablen Verkehrsnachfrage, Störung, Stauinformationen und Maut.

	Untersuchungszeitraum		Verkehrsnachfrage	Störung	Stauinformationen		Maut
	Fahrzeuge einsetzen	Dauer der Simulation			On-Trip	Pre-Trip	
I.1	7.200 Sek.	10.800 Sek.	gleich bleibend	Nein	Nein	Nein	Nein
I.2	7.200 Sek.	10.800 Sek.	gleich bleibend	Ja	Nein	Nein	Nein
I.3	7.200 Sek.	10.800 Sek.	gleich bleibend	Ja	Ja	Nein	Nein
II.1	16.200 Sek.	21.600 Sek.	Ganglinie	Nein	Nein	Nein	Nein
II.2	16.200 Sek.	21.600 Sek.	Ganglinie	Ja	Nein	Nein	Nein
II.3	16.200 Sek.	21.600 Sek.	Ganglinie	Ja	Ja	Ja	Nein
II.4	16.200 Sek.	21.600 Sek.	Ganglinie	Nein	Nein	Nein	Ja

Tabelle 12: Charakterisierung der Untersuchungsfälle im symmetrischen Ringnetz

In den Untersuchungsfällen I.1 bis I.3 wird keine Verkehrsnachfrageganglinie abgebildet, weil es nur um die Wirkung von On-Trip-Informationen bei verschiedenen Belastungen und Ka-

kapazitätsreduzierungen in einem kurzen Zeitraum von zwei Stunden geht. Währenddessen werden die einzelnen Fahrzeuge gleichverteilt in VISSIM eingesetzt. Zu Beginn ist das Netz leer. Nachdem das letzte Auto losgefahren ist, läuft die Simulation noch eine weitere Stunde, damit die Fahrzeuge am Ende genug Zeit haben, ihren Zielort zu erreichen. Die Ankunft der Pkw ist wichtig, um die Reisezeiten vollständig zu erfassen.

Bei den Untersuchungsfällen II.1 bis II.3 geht es um die Wirkung von Stauinformationen vor und während der Fahrt. Dabei muss ein längerer Zeitraum als zwei Stunden betrachtet werden, damit die Verkehrsteilnehmer die Möglichkeit haben, ihren Abfahrtszeitpunkt aufgrund von Pre-Trip-Informationen zu verschieben. Deshalb soll die Verbindungswahl viereinhalb Stunden oder 16200 Sekunden dauern. Während dieses Zeitraums fahren auch die einzelnen Fahrzeuge in VISSIM los. Letztlich erstreckt sich die Verkehrsflusssimulation über 21600 Sekunden, wobei die letzten 5400 Sekunden erneut als Puffer dienen, damit die Fahrzeuge vor Simulationsende ihr Ziel erreichen und ihre Reisezeiten erfasst werden können. Über den Zeitraum von viereinhalb Stunden wäre es nicht mehr realistisch, eine gleich verteilte Nachfragemenge ins Netz einzuspeisen. Aus diesem Grund entspricht die Nachfrage jetzt der gemessenen Ganglinie im MOP zwischen 14:30 Uhr und 19:00 Uhr. Außerdem kann die Wirkung einer belastungsabhängigen Maut nur bei einer variablen Verkehrsnachfrage untersucht werden, weil die Preishöhe bei gleicher Belastung konstant bleiben müsste, womit Steuerungswirkungen ausblieben. Deshalb wird für den Untersuchungsfall II.4 dieselbe Ganglinie benutzt wie in den Analysen II.1 bis II.3.

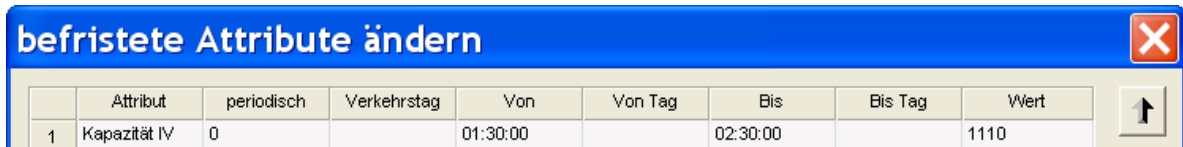
Die Simulationsdauer bildet eine Rahmenbedingung, die jeweils für die Untersuchungsfälle I.1 bis I.3 und II.1 bis II.4 gleich bleibt. Weitere Rahmenbedingungen sind durch die Nachfragemenge, das Ausmaß der Störung und den Nutzungsgrad gesetzt, die in Abhängigkeit vom Untersuchungsfall in verschiedenen Kombinationen variiert werden. In den Untersuchungsfällen I.1 bis II.3 ändert sich die Verkehrsnachfrage in Zehnerschritten von 10 bis 110% in Bezug auf eine Fahrtenmenge, die zu einer Netzauslastung von ca. 100% führt. Im Gegensatz dazu wird im Szenario II.4 nur eine hohe Verkehrsnachfrage betrachtet, die in den Schritten 90, 100 und 110% variiert. Denn bei der Steuerung des Verkehrs durch belastungsabhängige Preise geht es hauptsächlich darum, den Verkehr zeitlich zu verlagern und Nachfragespitzen zu glätten.

Eine Störung im Netz ist gleichzusetzen mit einer unerwarteten, vorübergehenden Kapazitätsverringerung auf einer Kante. Sie tritt in den Untersuchungsfällen I.1 und I.2 nach ca. 900 Sekunden auf und endet eine Stunde später nach 4500 Sekunden. In den Szenarien II.2 und II.3 beginnt die Störung nach etwa 5400 und endet nach ca. 9000 Sekunden. Das Ausmaß der Störung variiert zwischen den Simulationsläufen mit einer Kapazitätsreduzierung auf 10, 50 oder 90% der ursprünglichen Leistungsfähigkeit einer Kante. Außerdem erhöht sich der Nutzungsgrad von Informationsdiensten in Zwanzigerschritten zwischen den Simulationsläufen von 10 in I.3 bzw. 30 in II.3 auf 90%. II.3 geht von einem höheren kleinsten Nutzungsgrad von mindestens 30% aus, weil hier mit Verkehrsprognosen und Pre-Trip-Informationen ein Blick in die Zukunft geworfen wird, wo mit höheren Nutzungsgraden zu rechnen ist als in der Gegenwart.

#### *4.2.3.1 Modellierung einer Störung des Verkehrsablaufs*

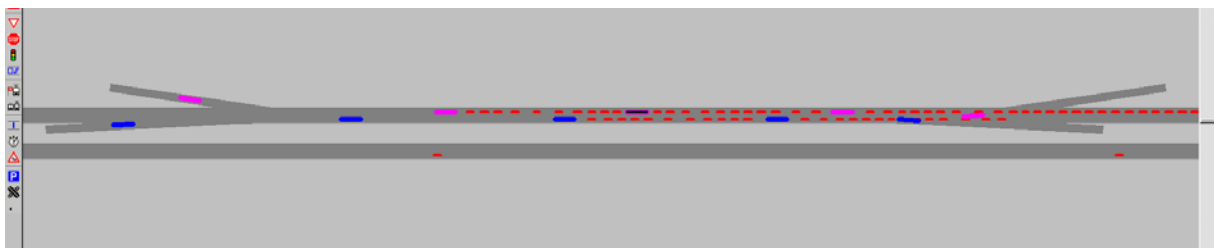
Um eine Störung des Verkehrsablaufs zu modellieren, muss die Kapazität der betroffenen Kante im Netzmodell vorübergehend reduziert werden. Wie in Abbildung 46 dargestellt, kann

man in VISUM die Kapazität einer Strecke über befristete Attribute für einen bestimmten Zeitraum direkt einstellen.



**Abbildung 46: Einstellen der temporären Kapazitätsreduzierung in VISUM**

Im Gegensatz dazu lässt sich in VISSIM die Kapazität einer Kante nicht unmittelbar eingeben und temporär reduzieren. Es ist auch nicht möglich, für einen Zeitraum z. B. die Anzahl der Fahrstreifen zu verändern. Daher zeigt Abbildung 47 eine Methode, wie eine zeitlich beschränkte Störung in VISSIM modelliert werden kann, indem Fahrzeuge mit geringerer Geschwindigkeit über Rampen in das Netz eingesetzt werden, um den Verkehrsablauf auf einer Strecke zu stören.



**Abbildung 47: Modellierung einer vorübergehenden Kapazitätsreduzierung in VISSIM**

In Abbildung 47 handelt es sich bei den größeren Balken um die Störfahrzeuge. Die übrigen, in der Abbildung durch kleinere Striche dargestellten Pkw müssen entsprechend abbremesen und den Störfahrzeugen folgen, bis diese die Kante über eine weitere Rampe wieder verlassen haben. Somit kann über die Wunschgeschwindigkeit der Störfahrzeuge und die Zeit, in welchem Takt sie aufeinander folgen, die Intensität der Störung gesteuert werden. Die Parameter für die Geschwindigkeit und die Taktzeit wurden in einem iterativen Prozess über mehrere Simulationsläufe ermittelt.

Reduzierung der Kantenkapazität einer von zwei Routen					Zeitraum der Störung zwischen 0 bis 7200 Simulationssekunden	
auf %	Vorher [Fz/h]	Nachher [Fz/h]	Sollwert [Fz/h]	Abweichung vom Sollwert	Von [s]	Bis [s]
10	≈ 3700	≈ 360	370	- 3%	904	4651
50	≈ 3700	≈ 1803	1850	- 3%	902	4505
90	≈ 3700	≈ 3171	3330	- 5%	895	4510

**Tabelle 13: Eigenschaften der Störung**

Tabelle 13 zeigt die Eigenschaften der verschiedenen Störungen, die sich anhand der eingestellten Parameter ergeben. Die Störungssituationen wurden so kalibriert, dass sie in etwa die vorgegebenen Kapazitätsreduzierungen auf jeweils 10, 50 und 90% der entsprechenden Route erreichen. In der ungestörten Ausgangssituation hat eine Route eine Kapazität von etwa 3700 [Fz/h]. Die Verkehrsstärken, die mit der jeweiligen Kapazitätsreduzierung gemessen wurden, stehen in der Spalte „Nachher“. Der Sollwert gibt den theoretischen Wert für die Kapazität während der Störung wider. In der folgenden Spalte steht die Abweichung der ge-

messenen Verkehrsstärke vom Sollwert. Ferner geben die letzten beiden Spalten an, von wann bis wann die Störfahrzeuge auf der Strecke gefahren sind.

#### 4.2.3.2 Differenzierte Preise für die Straßenbenutzung

Das Preissystem für diesen Anwendungsfall lässt sich anhand des morphologischen Kastens in Tabelle 1 aus Kapitel 2.3.2 konfigurieren. Die zutreffenden Merkmalsausprägungen sind in Tabelle 14 farblich unterlegt. Grundsätzlich ist für differenzierte Straßenbenutzungsgebühren wichtig, dass die Verkehrsteilnehmer ungefähr wissen, wann und wo die Benutzung einer Strecke wie viel kostet. Denn ein intransparentes Preissystem, bei dem der Fahrer erst während oder nach seiner Fahrt den Preis erfährt, wäre aus Nutzersicht nicht akzeptabel. Das Ziel des hier betrachteten Maussystems ist die Steuerung der Nachfrage (1).

In Bezug auf den Fahrzeugtyp (2) ist grundsätzlich von einer Differenzierung zwischen Pkw und Lkw auszugehen, die sich z. B. bei der Verursachung externer Kosten unterscheiden [39]. Außerdem ist der Platzverbrauch von Lkw größer als von Pkw, was bei der Steuerung des Verkehrs, um Staus zu vermeiden, von Bedeutung ist. Da aus Vereinfachungsgründen in den Untersuchungsfällen mit dem Ringnetz keine Lkw abgebildet werden, wird eine Unterscheidung hier nicht sichtbar. Differenzierte Preise nach unterschiedlichen Tageszeiten (3) bieten eine Möglichkeit, den Verkehr belastungsabhängig zu steuern. Abbildung 48 zeigt mit der hinteren Datenreihe die Anteile der Nachfrage bezogen auf den Untersuchungszeitraum in 30 Minutenintervallen. Demnach sind die Preise in den Zeiträumen zwischen 15:30 Uhr bis 17:30 Uhr, in denen die größte Nachfrage besteht, höher als in der übrigen Zeit.

Merkmale	Ausprägungen			
Ziel (1)	Finanzierung der Infrastruktur	Internalisierung externer Kosten	Steuerung der Nachfrage	
Fahrzeugtyp (2)	Differenziert		Undifferenziert	
Tageszeit (3)	Differenziert		Undifferenziert	
Raum (4)	Eine Zone	Mehrere Zonen	kontinuierlich	punktuell
Straßentyp (5)	Autobahn	Bundesstraße	Landstraßen	Kommunale Straßen
Fahrspur (6)	Partiell		Alle	
Abrechnung (7)	Pro Einfahrt	Mehrere Einfahrten	Km-abhängig	
Anpassung der Preise (8)	Kurzfristig (< 1 Jahr)		Langfristig (> 1 Jahr)	
Fahrzeugidentifikation (9)	Im oder am Fahrzeug		Außerhalb des Fahrzeugs	
Kontrolle (10)	Persönlich		Elektronisch	
Bezahlung (11)	Aktiv		Passiv	

**Tabelle 14: Ausprägungen des zu untersuchenden Mautsystems**

In dem vorliegenden, einfachen Beispielnetz ist eine räumliche Unterscheidung (4) oder Differenzierung nach Straßentypen (5) nicht notwendig, weil die Eigenschaften der Strecken und Routen identisch sind. Die Maut soll aber kontinuierlich erhoben werden, weil dies den Vorteil hat, dass es keine Abgrenzungsprobleme im Raum gibt. Außerdem sind stets alle

Fahrspuren kostenpflichtig (6). Wenn es sich um eine kontinuierliche Preiserhebung handelt, bietet sich an, die Maut kilometerabhängig abzurechnen (7). Damit besteht der Vorteil, den Preis vollständig nutzungsabhängig zu gestalten, was die Akzeptanz des Mautsystems erhöht. Ferner kann man über den Preis umso besser steuern, je schneller auf Veränderungen der Nachfrage oder des Angebots reagiert wird. Daher sollte die Anpassung der Gebühr (8) kurzfristig, d. h. regelmäßig in einem Zeitraum unter einem Jahr überprüft werden.

Um Straßenbenutzungsgebühren zur Steuerung des Verkehrssystems zu nutzen, ist eine aufwändigere technische Umsetzung vorteilhaft. Somit können Verzögerungen und Wartezeiten an Mautstationen vermieden werden. Außerdem können gesammelte Daten über Fahrten für die Anpassung von Preisen verwendet werden. Auf die Technik zur Mauterhebung soll diese Arbeit nicht im Detail eingehen. Hauptsächlich ergeben sich die technischen Ausprägungen aus den Anforderungen einer differenzierten Maut. Daher sollte ein möglichst hoher technischer Standard angestrebt werden, der die Verkehrsteilnehmer über eine zeitlich und räumlich differenzierte Maut vor Fahrtbeginn informieren kann. Dies erhöht die Transparenz und damit auch die Akzeptanz des implementierten Mautsystems. Außerdem erhöhen die Informationen das Potenzial, den Verkehr zu steuern, weil das Wissen über die wichtigen Einflussfaktoren Reisezeit und Kosten die Voraussetzung für eine Verhaltensänderung sind. Aus der Anforderung an einen hohen technischen Standard folgt eine Fahrzeugidentifikation (9) durch ein elektronisches Gerät im Fahrzeug. Entsprechend kann auch die Kontrolle (10) hauptsächlich elektronisch durchgeführt werden. Ferner ist bei einer passiven Bezahlung (11) der Komfort aus Nutzer- und Betreibersicht am höchsten. Auf der anderen Seite erfordert sie ein hohes Maß an Vertrauen auf Kundenseite. Wenn ein System ohne physische Schranken implementiert wird, was mit dem Ziel der Stauvermeidung am besten zu vereinbaren ist, steht der Betreiber immer vor der Herausforderung, die Zahlung auch wirklich durchzusetzen. Im Gegensatz zu Strom-, Gas- oder Telefonanbietern kann er seinen Kunden ohne physische Grenzen nicht ohne weiteres von der Nutzung seines Produktes ausschließen, wenn der Kunde nicht bezahlt.

Achsenzahl des Fahrzeuges / der Fahrzeugkombination	Schadstoffkategorie		
	A	B	C
Bis zu drei Achsen	0,10 €	0,12 €	0,145 €
Vier oder mehr Achsen	0,11 €	0,13 €	0,155 €

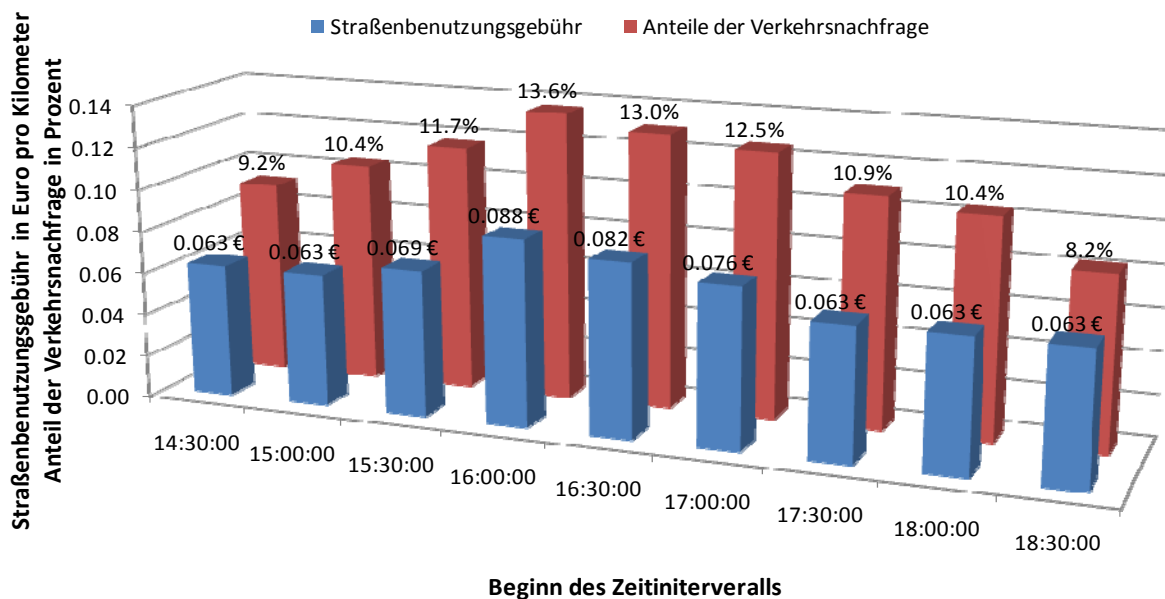
**Tabelle 15: Mautsätze pro Kilometer für Lkw in Deutschland bis 30. September 2008**

Als Anhaltspunkt für die Festlegung der Höhe des Preises soll die Lkw-Maut in Deutschland dienen. Diese liegt nach Tabelle 15 in Abhängigkeit von der Anzahl Achsen und Schadstoffklasse zwischen 0,10 und 0,155 EUR je Kilometer [62]. Je geringer der Schadstoffausstoß und die Anzahl der Achsen sind, desto niedriger fällt die Gebühr aus. Arithmetisch gemittelt ergibt sich ein durchschnittlicher Preis von 0,127 EUR pro Kilometer. Nach dem HBS kann man einen Lkw in zwei Pkw-Einheiten umrechnen ([1], 7-13). Da bei der hier untersuchten Maut das Ziel zur Vermeidung von Staus im Vordergrund steht, wird der Platzverbrauch des Fahrzeugs zum Maßstab für die Preisberechnung für Pkw herangezogen. Folglich berechnet sich die Maut für einen Pkw als die Hälfte des durchschnittlichen Preises für Lkw. Damit ergibt sich eine Gebühr von 0,063 EUR pro Kilometer.

Ein Beispiel für eine zeitlich differenzierte Maut ist die State Route 91 in Orange County im US-amerikanischen Bundesstaat Kalifornien. Die Strecke ist ca. 10 Meilen lang, was unge-

fähr 16 Kilometern entspricht. Im Internet sind die aktuellen Preise veröffentlicht, die per Einfahrt fällig werden [33]. Rechnet man die Preise pro Kilometer aus, ergibt sich eine Spanne von 0,075 USD bzw. 0,05 EUR pro Kilometer in den Nachtstunden bis 0,625 USD bzw. 0,39 EUR pro Kilometer am Freitagnachmittag, wenn man Richtung Osten fährt. Zur Umrechnung der Währungen wurde der aktuelle Kurs von 1 EUR zu 1,59 USD am 21.04.2008 verwendet. Somit variiert der Preis nicht nur zeitlich über einen Tag, sondern auch zwischen den Tagen und je Fahrtrichtung. In der Spitze ist der Preis demnach acht Mal so hoch wie in den am schwächsten nachgefragten Zeiten. Dazwischen gibt es viele verschiedene Abstufungen, die sich in Stundenschritten verändern.

Schließlich ist die Festlegung des Preises ein iterativer Prozess, der im Zusammenspiel von Nachfrage und gewünschter Servicequalität auf einer Strecke austariert werden muss. Für diese Untersuchung wird die Annahme getroffen, dass der Preis in Halbstundenintervallen variiert, weil auch die Verkehrsnachfrage in Halbstundenintervallen zusammengefasst wurde. Die Gebühr für den Zeitraum mit der höchsten Nachfrage im Zeitintervall zwischen 16:00 und 16:30 Uhr soll 1,4-mal so teuer sein wie der Grundpreis mit 0,063 EUR pro Kilometer. Außerdem fällt in dieser Untersuchung der Preis in den Intervallen ab 16:30 Uhr und 17:00 Uhr jeweils auf das 1,3-fache und 1,2-fache des Grundpreises und folgt damit der abnehmenden Tendenz der Verkehrsnachfrage in kleinen Schritten. Damit der Anstieg vom Zeitintervall zwischen 15:30 Uhr und 16:00 Uhr auf das nächste nicht allzu stark ausfällt, steigt hier die Preishöhe auf das 1,1-fache des Grundpreises.



**Abbildung 48: Preishöhe für die Maut in Abhängigkeit von der Nachfrageganglinie**

Da die größere Wirkung einer zeitlich differenzierten Maut eher vor Fahrtantritt mit der Wahl des Abfahrtszeitpunktes zu erwarten ist, können die Effekte auf die Routenwahl während der Fahrt vernachlässigt werden. Daher wird in dieser Untersuchung darauf verzichtet, die Maut bei der Routenwahl während der Fahrt zu berücksichtigen.

#### 4.2.4 Analyse von Modellfehlern

Ein Problem in dem Verkehrsflussmodell von VISSIM besteht darin, dass Fahrzeuge von der Strecke genommen und damit gelöscht werden, wenn sie zu lange auf einen Spurwechsel warten müssen, weil keine passende Zeitlücke verfügbar ist. Daher wurde während der Kalibrierung des Modells darauf geachtet, die entsprechenden Parameter im Verkehrsflussmo-

dell so einzustellen, dass das Reißverschlussverfahren an den Verflechtungsrampen möglichst gut abgebildet wird. Dadurch sind die Verluste aufgrund gelöschter Fahrzeuge, die nicht in die Reisezeitmessungen eingehen, vernachlässigbar.

Untersuchungsfall	Reduzierung der Kapazität in Bezug auf eine ...		Max. Verlust an Fahrzeugen	Netzauslastung	Nutzungsgrad
	... der zwei Routen	... QZ-Beziehung			
I.2	90%	95%	0,01%	102%	-
	50%	75%	0,25%	115%	-
	10%	55%	3,48%	158%	-
I.3	90%	95%	0,18%	50%	50%
	50%	75%	0,13%	121%	10%
	10%	55%	7,17%	163%	10%
II.2	90%	95%	< 0,01%	99%	-
	50%	75%	0,08%	96%	-
	10%	55%	0,58%	93%	-
II.3	90%	95%	0,28%	45%	90%
	50%	75%	0,21%	48%	90%
	10%	55%	0,34%	83%	30%

**Tabelle 16: Verlust an Fahrzeugen aufgrund von nicht durchgeführten Spurwechseln**

Tabelle 16 gibt einen Überblick, wie hoch der Anteil der gelöschten an den insgesamt eingesetzten Fahrzeugen ist. Dabei wird je Untersuchungsfall in Abhängigkeit von der Höhe der Kapazitätsreduzierung unterschieden. Für die Untersuchungsfälle I.2 und I.3 kann man feststellen, dass die Verluste an Fahrzeugen umso höher sind, je stärker die Kapazitätsreduzierung und je höher die Netzauslastung ist. Die größten Verluste gab es im I.2-Fall bei einer Kapazitätsreduzierung auf 10%. Dabei gingen 3,48% der eingesetzten Fahrzeuge verloren. Im I.3-Fall gab es einen außerordentlichen Verlust bei einer Kapazitätsreduzierung auf 10%, wobei 7,17% der Fahrzeuge gelöscht wurden. Ansonsten lagen die Verluste im I.2- oder I.3-Fall bei 0,25% oder darunter und können damit vernachlässigt werden. Im Untersuchungsfall I.1 ohne Störung und Informationen wurden höchstens 0,01% der Fahrzeuge pro Simulationslauf gelöscht. Die Menge ist damit ebenfalls vernachlässigbar. Für die Szenarien mit einer variablen Verkehrsnachfrage fallen die Verluste insgesamt niedriger aus. Sie steigen nie über 0,58% der eingesetzten Pkw. Das kann damit begründet werden, dass die Spitzenbelastung bei den Simulationsläufen mit der variablen Nachfrage nur eine halbe Stunde dauert, während sie bei den Untersuchungsfällen I.1 bis I.3 über zwei Stunden gleich hoch bleibt.

Wenn relativ viele Fahrzeuge aus dem Netz genommen wurden, wie in den Fällen mit hoher Netzauslastung und starker Reduzierung der Kapazität, ist davon auszugehen, dass die Reisezeiten eigentlich noch höher hätten ausfallen müssen, weil der Stau mit den gelöschten Fahrzeugen länger gewesen wäre. Testweise wurden die Parameter in verschiedenen Simulationsläufen variiert, wobei aber keine besseren Ergebnisse erzielt wurden.



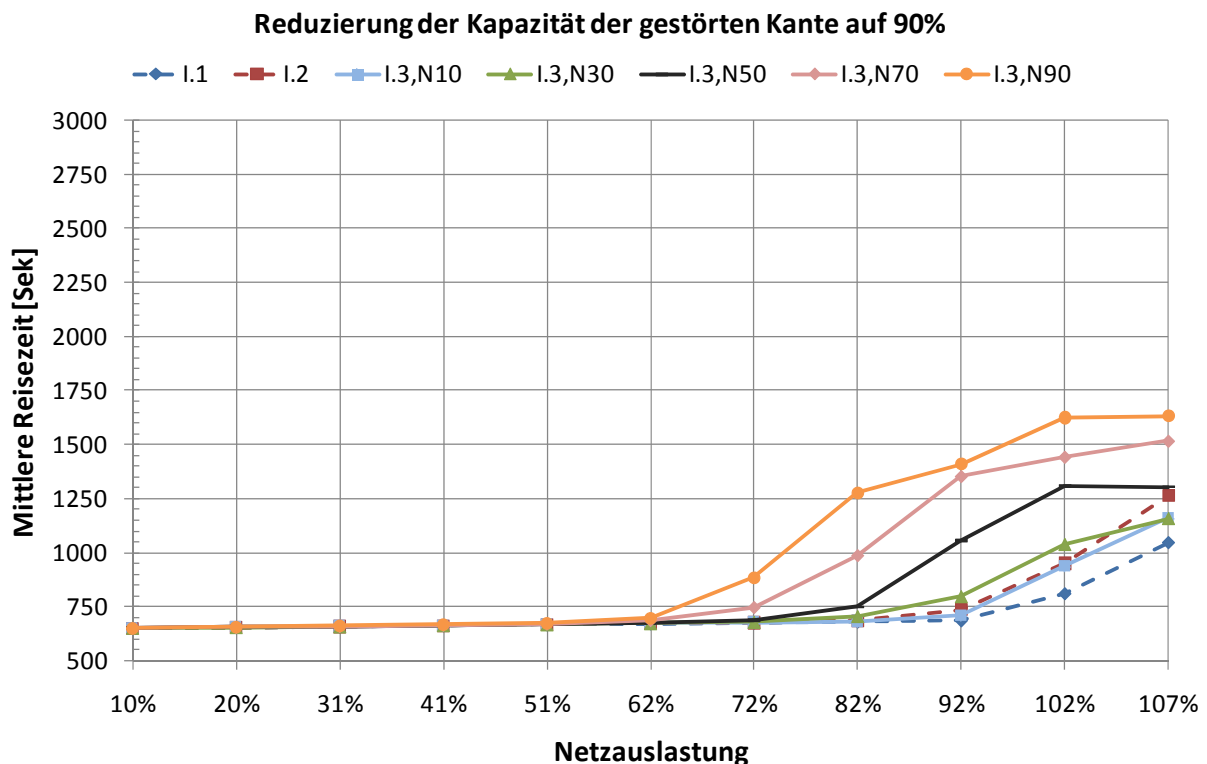
## 4.2.5 On-Trip-Informationen bei spontan auftretender Störung und gleich bleibender Verkehrsnachfrage

### 4.2.5.1 Mittlere Reisezeiten in Abhängigkeit von der Streckenkapazität

In allen Diagrammen in den folgenden Abbildungen bezieht sich die X-Achse auf die Netzauslastung in Prozent für den Untersuchungsfall I.2, d. h. mit Störung und ohne Informationen, weil hiermit die Ausgangssituation vorgegeben wird, die durch On-Trip-Informationen verbessert werden soll. Auf der Y-Achse steht die mittlere Reisezeit im Netz in Sekunden. Die höchsten Reisezeiten, die während der Simulationsläufe gemessen wurden, liegen in etwa zwischen 1600 Sekunden bei einer Reduzierung der Kapazität einer der beiden alternativen Routen auf 90% und ca. 3800 Sekunden bei einer Reduzierung der Kapazität auf 10%. Die niedrigste, gemessene Reisezeit im Netz beträgt ca. 650 Sekunden und entspricht damit in etwa der Reisezeit  $t_0$  im unbelasteten Netz. Der Diagrammausschnitt wurde so gewählt, dass immer Reisezeiten zwischen 500 und 3000 Sekunden angezeigt werden. In Bezug auf die in den Diagrammen dargestellten Kurven ist zu beachten, dass es sich lediglich um einzelne Messwerte für die Reisezeit handelt, die durch Linien miteinander verbunden sind.

#### 4.2.5.1.1 Reduzierung auf 90 Prozent

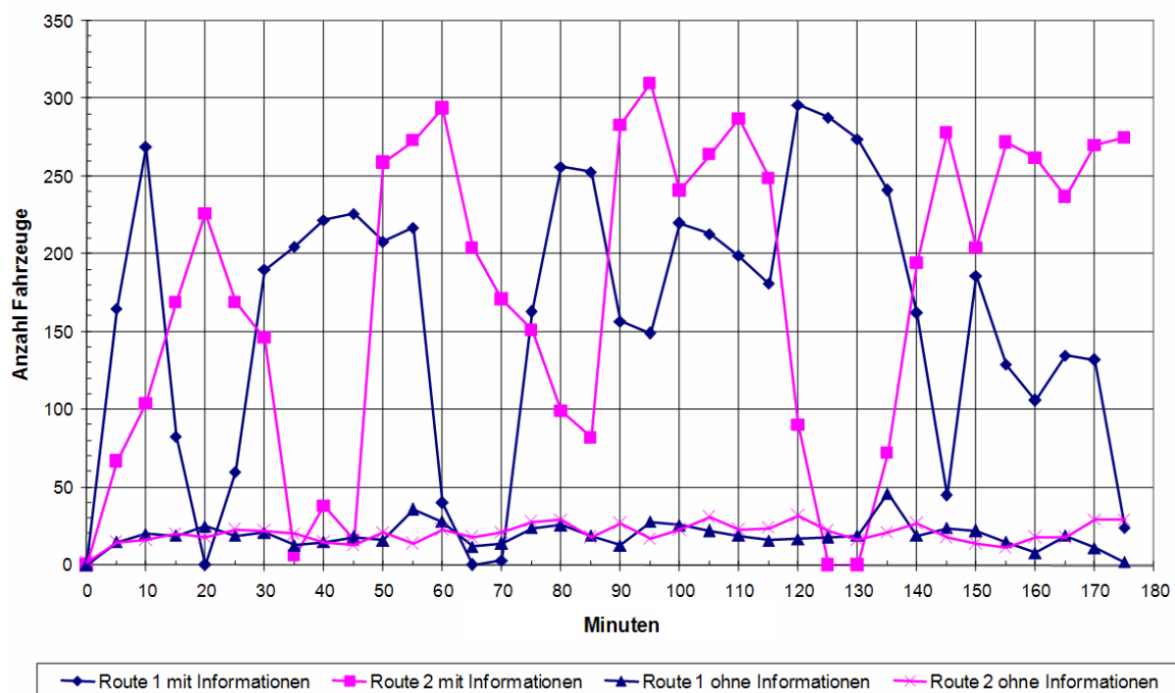
Die Reduzierung der Kapazität von einer der jeweils zwei alternativen Routen auf 90% der ursprünglichen Leistungsfähigkeit führt dazu, dass sich die Anzahl Fahrzeuge auf einem Weg in der Verkehrsflusssimulation von ca. 3700 [Fz/h] auf etwas unter 3330 [Fz/h] verringert. Eine derartige Störung führt nach Abbildung 49 dazu, dass in etwa ab einer Netzauslastung von 90% die mittlere Reisezeit überproportional stark ansteigt.



**Abbildung 49: Mittlere Reisezeiten über alle Verkehrsteilnehmer**

Die gestrichelte Kurve mit den Rauten kennzeichnet die Messwerte für die mittlere Reisezeit in Abhängigkeit von der Netzauslastung im Untersuchungsfall I.1. Ferner bilden die Rechtecke der gestrichelten Kurve die mittlere Reisezeit im Netz für I.2 ab. Mit ihrem Verlauf

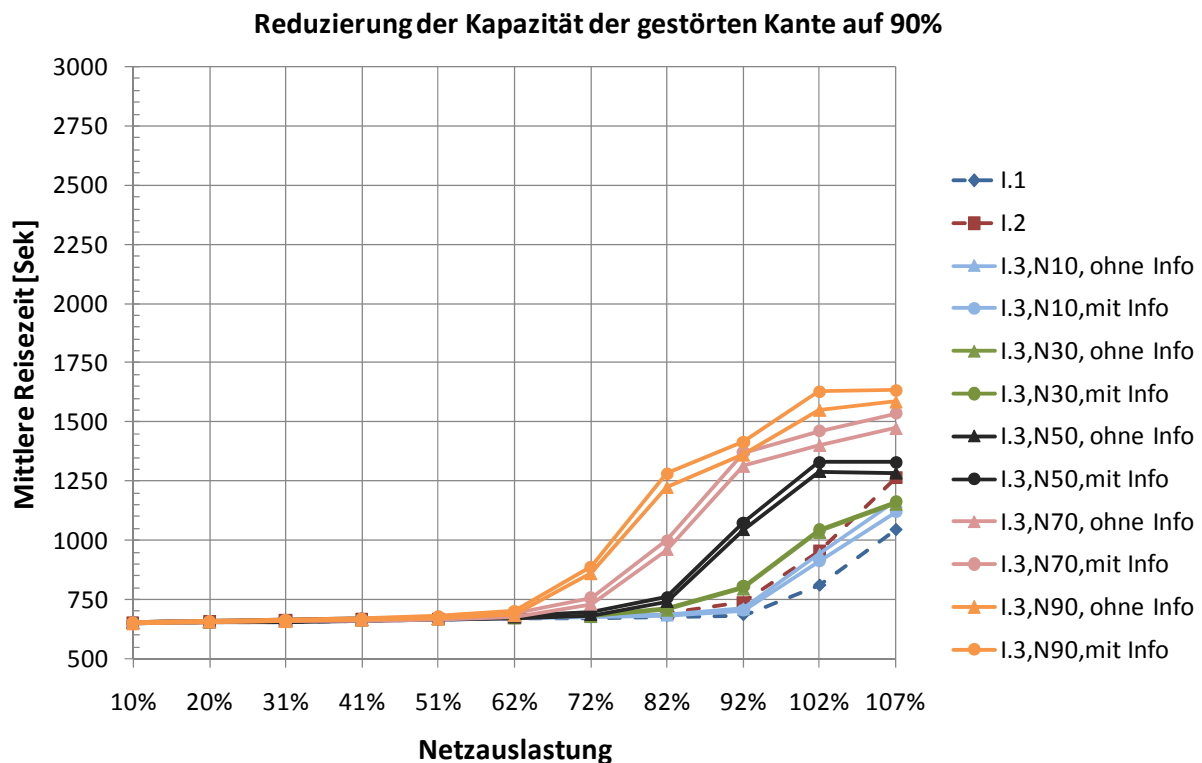
spannen die beiden Kurven eine untere und obere Grenze auf. Dazwischen müssten sich die mittleren Reisezeiten bei verschiedenen Nutzungsgraden (N) von On-Trip-Informationen bewegen, um eine Verbesserung zu erreichen. Für diesen Fall, einer schwachen Störung, liegt nur die Kurve für einen Nutzungsgrad von 10% durchgängig knapp unterhalb der Reisezeiten von I.2. Bei einem Nutzungsgrad von 30% sind die Reisezeiten nur bei den höheren Auslastungsgraden etwas besser als im Fall mit Störung und ohne Informationen. Bei allen übrigen Nutzungsgraden verschlechtern die On-Trip-Informationen den Zustand auf der Straße gegenüber I.2, und zwar steigen die durchschnittlichen Reisezeiten im Netz umso mehr, je höher der Nutzungsgrad wird. Die Ursache für die Verschlechterung der Verkehrszustände durch Informationen liegt in einem Aufschaukeln des Systems, das sich am Computerbildschirm während der Simulation beobachten lässt. Ferner kann man die zwischen den alternativen Routen oszillierende Nachfrage auch anhand der gemessenen Pkw am Querschnitt zeigen.



**Abbildung 50: Fahrzeugmengen auf zwei alternativen Routen je Zeitintervall**

Abbildung 50 stellt die Belastungen je Route durch Fahrzeuge mit und ohne Zielführungssysteme beispielhaft für eine schwache Störung, einen Nutzungsgrad von 90% und eine Netzauslastung von 100% dar. Während die Anzahl Fahrzeuge ohne Informationen annähernd konstant bleibt, verschieben sich die Verkehrsmengen der Fahrzeuge mit On-Trip-Informationen zwischen den beiden Routen hin und her. Zuerst ist die Belastung auf der Route 1 größer, deren Kapazität sich durch die nach ca. 15 Minuten gesetzte, einstündige Störung reduziert. Folglich erhöhen sich die Reisezeiten, und alle informierten Fahrer nutzen nur noch Route 2. Dadurch geht die Belastung auf Route 1 zurück, und die Reisezeit auf der gestörten ist bald besser als auf der alternativen Route, weil die Kapazitätsreduzierung nicht besonders stark ist. Deshalb leitet der Verkehrsdienst die Fahrzeuge wieder über die gestörte Kante. Infolgedessen erhöht sich dort die Reisezeit erneut, womit alle informierten Fahrer wieder über den alternativen Pfad geschickt werden, bis sich die Verkehrssituation nach einiger Zeit wieder umkehrt. Somit bewegt sich der Stau immer zwischen der gestörten und der alternativen Route hin und her. Ein weiteres Problem entsteht damit bei den Zuflüssen, weil die Nachfrage sich nicht mehr gleichmäßig auf die Alternativen verteilt. Je höher der

Nutzungsgrad ist, desto mehr Fahrzeuge wollen plötzlich nur noch die eine Abbiegerbeziehung nutzen, die überlastet wird. Somit verlagert sich ein Teil des Staus in Bereiche des Netzes, wo vorher gar keine Probleme bestanden. In der Literatur wird diese Art des Aufschaukelns der Nachfrage im Straßennetz als „hunting phenomenon“ bezeichnet [63].



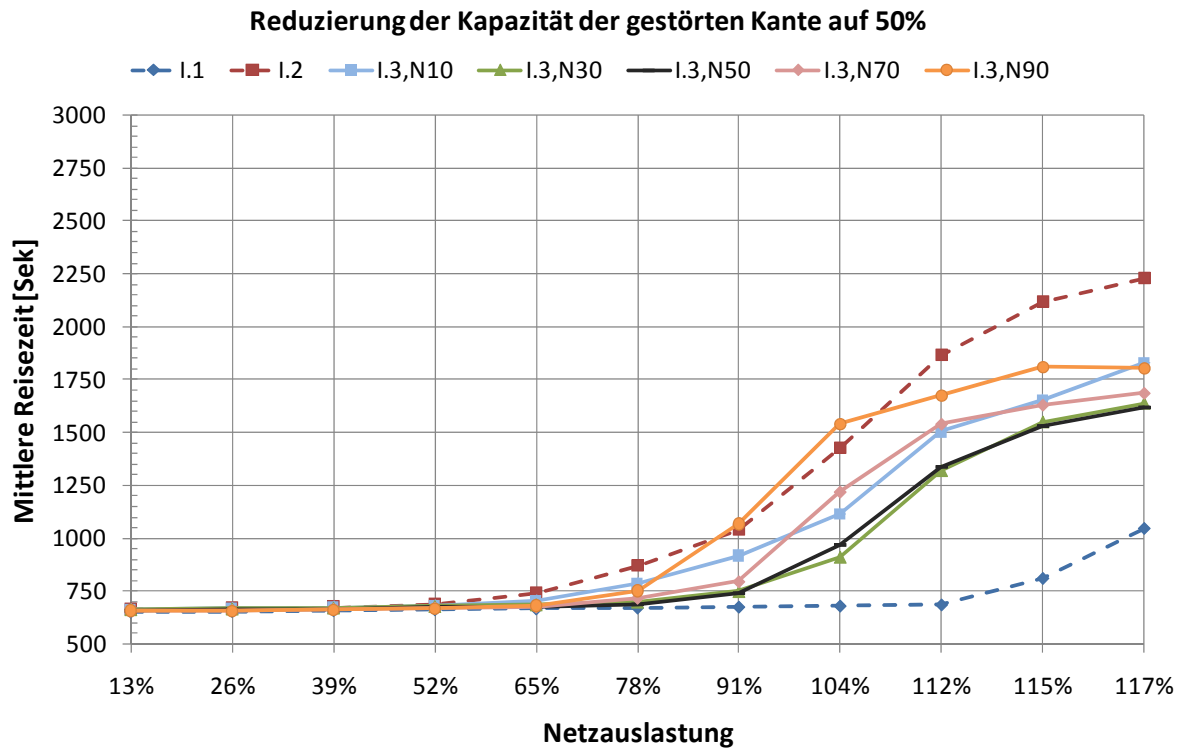
**Abbildung 51: Mittlere Reisezeit nach Nutzern und Nichtnutzern von Informationen**

Abbildung 51 zeigt die unterschiedlichen Kurven für die mittlere Reisezeit im Netz bei gegebenem Nutzungsgrad in Abhängigkeit davon, ob die Fahrer On-Trip-Informationen (Kurve mit Dreiecken) zur Verfügung hatten oder nicht (Kurve mit Rechtecken). Die gestrichelten Linien spannen den Raum auf, in dem sich die mittleren Reisezeiten bewegen müssten, um eine Verbesserung durch Informationen zu erreichen. Für diesen Fall, einer schwachen Störung, ergeben sich über alle Nutzungsgrade nur kleine Unterschiede zwischen den mittleren Reisezeiten von Nutzern und Nichtnutzern. Dabei können die informierten Fahrer nur bei einem Nutzungsgrad von 10% schnellere Reisezeiten erzielen. Ansonsten verlieren sie im Durchschnitt immer Zeit gegenüber den Nichtnutzern. Die Ursache dafür ist das oben dargestellte „hunting phenomenon“, wonach die durch Informationen geführten Verkehrsteilnehmer bei höheren Nutzungsgraden grundsätzlich auf die bessere Route geschickt werden. Als Folge verbessern sich die Reisezeiten auf der ehemals schlechteren Route so sehr, dass sie attraktiver wird als der empfohlene Weg. Durch die Umleitung eines hohen Anteils von Fahrzeugen wird künstlich ein Stau erzeugt, der dann v. a. die zielgeführten Fahrzeuge betrifft.

#### 4.2.5.1.2 Reduzierung auf 50 Prozent

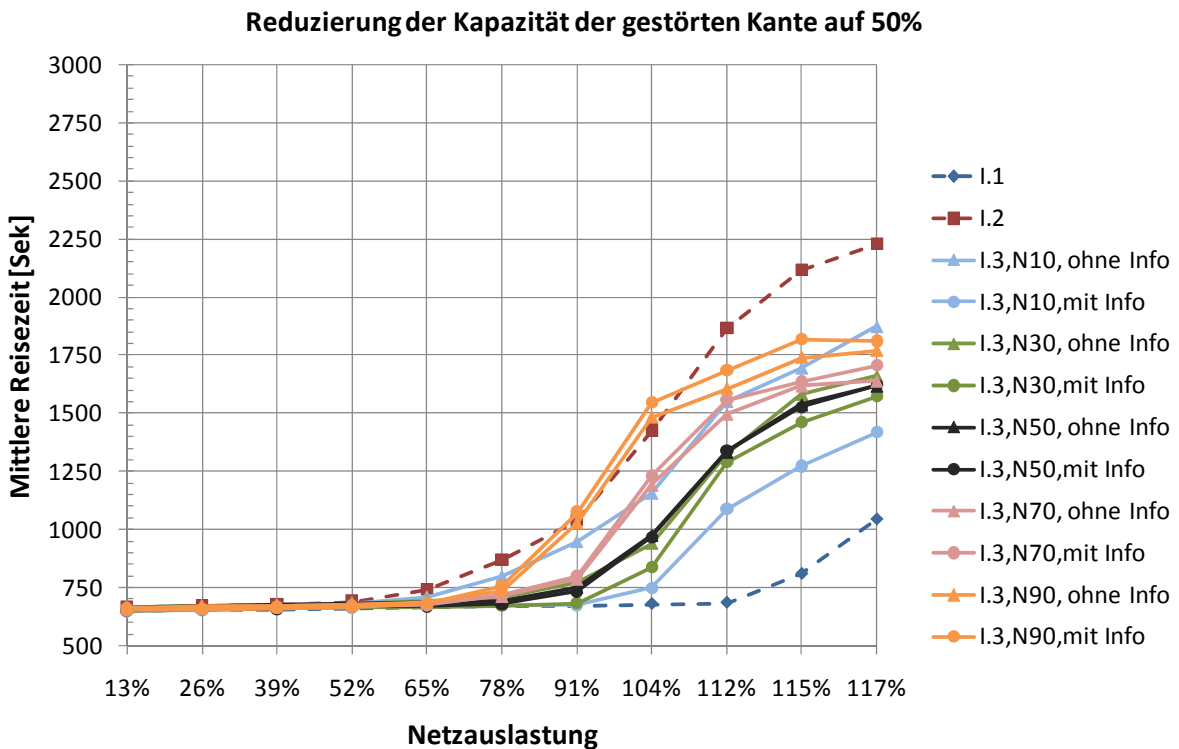
In Abbildung 52 stehen die mittleren Reisezeiten bei einer Reduzierung der Kapazität einer der beiden alternativen Routen auf 50%. Die Störung in I.2 macht sich ca. ab einer Netzauslastung von 50% mit höheren Reisezeiten bemerkbar. Bei Netzauslastungen zwischen ca. 50 und 80% verbessern alle Nutzungsgrade die mittlere Reisezeit gegenüber I.2. Interessant ist bei dieser Störung, dass die größten positiven Effekte auf die Reisezeit bei Nutzungsgraden von 30 und 50% erreicht werden. Bei einem hohen Nutzungsgrad von 90% und hohen Netz-

auslastungen ab 90% streuen die Reisezeiten zwischen leicht schlechteren und leicht besseren Werten gegenüber dem Fall ohne Informationen. Folglich macht sich hier immer noch das „hunting phenomenon“ bemerkbar.



**Abbildung 52: Mittlere Reisezeiten über alle Verkehrsteilnehmer**

Im Vergleich der Nutzer mit den Nichtnutzern zeigt Abbildung 53, dass mittlerweile die informierten Fahrer bei einem Nutzungsgrad von 10 und 30% deutlich gegenüber den Verkehrsteilnehmern ohne Informationen profitieren.

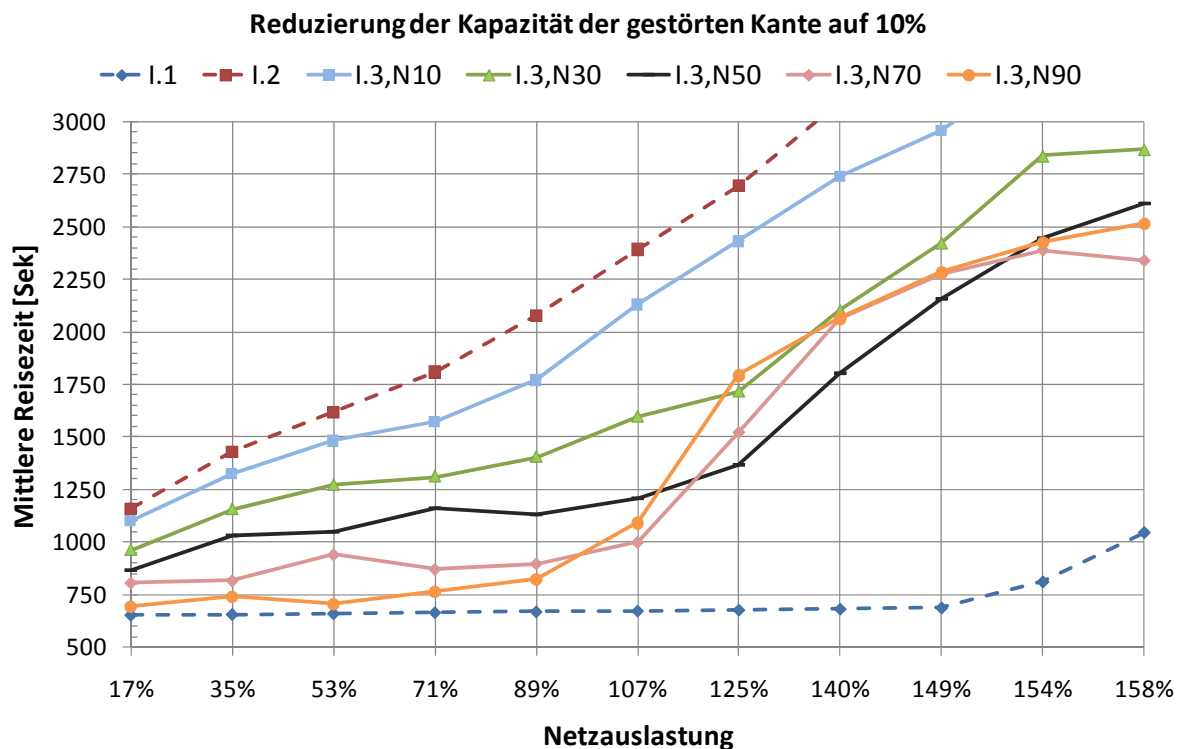


**Abbildung 53: Mittlere Reisezeit nach Nutzern und Nichtnutzern von Informationen**

Bei einem Nutzungsgrad von 50% liegen die Kurven fast übereinander, d. h. Nutzer und Nichtnutzer gewinnen gleichermaßen. Ab einem Nutzungsgrad von 70% und einer Netzauslastung von ca. 90% steigt die Reisezeit der Nutzer aber über die der Nichtnutzer.

#### 4.2.5.1.3 Reduzierung auf 10 Prozent

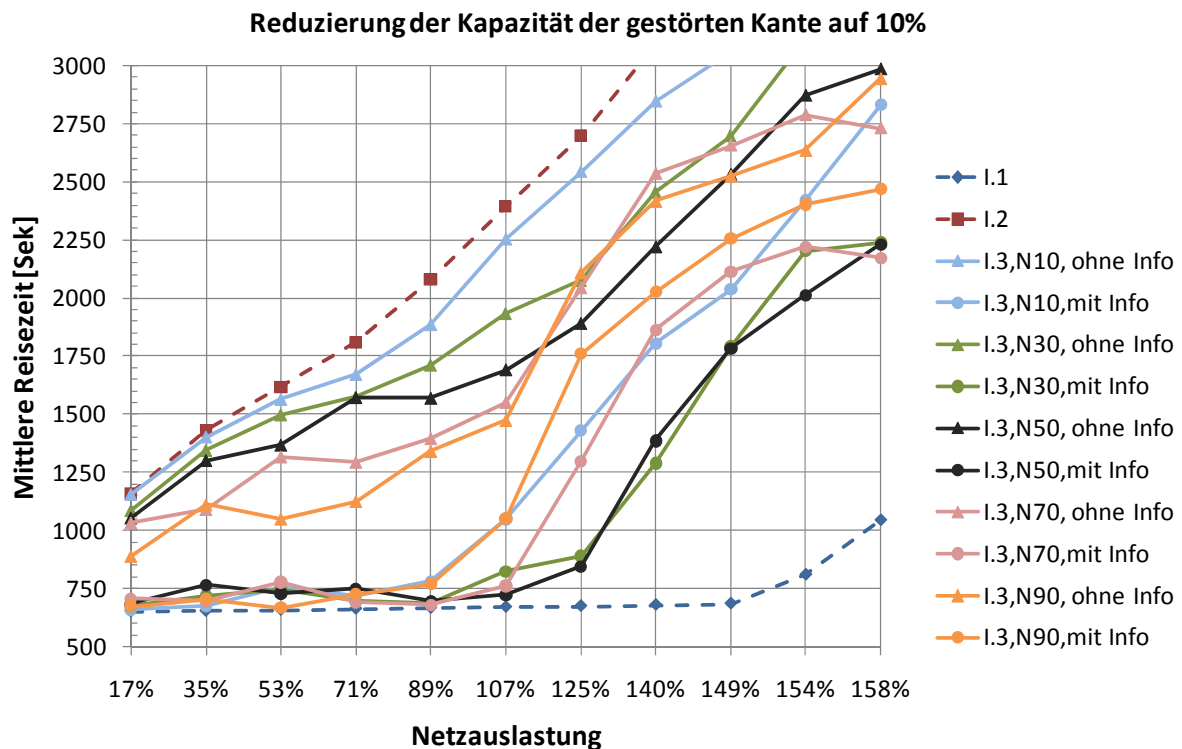
Die stärkste Störung, die simuliert wurde, ist die Reduzierung der Kapazität einer der beiden alternativen Routen auf 10%. Dabei steigt selbst bei einer Netzauslastung von 35% die mittlere Reisezeit im Untersuchungsfall I.2 schon auf über das Doppelte an. Anhand von Abbildung 54 wird deutlich, dass Informationen sich jetzt unabhängig vom Nutzungsgrad immer positiv auf die mittlere Reisezeit auswirken.



**Abbildung 54: Mittlere Reisezeiten über alle Verkehrsteilnehmer**

Außerdem ist bis zu einer Netzauslastung von ca. 95% die Wirkung von Informationen umso größer, je höher der Nutzungsgrad wird. Bei höheren Netzauslastungen erzielen dann niedrigere Nutzungsgrade größere Wirkungen, und zwar zuerst ein Nutzungsgrad von 70 und dann von 50%. Die schwächsten Wirkungen gibt es durchgehend über alle Netzauslastungen beim niedrigsten Nutzungsgrad von 10%. Diese Beobachtungen lassen sich damit erklären, dass bei niedrigeren Netzauslastungen trotz der Umleitung noch Kapazitäten auf den alternativen Strecken frei waren. Somit hätte der Nutzungsgrad noch etwas höher sein können, wodurch noch mehr Fahrzeuge die Route gewechselt hätten. Steigt jedoch die Netzauslastung an, kehrt sich das Bild um. Jetzt ist es besser, wenn weniger Fahrzeuge umgeleitet werden und damit der Nutzungsgrad niedriger ist. Letztlich gleichen sich bei starken Überlastungen des Netzes die Wirkungen der unterschiedlichen Nutzungsgrade wieder an. Dies ist einleuchtend, weil die Kapazitäten im Netz ausgeschöpft sind.

Abbildung 55 zeigt, dass jetzt bei der Reduzierung der Kapazität auf 10% alle Nutzer von Informationen durchgängig über alle Netzauslastungen gegenüber den Nichtnutzern profitieren. Das „hunting phenomenon“ hat also bei stärkeren Störungen keine Bedeutung mehr.



**Abbildung 55: Mittlere Reisezeiten nach Nutzern und Nichtnutzern von Informationen**

#### 4.2.5.2 Zusammenfassung

Tabelle 17 fasst zusammen, bei welchen Netzauslastungen positive Wirkungen durch On-Trip-Informationen, d. h. kürzere mittlere Reisezeiten für alle Fahrzeuge, beobachtet werden können. Danach wird deutlich, dass niedrige Nutzungsgrade, wie z. B. von 10%, unabhängig von der Höhe der Kapazitätsreduktion und bei ausreichend hoher Netzauslastung stets die Reisezeiten verkürzen. Dagegen sind positive Wirkungen bei höheren Nutzungsgraden ab 70 oder 90% erst zu erwarten, wenn die Kapazitätsreduzierung stark ist. In diesem Fall, einer starken Störung, wirken sich Informationen unabhängig vom Nutzungsgrad immer positiv auf eine Reisezeitverkürzung aus, und zwar fast unabhängig davon, ob die Netzauslastung niedrig oder hoch ist.

Reduktion der Kapazität in Bezug auf eine ...		Nutzungsgrade		Netzauslastung	
... der zwei Routen	... QZ-Beziehung	Von	Bis	Von	Bis
90%	95%	10%	-	≈ 92%	> = 107%
50%	75%	10%	70%	≈ 52%	> = 117%
10%	55%	10%	90%	< = 17%	> = 158%

**Tabelle 17: Positive Wirkungen von On-Trip-Informationen über alle Netzauslastungen**

Da in Abhängigkeit von der Störung nicht für alle Nutzungsgrade eine positive Wirkung gemessen wurde, gab es teilweise auch gemischte und ausschließlich negative Wirkungen von Informationen. Dies war nach Tabelle 18 für Nutzungsgrade ab 50% bei einer schwachen Störung der Fall. Ferner ließ sich bei einer Kapazitätsreduzierung auf 50% einer der alternativen Routen immer noch eine Verschlechterung der mittleren Reisezeit bei einem Nutzungsgrad von 90% feststellen.

Reduktion der Kapazität in Bezug auf eine ...		Nutzungsgrade		Netzauslastung	
... der zwei Routen	... QZ-Beziehung	Von	Bis	Von	Bis
90%	95%	50%	90%	≈ 41%	> = 107%
50%	75%	90%	-	≈ 80%	> = 110%
10%	55%	-	-	-	-

**Tabelle 18: Negative Wirkungen von On-Trip-Informationen über alle Netzauslastungen**

In Tabelle 19 steht, bei welchem Nutzungsgrad und welcher Netzauslastung in Abhängigkeit von der Kapazitätsreduzierung die höchste Wirkung von Informationen erzielt wurde. Anhand der Simulationsergebnisse wird deutlich, dass bei schwachen Störungen kleine Nutzungsgrade die höchste Wirkung haben, und zwar kann ein Nutzungsgrad von 20% die mittlere Reisezeit aller Fahrzeuge um 12% reduzieren. Dagegen haben bei starken Störungen die höheren Nutzungsgrade die größte Wirkung. Hier kann ein Nutzungsgrad von 90% eine maximale Reduktion der mittleren Reisezeit um 60% erreichen.

Reduktion der Kapazität in Bezug auf eine ...		Maximale Reduktion der mittleren Reisezeit aller Fahrzeuge	Nutzungsgrad	Netzauslastung
... der zwei Routen	... QZ-Beziehung			
90%	95%	12%	20%	107%
50%	75%	36%	30%	104%
10%	55%	60%	90%	89%

**Tabelle 19: Netzauslastung mit maximaler Reduktion der mittleren Reisezeit**

Interessant ist auch die Beobachtung, dass mit zunehmender Kapazitätsreduktion die Höhe der Netzauslastung sinkt, bei der die maximale Verbesserung der Reisezeit erreicht wird. Eine mögliche Erklärung dafür könnte lauten, dass sich kleine Störungen erst bei höheren Auslastungsgraden sehr negativ auswirken. Ist die Störung stärker, reicht schon eine geringere Auslastung, damit es zu stark negativen Folgen kommt.

#### **4.2.6 Pre- und On-Informationen bei spontan auftretender Störung und variabler Verkehrsnachfrage**

Die Analyse der gemeinsamen Wirkungen von Pre- und On-Trip-Informationen bezieht sich auf die Untersuchungsfälle II.1, II.2 und II.3, wobei in den beiden zuletzt genannten Szenarien im Zeitraum zwischen 16:00 und 17:00 Uhr spontan eine Verkehrsstörung auftritt. Der Zeitraum für die Auswertung liegt zwischen 15:00 und 18:00 Uhr. Somit werden die Ränder des Simulationszeitraums abgeschnitten, um die Ergebnisse nicht durch Besonderheiten am Anfang und Ende der Simulation zu beeinflussen. Denn zu Beginn ist das Straßennetz noch leer und muss sich erst einmal mit Fahrzeugen füllen, um die gewünschte Netzauslastung zu erreichen. Am Schluss fehlen in II.3 Anfragen von Verkehrsteilnehmern, deren ursprünglich gewählter Abfahrtszeitpunkt nach dem Ende des Simulationszeitraums liegen würde. Dadurch hätte es noch Verschiebungen der Abfahrtszeit in die letzte Stunde vor dem Simulationsende geben können, die in der Fahrtenliste fehlen.

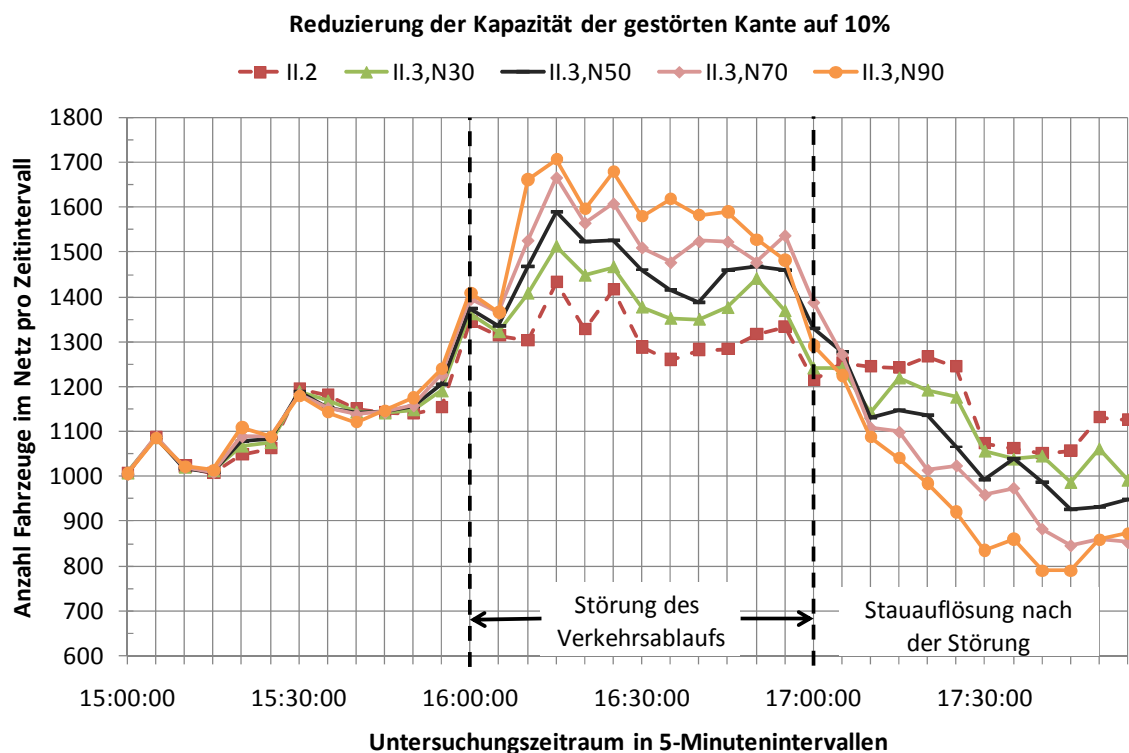
In den weiteren Kapiteln werden zuerst die Entscheidungen über die Verschiebung der Abfahrtszeit aufgrund von Pre-Trip-Informationen und daraus resultierende Veränderungen der



Verkehrsnachfrageganglinie ausgewertet. Danach folgt die Analyse der Wirkungen von Pre- und On-Trip-Informationen auf Veränderungen der Reisezeiten im Netz.

#### 4.2.6.1 Wirkung von Pre-Trip-Informationen auf die Verkehrsnachfrageganglinie

Um Veränderungen der Verkehrsnachfrageganglinie zu zeigen, die aus den Entscheidungen aufgrund von Pre-Trip-Informationen resultieren, würde es an dieser Stelle zu weit gehen, die Ergebnisse aller Simulationsläufe darzustellen. Denn diese sind sich tendenziell sehr ähnlich. Außerdem könnte bei der großen Anzahl leicht die Übersicht verloren gehen. Deshalb wurden Beispiele mit Netzauslastungen von jeweils 110 und 80% für eine starke und schwache Störung, d. h. mit einer Reduzierung der Kapazität einer alternativen Route auf 10 bzw. 90%, gewählt. Diese Untersuchungsfälle sollen hinsichtlich der Störungstärke in etwa die Spannweite und in Bezug auf die Netzauslastung die Richtung der Wirkungen verdeutlichen.



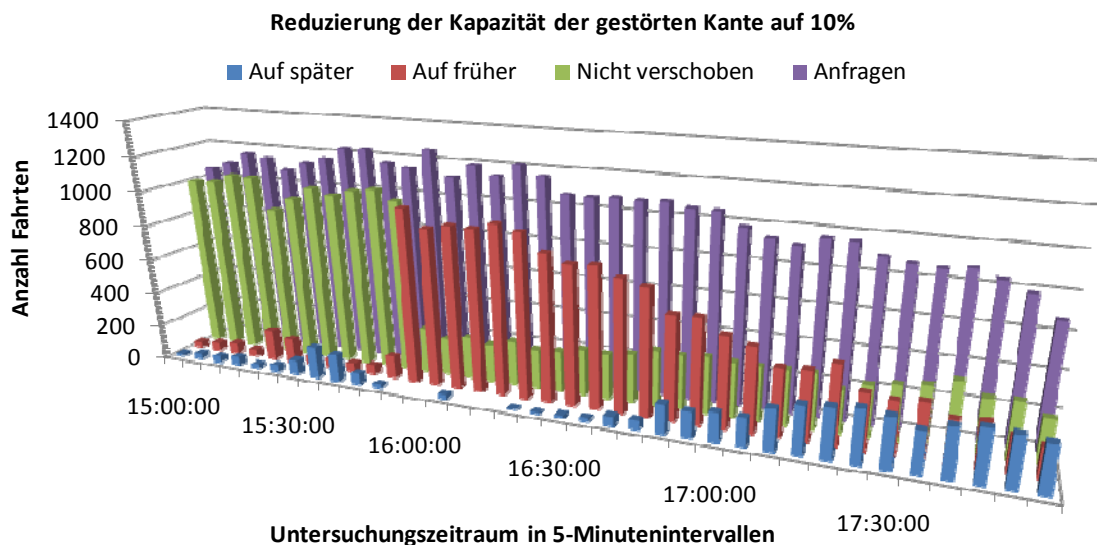
**Abbildung 56: Veränderung der Nachfrageganglinie bei einer Netzauslastung von 110%**

Abbildung 56 zeigt Verkehrsnachfrageganglinien am Beispiel für eine Reduzierung der Kapazität einer der alternativen Routen auf 10% und eine hohe Auslastung von 110%. Die mit Rechtecken dargestellten Werte stehen für die Nachfrage ohne Informationen in den Untersuchungsfällen II.1 und II.2, während die übrigen Werte die Nachfrage bei unterschiedlichen Nutzungsgraden darstellen. Dabei fällt auf, dass ab ca. 16:00 Uhr die Anzahl der Abfahrten in den Untersuchungsfällen mit Informationen steigt und nach ca. 17:00 Uhr während der Stauauflösung unter das Niveau des Szenarios ohne Verkehrsdienste sinkt. Die Veränderung der Nachfrageganglinie ist umso stärker, je höher der Nutzungsgrad ist.

Abbildung 57 stellt eine genauere Analyse des Nutzungs- und Befolgungsverhaltens der Verkehrsteilnehmer vor der Fahrt bei einem Nutzungsgrad von 90% dar. Die hintere Säulenreihe zeigt die Summe aller Fahrten, bei denen Autofahrer eine Anfrage an den Verkehrsdienst gestellt haben. Ferner kennzeichnen die davor liegenden Balken die Entscheidungen, bei denen die Abfahrtszeit nicht verschoben wurde, während die erste Reihe die Anzahl der



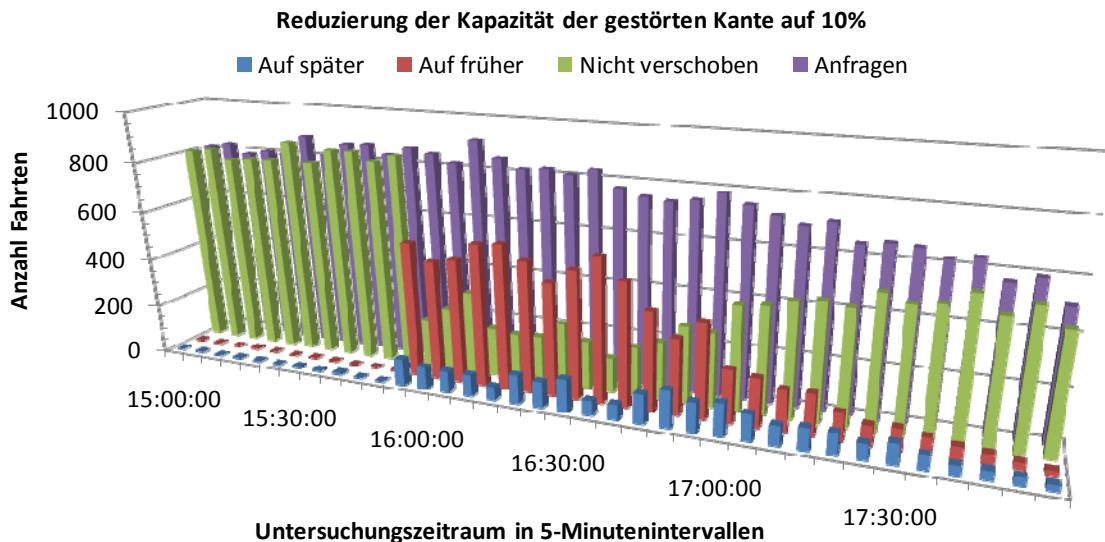
Verschiebungen auf später und die zweite auf früher zeigt. Bei den übrigen Nutzungsgraden sieht das Bild ähnlich aus, wobei das Niveau der Anzahl von Fahrten oder Anfragen jeweils niedriger ist. Als Beispiel wurden die Grafiken für einen Nutzungsgrad von 30% in den Anhang I.I gestellt.



**Abbildung 57: Nutzung von Pre-Trip-Informationen bei einer Netzauslastung von 110%**

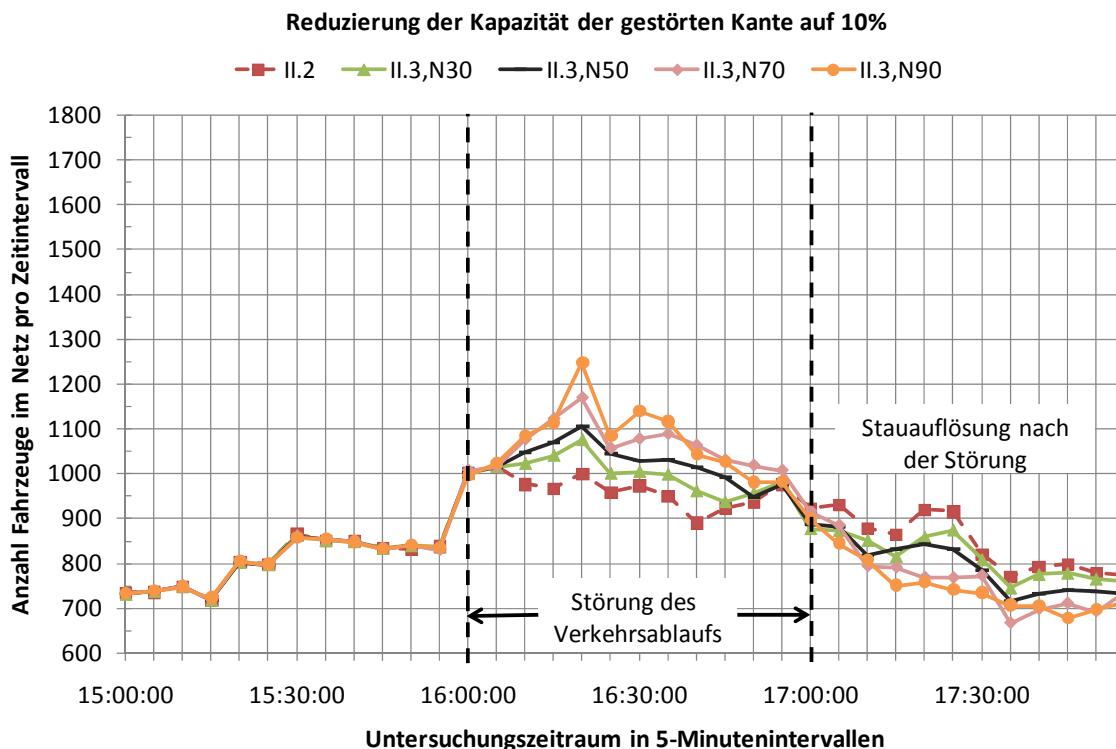
Da es in der ersten Stunde keine grundlegenden Änderungen gegenüber der Ausgangssituation ohne Informationen gab, verschieben nur wenige Fahrer ihre Abfahrtszeit auf früher oder später. Dass überhaupt Verschiebungen stattfinden, liegt daran, dass keine vollständigen Gleichgewichtszustände vorliegen. Somit kann der Verkehrsdienst je Zeitintervall häufig immer noch eine Route finden, die ein bisschen besser ist, als die Initialroute. Als Folge reagieren einige Verkehrsteilnehmer, die eine entsprechende Empfehlung bekommen haben, mit einer Verschiebung der Abfahrtszeit, um die Fahrtzeitvorteile auszunutzen. Erst mit dem spontanen Auftreten der Störung ab 16:00 Uhr kommt es zu starken Verlagerungswellen. Die Säulen in der zweiten Reihe in Abbildung 57 veranschaulichen, dass ab ca. 16:00 Uhr ein großer Anteil der Nutzer von Pre-Trip-Informationen einen früheren Abfahrtstermin wählt. Ab ca. 17:00 Uhr verschieben dann mehr Verkehrsteilnehmer ihre Startzeit auf später. Dieses Ergebnis erklärt den An- und Abstieg der Verkehrsnachfrageganglinie in Abbildung 56. Der hohe Anteil an Verschiebungen auf früher mit dem Auftreten einer spontanen Störung lässt sich dadurch erklären, dass viele Fahrer ihren Abfahrtszeitpunkt in der Hoffnung vorverlegen, dass sie dann nicht zu spät ankommen.

Abbildung 58 zeigt das Anfrageverhalten bei derselben Störung, aber einer niedrigeren Netzauslastung von 80%. Man kann erkennen, dass jetzt vor dem Auftreten der spontanen Störung kaum der Abfahrtszeitpunkt in die eine ohne andere Richtung verschoben wird, obwohl der Nutzungsgrad mit 90% sehr hoch ist. Da das Netz noch nicht überlastet ist, lohnt sich eine Verschiebung der Startzeit meistens nicht. Mit Beginn der Störung lässt sich aber dasselbe Phänomen beobachten wie im Überlastungsfall, dass relativ viele Verkehrsteilnehmer ihren Abfahrtszeitpunkt in der Hoffnung vorverlegen, nicht zu spät am Ziel anzukommen. Nachdem die Störung nach 17:00 Uhr zu Ende ist, geht die Anzahl der Entscheidungen, den Abfahrtszeitpunkt zu verschieben, schnell deutlich zurück. Dies kann damit begründet werden, dass sich bei einer geringeren Netzauslastung die Verkehrsverhältnisse nach der Störung schneller wieder normalisieren, sodass eine Verschiebung des Abfahrtszeitpunktes nicht mehr notwendig ist.



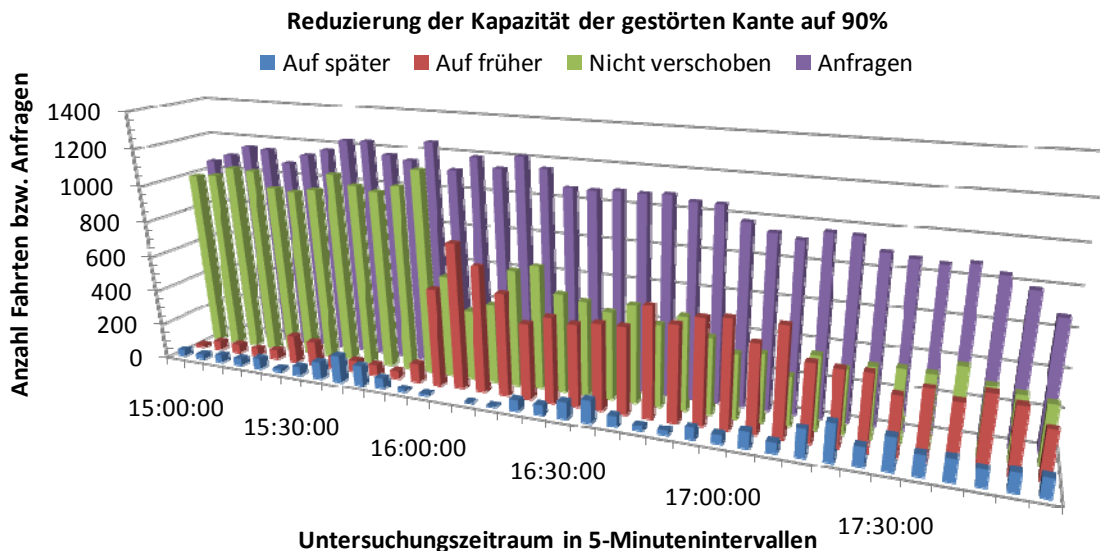
**Abbildung 58: Nutzung von Pre-Trip-Informationen bei einer Netzauslastung von 80%**

Das Nutzungs- und Befolgungsverhalten spiegelt sich auch in der Verkehrsnachfrageganglinie in Abbildung 59 wider. Ab ca. 16:00 Uhr steigt die Anzahl der Fahrten aufgrund von Verschiebungen der Abfahrtszeit für alle Nutzungsgrade über die Linie mit den Rechtecken für die Nachfrage ohne Informationen. Ab 17:00 Uhr verdeutlichen die Kurvenverläufe der Untersuchungsfälle von II.3, dass die Pkw-Fahrer ihren Fahrtbeginn vorverlegt haben, weil nun die Kurve der Abfahrten ohne Informationen über den anderen liegt.



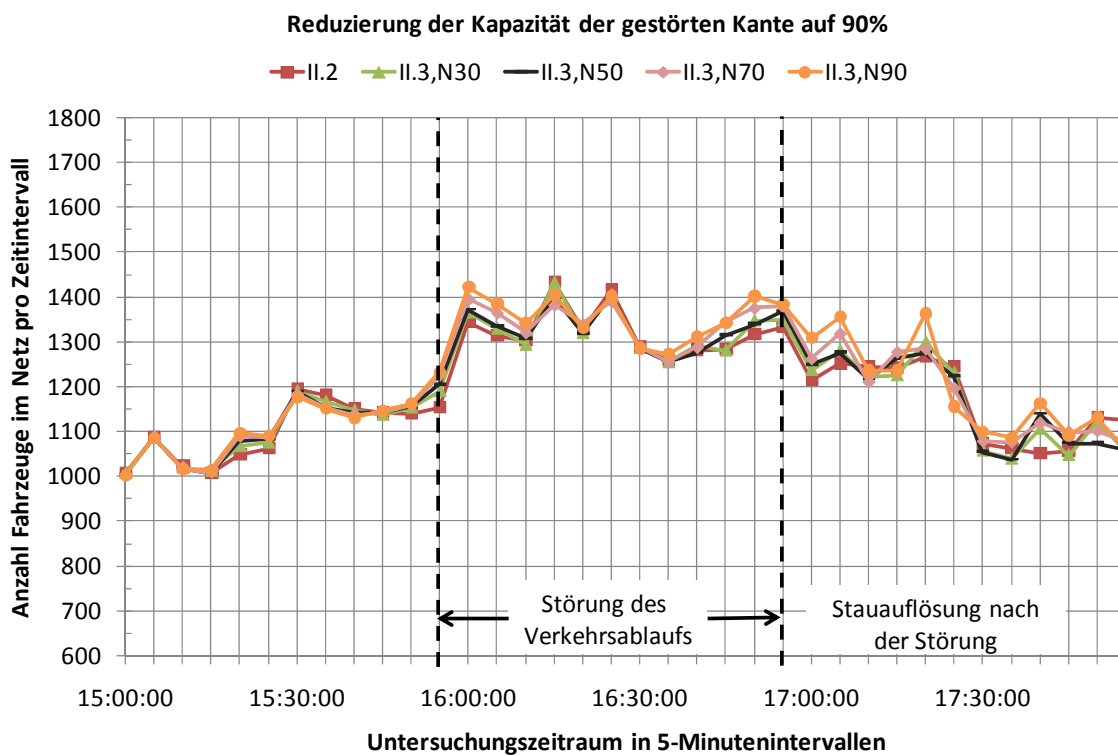
**Abbildung 59: Veränderung der Nachfrageganglinie bei einer Netzauslastung von 80%**

Falls die Störung nur schwach ist, sinkt die Bereitschaft zur Verschiebung der Abfahrtszeit, wie das Säulendiagramm in Abbildung 60 zeigt. Es gibt zwar immer noch viele Verkehrsteilnehmer, die ihre Abfahrtszeit vorverlegen. Insgesamt sind es aber deutlich weniger als im Fall einer starken Störung.



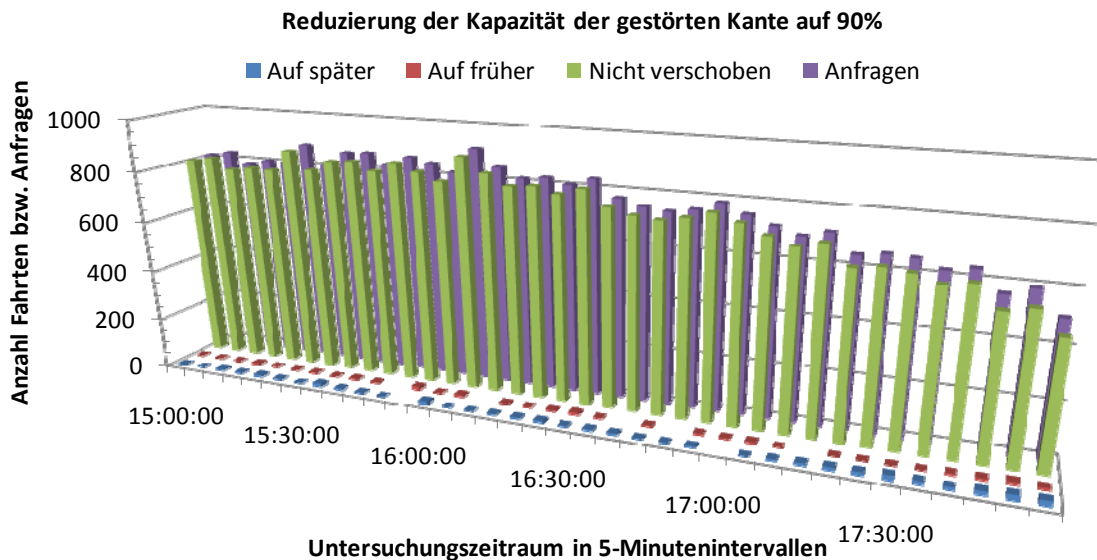
**Abbildung 60: Nutzung von Pre-Trip-Informationen bei einer Netzauslastung von 110%**

Entsprechend flacher verlaufen in Abbildung 61 auch die Anstiege der Verkehrsnachfrageganglinien für die Untersuchungsfälle mit Informationen ab dem Auftreten der spontanen Störung um ca. 16:00 Uhr.

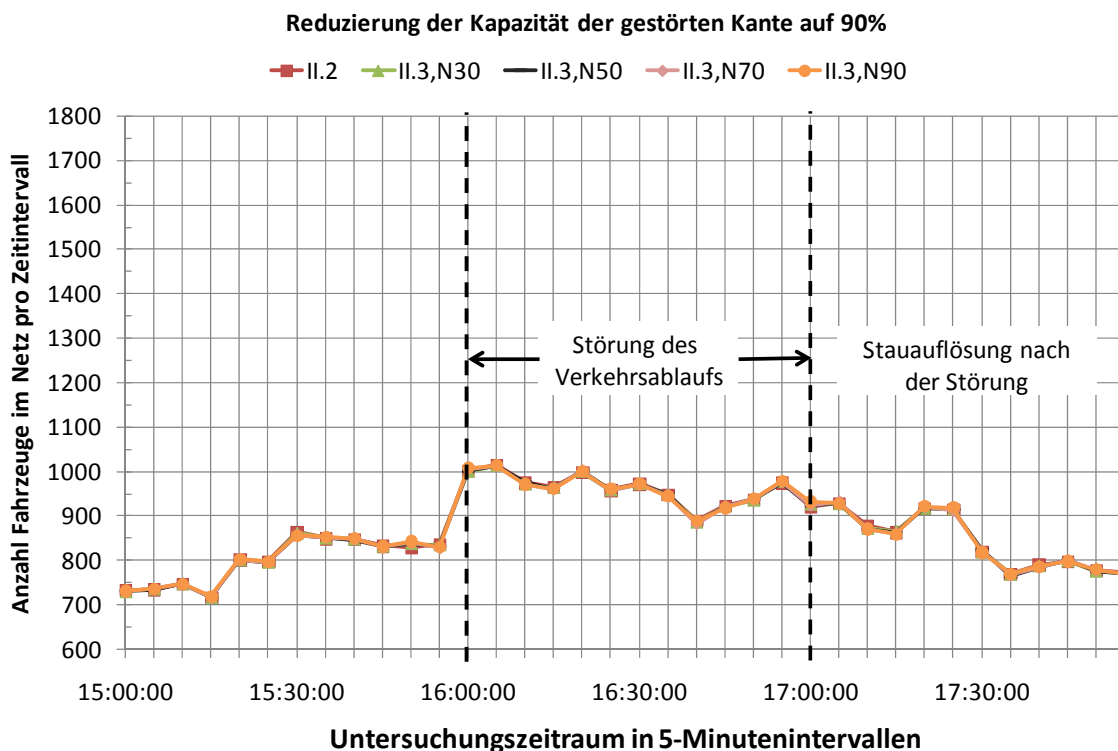


**Abbildung 61: Veränderung der Nachfrageganglinie bei einer Netzauslastung von 110%**

Wenn eine schwache Störung bei einem Anteil der Nachfrage von 80% auftritt, gibt es, wie in Abbildung 62 dargestellt, so gut wie keine Entscheidungen zur Verschiebung des Abfahrtszeitpunktes mehr. Dies ist plausibel, weil die schwache Störung keinen großen Einfluss auf die Reisezeiten hat.



**Abbildung 62: Nutzung von Pre-Trip-Informationen bei einer Netzauslastung von 80%**  
 Wenn es kaum Verschiebungen der Abfahrtszeit gibt, darf es auch keine Veränderung der Nachfrageganglinie geben. Deshalb überlagern sich die Kurvenverläufe in Abbildung 63.



**Abbildung 63: Veränderung der Nachfrageganglinie bei einer Netzauslastung von 80%**

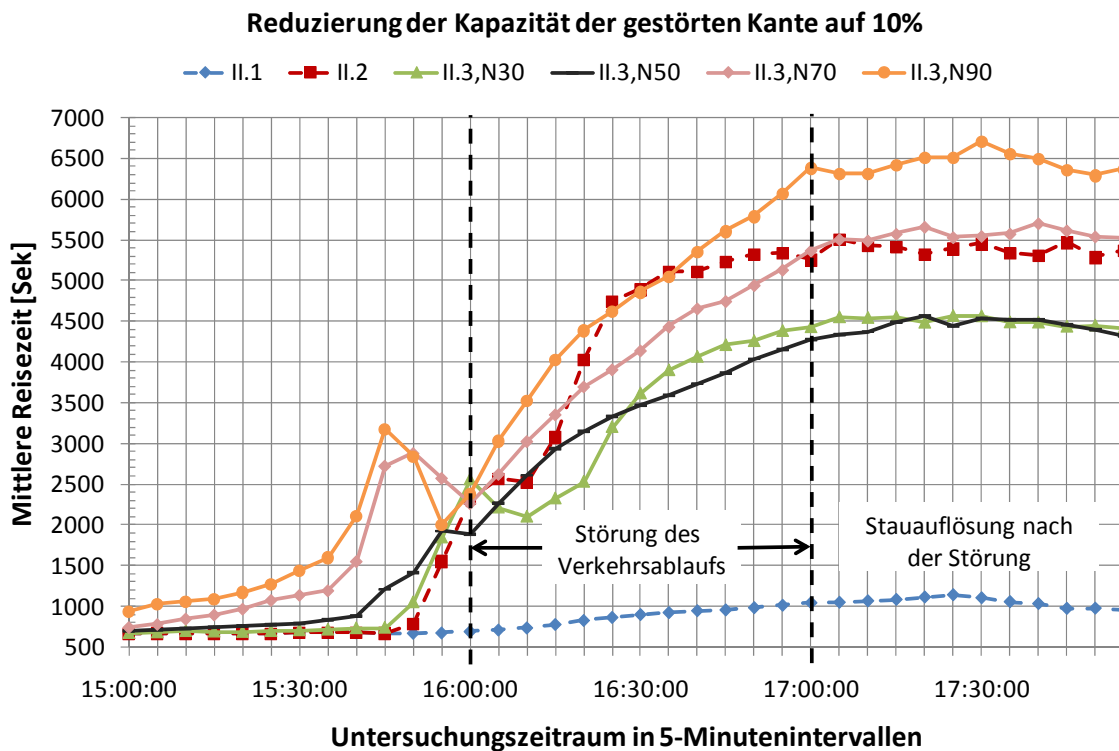
Die Auswertungen lassen erkennen, dass die Bereitschaft zur Verschiebung des Abfahrtszeitpunktes mit steigender Störungsstärke zunimmt. Ferner üben Pre-Trip-Informationen eher einen negativen Effekt auf die mittlere Reisezeit aus, weil bei Störungen ein großer Anteil der Verkehrsteilnehmer früher losfahren will, um nicht zu spät zu kommen. Somit stellen sich die informierten Fahrer direkt in den Stau, wodurch sie die Situation noch verschärfen.

#### 4.2.6.2 Veränderung der Reisezeitenganglinie

Die folgenden Abbildungen zeigen den Verlauf der Werte für die mittlere Reisezeit, die ein Fahrzeug gebraucht hat, wenn es in dem entsprechenden Zeitintervall losgefahren ist. Die

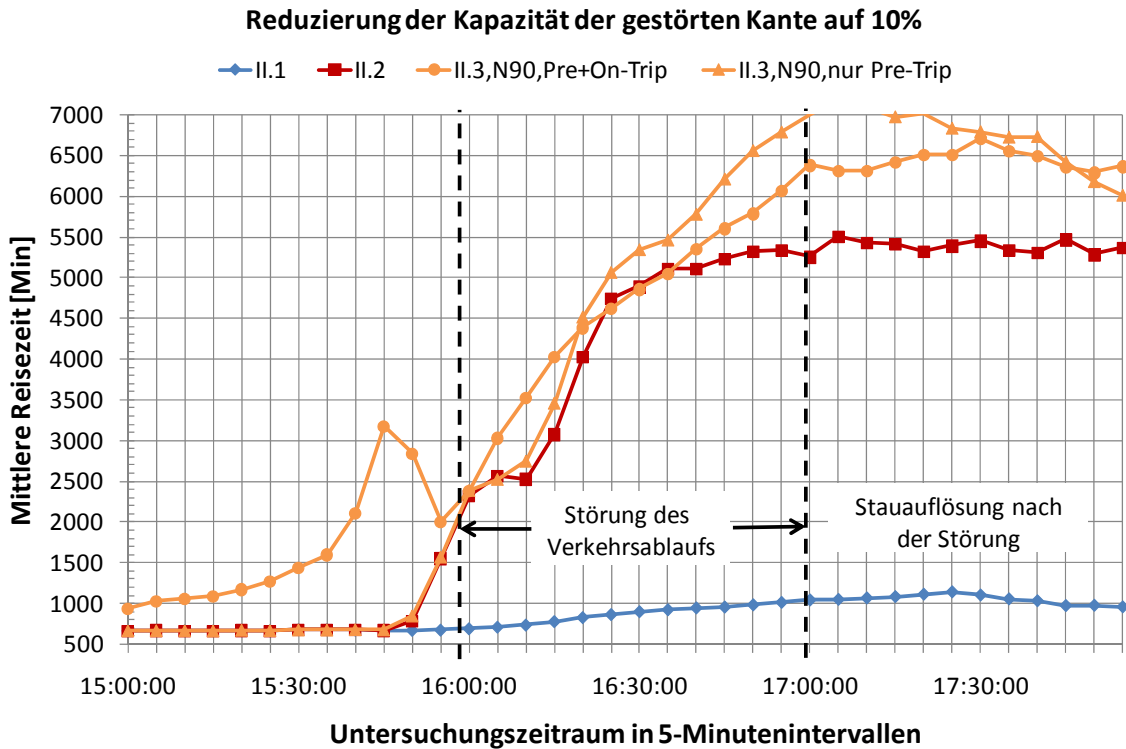
Linie mit den Rechtecken stellt die durchschnittliche Reisezeit für den Untersuchungsfall ohne Störungen und Informationen dar. Die Linie mit den Punkten macht die Messwerte für die mittlere Reisezeit bei einer Störung ohne Informationen sichtbar. Die übrigen Kurven zeigen den Verlauf der mittleren Reisezeit in Abhängigkeit vom Nutzungsgrad von Informationen.

Abbildung 64 und Abbildung 66 stellen die Veränderung der Reisezeiten bei einer Reduzierung der Kapazität einer alternativen Route auf 10% für Netzauslastungen von jeweils 110 und 80% dar. Aufgrund der Überlastung des Straßennetzes sind die Reisezeiten in Abbildung 64 höher. Mit dem Auftreten der spontanen Störung steigen sie ohne Informationen anhand der Kurve mit den Punkten in beiden Fällen plötzlich steil an bis sie nach Erreichen einer Spitze um ca. 16:30 Uhr im Überlastungsfall stagnieren und bei einer Netzauslastung von 80% wieder fallen. Der Grund für die Verringerung der Reisezeiten ist eine allmählich abnehmende Nachfrage im weiteren Verlauf des späten Nachmittags und die Auflösung des Staus ab ca. 17:00 Uhr. Im Überlastungsfall stagnieren die Reisezeiten auf hohem Niveau, weil die Auflösung des Staus aufgrund der hohen Nachfragemenge länger dauert.



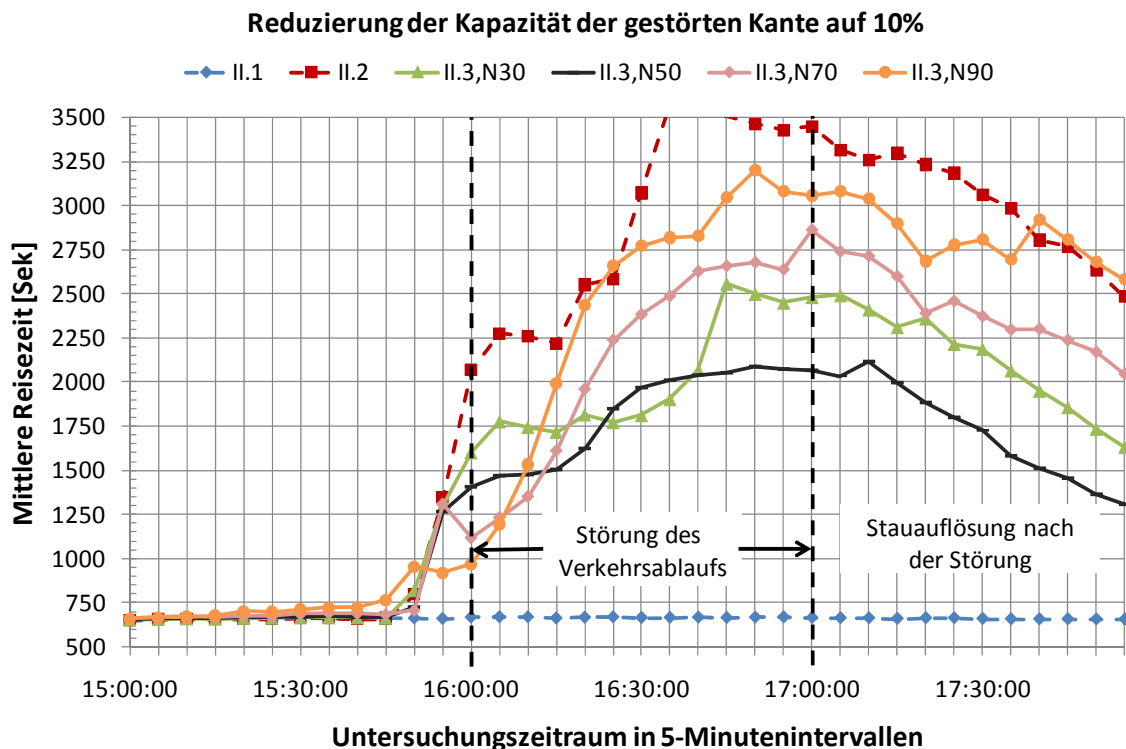
**Abbildung 64: Veränderung der Reisezeitengangleinie bei einer Netzauslastung von 110%**

Auffällig ist, dass in Abbildung 64 die durchschnittlichen Reisezeiten bei einem Nutzungsgrad von 70 und 90% bereits vor Beginn der spontan auftretenden Störung höher sind als ohne Verkehrsdienst. Außerdem geht die bis dahin stetig ansteigende mittlere Reisezeit ab ca. 15:45 Uhr plötzlich wieder zurück. Dieser An- und Abstieg der Reisezeit auf einem höheren Niveau als ohne Verkehrsdienste, kann mit der destabilisierenden Wirkung der On-Trip-Informationen bei hohen Nutzungsgraden und hoher Auslastung begründet werden, die in Kapitel 4.2.5 gezeigt wurde. Einerseits wird diese Vermutung durch die Beobachtung der Fahrtverläufe und Verkehrsverhältnisse am Computerbildschirm während der Simulation unterstützt. Andererseits bestätigt dies das Ergebnis einer Simulation, in der nur Pre-Trip-Informationen verwendet wurden.



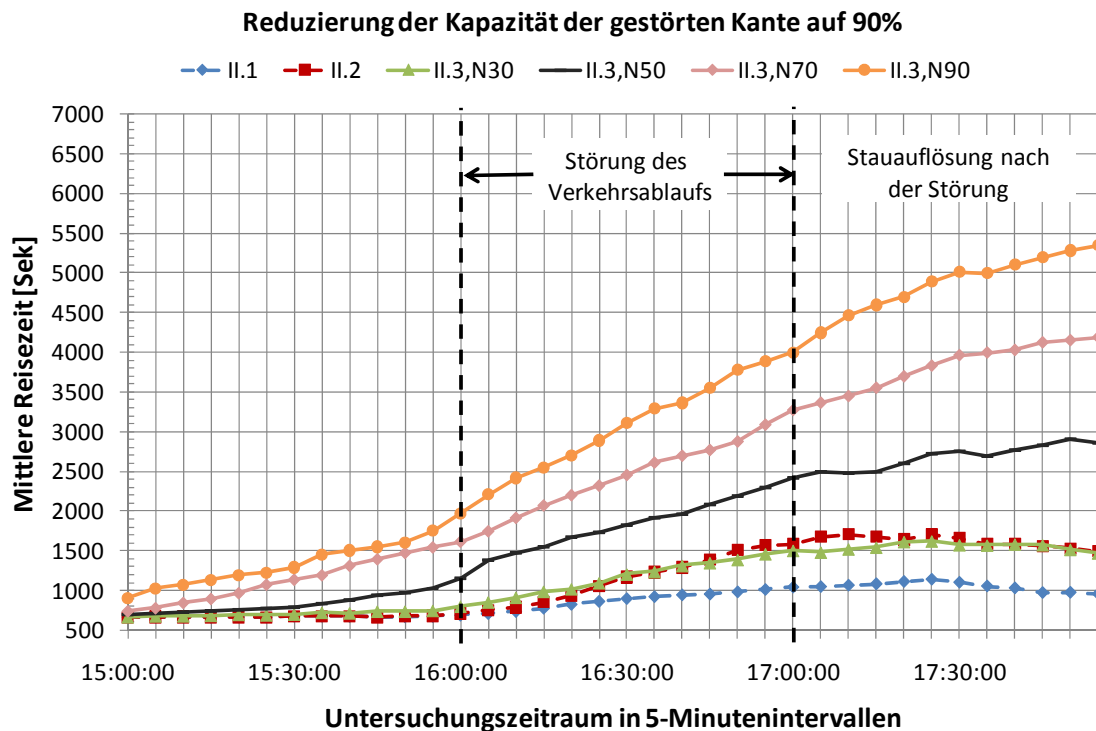
**Abbildung 65: Veränderung der Reisezeitenganglinie bei einer Netzauslastung von 110%**

In der dazugehörigen Grafik in Abbildung 65 steigt nämlich die Reisezeit erst mit Beginn der Störung steil an und liegt dann stets über den Messwerten mit Störung und ohne Informationen. Außerdem ist kein Knick im Kurvenverlauf mehr zu beobachten, wenn die Pkw-Fahrer nur Pre-Trip-Informationen verwenden. Ferner wird dadurch noch einmal der negative Einfluss der Pre-Trip-Informationen bei einer spontan auftretenden Störung bestätigt. Denn zu keinem Zeitpunkt liegen die Reisezeiten mit Informationen unter den Reisezeiten ohne Verkehrsdienste.



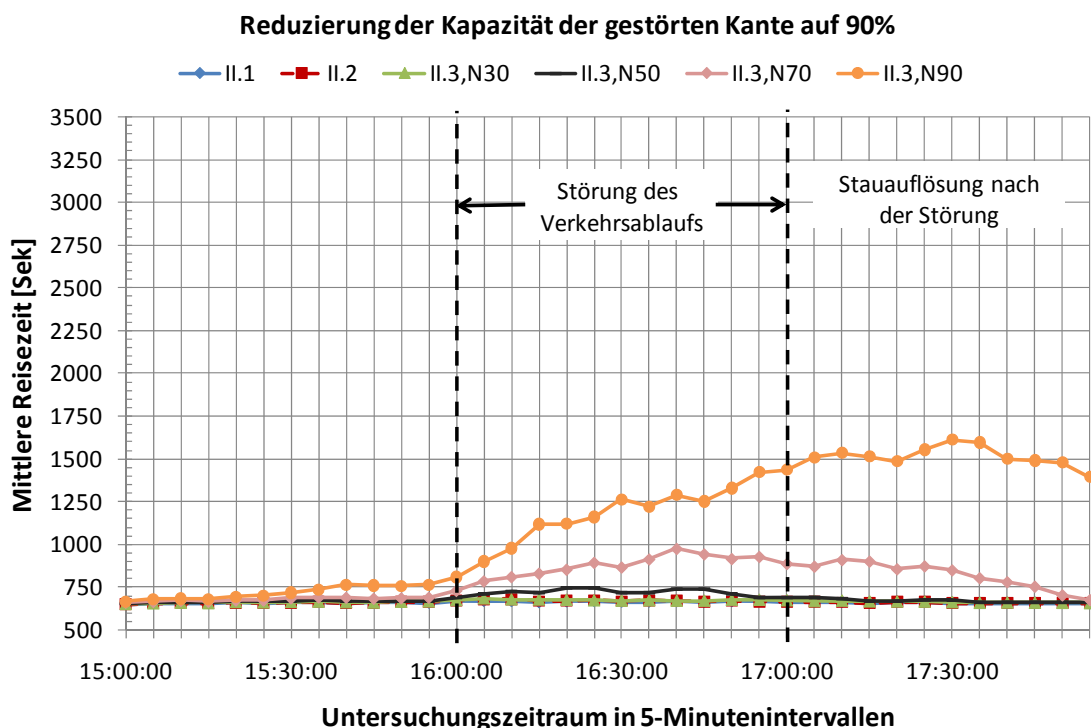
**Abbildung 66: Veränderung der Reisezeitenganglinie bei einer Netzauslastung von 80%**

Wenn das Ausmaß der Störung sehr klein ist, kann höchstens ein niedriger Nutzungsgrad von 30% noch positiv auf eine Verkürzung der Reisezeiten wirken. Wie Abbildung 67 und Abbildung 68 zeigen, führen größere Nutzungsgrade als 30% fast ausschließlich zu einer Verschlechterung der Verkehrszustände.



**Abbildung 67: Veränderung der Reisezeitenganglinie bei einer Netzauslastung von 110%**

Insbesondere bei der Netzauslastung von 80% wird anhand von Abbildung 68 deutlich, dass Informationen kaum in der Lage sind, die mittleren Reisezeiten zu reduzieren. Vielmehr führen höhere Nutzungsgrade als 30% immer zu einer höheren mittleren Reisezeit als ohne Informationen.



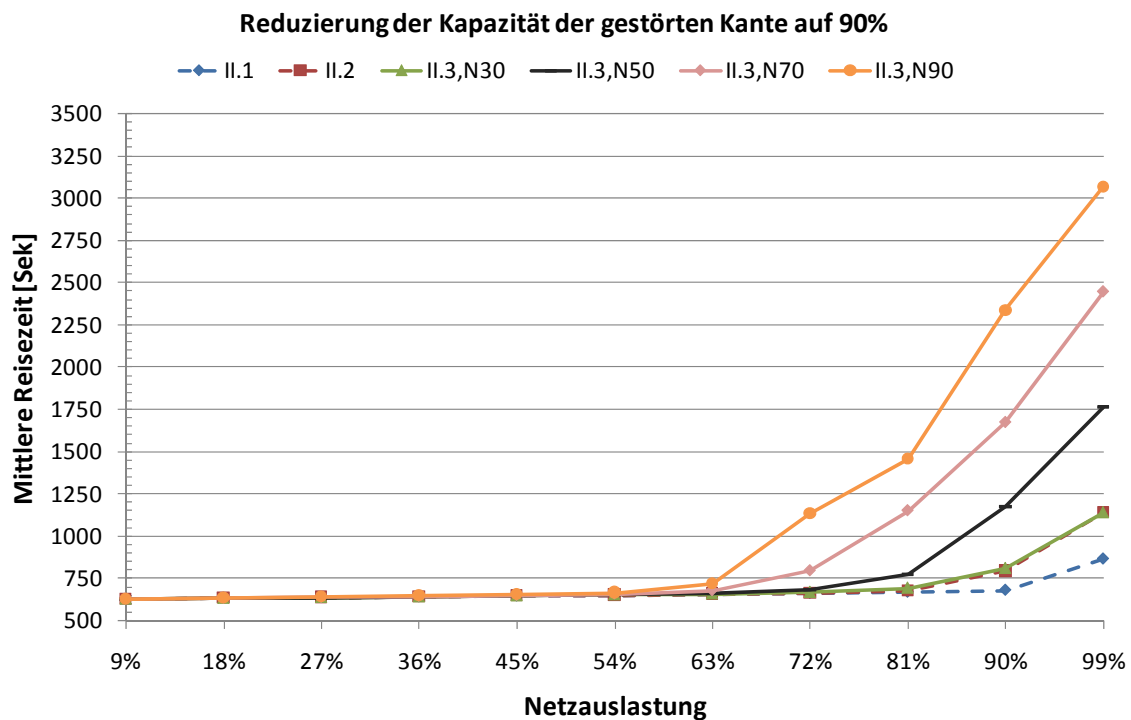
**Abbildung 68: Veränderung der Reisezeitenganglinie bei einer Netzauslastung von 80%**



### 4.2.6.3 Mittlere Reisezeiten in Abhängigkeit von der Streckenkapazität

Nachdem die Reisezeitganglinien die Veränderung je Zeitintervall gezeigt haben, folgt die Analyse der mittleren Reisezeit über den gesamten Auswertungszeitraum von 15:00 bis 18:00 Uhr für alle Verkehrsteilnehmer und differenziert nach Nutzer und Nichtnutzer von Informationen. Die Grafiken zeigen immer einen Ausschnitt zwischen einer mittleren Reisezeit von ca. 650 bis maximal 3500 Sekunden.

Die Messwerte für den Untersuchungsfall ohne Störung und Informationen (II.1) sind durch Rauten gekennzeichnet. Die Rechtecke stehen für die mittlere Reisezeit im Untersuchungsfall mit Störung, aber ohne Informationen (II.2). Zwischen den beiden gestrichelten Kurven liegt der Raum für Verbesserungen durch Pre- und On-Trip-Informationen. Insgesamt zeigt sich ein ähnliches Bild, wie bei der Untersuchung von Informationen während der Fahrt in Kapitel 4.2.5.1.1. Daher wurde hier darauf verzichtet, die Auswertungen für eine mittlere Störung darzustellen. Der Vollständigkeit halber wurden die Grafiken aber in den Anhang I.II gestellt.

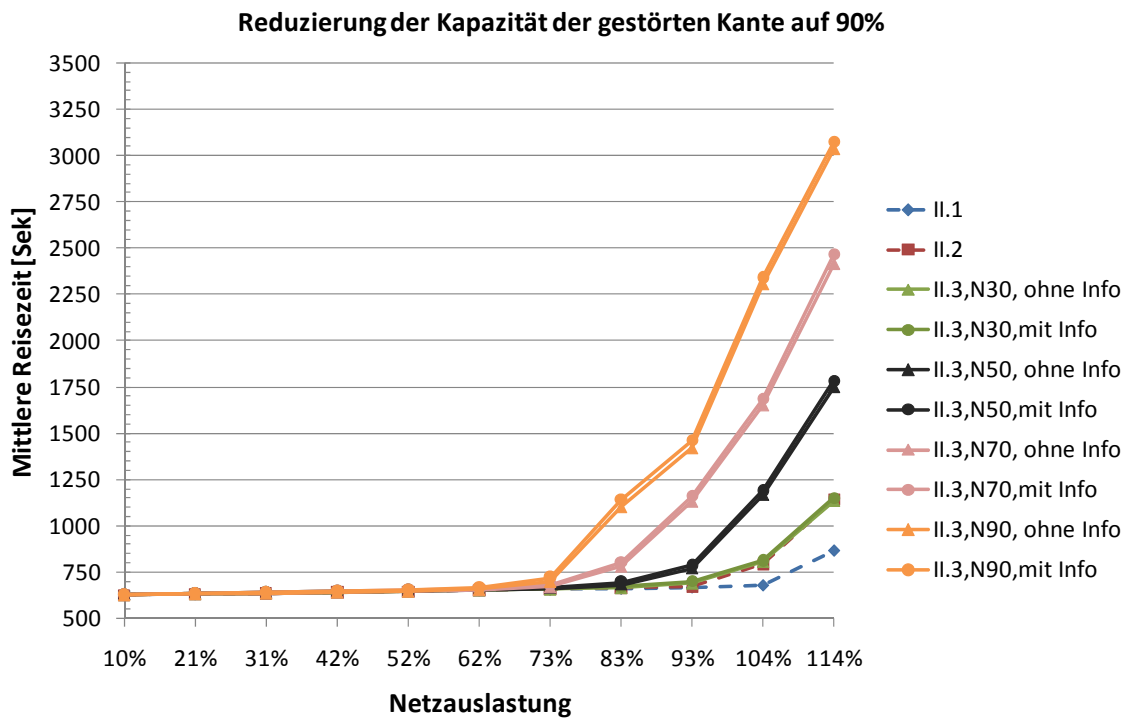


**Abbildung 69: Mittlere Reisezeiten über alle Verkehrsteilnehmer**

Für eine schwache Störung, d. h. bei einer Reduzierung der Kapazität einer der alternativen Routen auf 90%, zeigt Abbildung 69, dass es kein Szenario gibt, bei dem Informationen ab einem Nutzungsgrad von 30% oder mehr in der Lage sind, die mittlere Reisezeit zu verbessern. Dies bestätigt noch einmal das Ergebnis, wonach es besser ist, kleine Störungen nicht an die Verkehrsteilnehmer zu melden, weil sich dadurch die Verkehrsverhältnisse eher verschlechtern können. Die Ursache für die negativen Einflüsse der Informationen ist darin zu sehen, dass sich das System durch das Verschieben der Fahrten von einer Route zur anderen aufschauelt und dadurch der Stau noch verschärft wird.

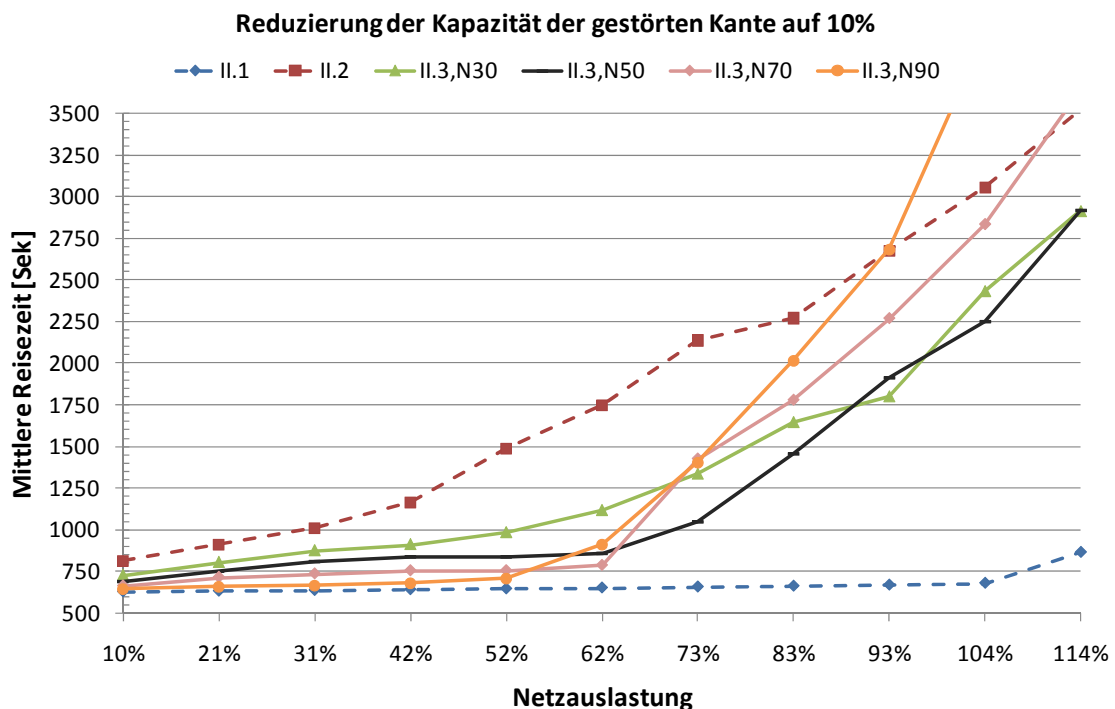
Abbildung 70 stellt die mittleren Reisezeiten je Nachfragesemgent, entweder mit oder ohne Informationen, dar. Die Kurvenverläufe liegen stets nahe beieinander, sodass keine großen Unterschiede vorliegen. Insgesamt kann man aber erkennen, dass die Verkehrsteilnehmer mit Informationen meistens schlechter dastehen, weil sie eher höhere durchschnittliche Reisezeiten erreichen als die Fahrer ohne Informationen.





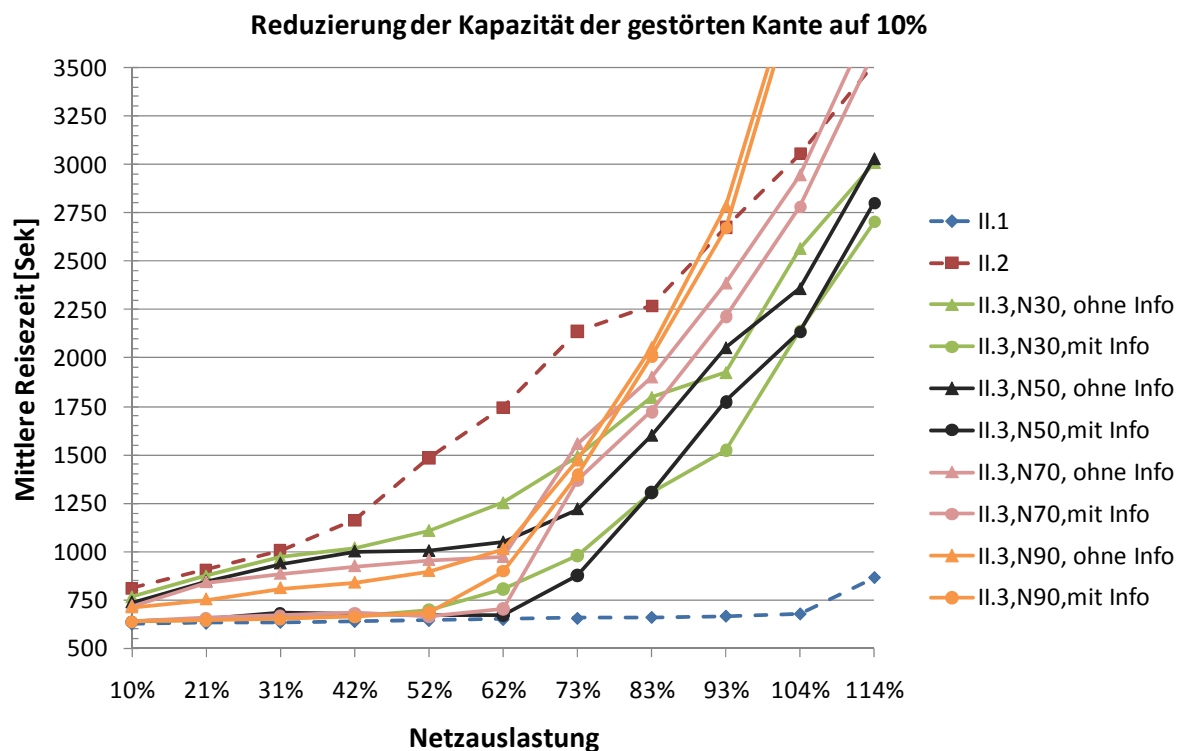
**Abbildung 70: Mittlere Reisezeit nach Nutzern und Nichtnutzern von Informationen**

Bei einer starken Störung, wie in Abbildung 71, haben Informationen in den meisten Fällen eine positive Wirkung. Nur bei einer hohen Netzauslastung ab 93 bzw. 110% und einem Nutzungsgrad von 90 bzw. 70% steigen die mittleren Reisezeiten mit Informationen über die Werte ohne die Nutzung des Verkehrsdienstes. Hier wird deutlich, dass sich bei hohen Netzauslastungen und Nutzungsgraden die Verschiebung der Abfahrtszeit aufgrund von Pre-Trip-Informationen negativ auswirkt. Denn bei der Untersuchung, bei der nur Meldungen während der Fahrt gegeben wurden, konnten alle Nutzungsgrade stets die mittlere Reisezeit verringern. Außerdem kann der Befund bestätigt werden, dass ein höherer Nutzungsgrad als 50% meistens keine besseren Ergebnisse mehr liefert.



**Abbildung 71: Mittlere Reisezeiten über alle Verkehrsteilnehmer**

Anhand von Abbildung 72 wird deutlich, dass bei einer starken Störung die Nutzer von Informationen eher gegenüber den Nichtnutzern profitieren. Dies ist mit einem kleinen Abstand auch dann noch der Fall, wenn der Nutzungsgrad mit 90% sehr hoch ist und sich die Situation gegenüber dem Szenario ohne Informationen verschlechtert.



**Abbildung 72: Mittlere Reisezeit nach Nutzern und Nichtnutzern von Informationen**

#### 4.2.6.4 Zusammenfassung

Tabelle 20 erfasst alle durchgängig positiven Wirkungen von Pre- und On-Trip-Informationen auf eine Verkürzung der Reisezeit. Bei einer schwachen Störung konnten insgesamt keine Verkürzungen der mittleren Reisezeiten gegenüber dem Untersuchungsfall ohne Informationen gemessen werden. Erst bei einer mittleren und starken Störung schaffen die Nutzungsgrade von 30 und 50% über alle Netzauslastungen eine positive Wirkung.

Reduktion der Kapazität in Bezug auf eine ...		Nutzungsgrade		Netzauslastung	
... der zwei Routen	... QZ-Beziehung	Von	Bis	Von	Bis
90%	95%	-	-	-	-
50%	75%	30%	50%	≈ 50%	> = 106%
10%	55%	30%	50%	< = 10%	> = 114%

**Tabelle 20: Positive Wirkungen von Pre- und On-Trip-Informationen über alle Netzauslastungen**

Tabelle 21 zeigt die durchgängig negativen Wirkungen von Pre- und On-Trip-Informationen. Auffällig ist, dass sich bei schwachen Störungen Verkehrsinformationen ab einem Nutzungsgrad von 30% nur negativ auf die Reisezeiten auswirken. Erst bei starken Störungen des Verkehrsablaufs lassen sich nicht mehr ausschließlich nur negative Wirkungen beobachten.

Tabelle 22 verdeutlicht nochmals, dass Informationen bei einer schwachen Störung so gut wie keine positive Wirkung erzielen. Erst bei einer mittleren Störung erreicht ein Nutzungsgrad von 30% bei einer Netzauslastung von 77% eine maximale Reduktion der mittleren

Reisezeit für alle Fahrzeuge um 34%. Bei einer starken Störung erhöht sich der Wert auf 55%, wenn der Nutzungsgrad 90% und die Netzauslastung 62% beträgt.

Reduktion der Kapazität in Bezug auf eine ...		Nutzungsgrade		Netzauslastung	
... der zwei Routen	... QZ-Beziehung	Von	Bis	Von	Bis
90%	95%	30%	90%	≈ 64%	> = 99%
50%	75%	90%	-	≈ 60%	> = 106%
10%	55%	-	-	-	-

**Tabelle 21: Negative Wirkungen von Pre- und On-Trip-Informationen über alle Netzbelastungen**

Insgesamt decken sich die Ergebnisse tendenziell mit den Befunden der Untersuchung von On-Trip-Informationen in Kapitel 4.2.5.2. Der Unterschied besteht darin, dass nur On-Trip-Informationen in den Simulationsläufen eine positivere Wirkung ausgeübt haben als Pre- und On-Trip-Informationen zusammen. Dies zeigt sich auch darin, dass die positiven Wirkungsbereiche hinsichtlich der Nutzungsgrade und Netzauslastung größer waren, wenn Informationen nur während der Fahrt angeboten wurden.

Reduktion der Kapazität in Bezug auf eine ...		Maximale Reduktion der mittleren Reisezeit aller Fahrzeuge	Nutzungsgrad	Netzauslastung
... der zwei Routen	... QZ-Beziehung			
90%	95%	0,001%	30%	99%
50%	75%	34%	30%	77%
10%	55%	55%	90%	62%

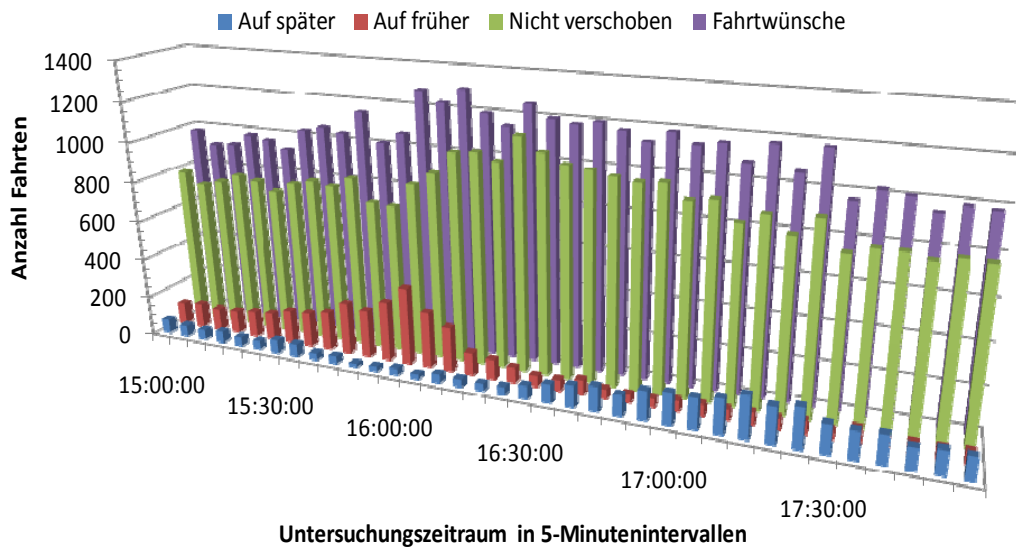
**Tabelle 22: Netzauslastung mit maximaler Reduktion der mittleren Reisezeit**

#### 4.2.7 Belastungsabhängige Preise bei hoher Netzauslastung

Straßenbenutzungsgebühren zur Steuerung der Verkehrsnachfrage zielen darauf, die Spitzen zu glätten, indem Verkehrsteilnehmer, die nicht bereit sind, einen zeitabhängig höheren Preis zu zahlen, ihre Abfahrtszeit verschieben. Da eine Steuerung nur dann notwendig ist, wenn die Nachfrage hoch ist und eine Gefahr für Überlastungen besteht, werden lediglich drei Szenarien mit Netzauslastungen von 90, 100 und 110% betrachtet. Stellvertretend für die übrigen Untersuchungsfälle werden die Ergebnisse für die Nachfrage von 100% dargestellt. Die restlichen Auswertungen stehen im Angang I.III. Die zeitabhängigen Mautgebühren, die bereits in Kapitel 4.2.3.1 beschrieben wurden, sind jeweils in die Grafiken eingefügt.

##### 4.2.7.1 Verschiebung der Abfahrtszeit

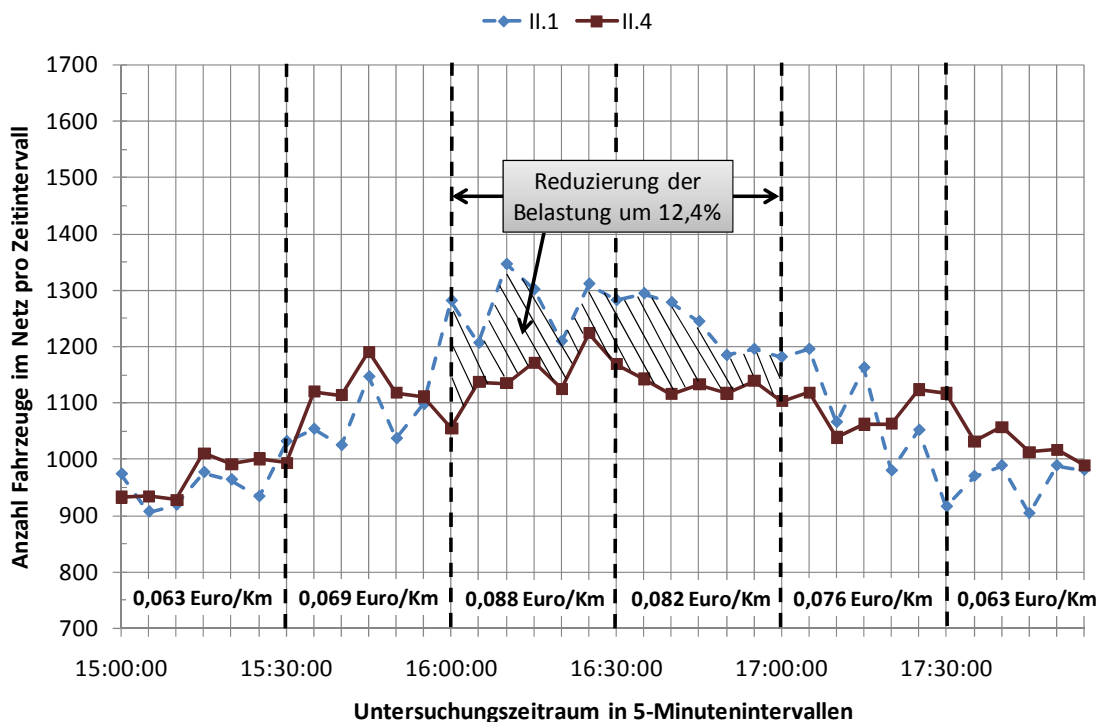
Abbildung 73 zeigt die Entscheidungen der Verkehrsteilnehmer, bei einer Maut ihre Abfahrtszeit zu verschieben. Die erste Reihe kennzeichnet die Verschiebungen auf einen späteren und die zweite auf einen früheren Startzeitpunkt. In der dritten Reihe stehen die Entscheidungen, die ursprünglich geplante Abfahrtszeit beizubehalten. Die Summe aus den vorderen drei Reihen ergibt die gesamte Nachfrage für das jeweilige Zeitintervall in der hintersten Säulenreihe.



**Abbildung 73: Verschiebung der Abfahrtszeit aufgrund von Straßenbenutzungsgebühren**

Anhand von Abbildung 73 wird deutlich, dass mit Beginn der höheren Gebühren um 15:30 Uhr mehr Verschiebungen auf früher stattfinden. Dabei ist plausibel, dass bereits vor 15:30 Uhr mehr Verlagerungen der Abfahrtszeit zu beobachten sind, obwohl hier nur der Grundpreis zu bezahlen ist. Denn durch die Ausweicher aus den teureren Zeitintervallen hat sich die Verkehrsnachfrage in diesem Zeitraum erhöht, was wiederum die bisher zu dieser Zeit startenden Autofahrer dazu veranlassen kann, ebenfalls ihre Startzeit zu verschieben. Die gleichen Phänomene sind am Ende des Zeitraumes mit höheren Preisen zu beobachten, in dem die Pkw-Fahrer ihre Startzeit eher auf später verschieben. Am wenigsten werden die Fahrten in der Mitte um 16:30 Uhr verschoben, weil hier die Flexibilität fehlt und die Verkehrsteilnehmer ihren Abfahrtszeitpunkt nicht so weit verschieben können, um der Maut zu entgehen.

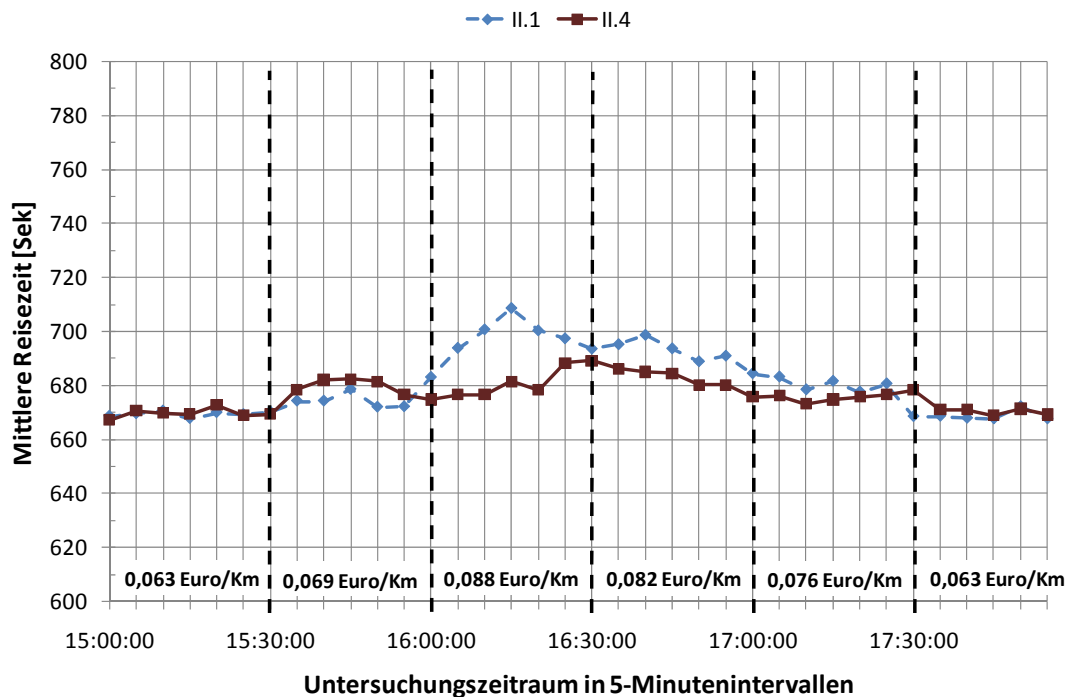
#### 4.2.7.2 Veränderung der Verkehrsnachfrageganglinie



**Abbildung 74: Veränderung der Nachfrageganglinie bei einer Netzauslastung von 100%**

Abbildung 74 zeigt die Veränderung der Verkehrsnachfrageganglinie durch eine Maut bei einer Netzauslastung von ca. 100%. Die Rauten stellen die Messwerte für die Anzahl der Fahrzeuge im Untersuchungsfall ohne Preise (II.1) dar. Anhand der Linie mit den Rechtecken (II.4) wird deutlich, dass die Maut die Nachfrage aus der Spitze zwischen ca. 16:00 und 17:00 Uhr in die jeweils angrenzenden Zeitintervalle verlagert. Somit wird eine Entlastung um ca. 12,4% erreicht. Ähnliche Werte ergeben sich für die Netzauslastungen von 90% mit einer Reduzierung der Verkehrsnachfrage um 12,5% und 110% mit einer Reduktion um 10,4%.

#### 4.2.7.3 Veränderung der Reisezeitganglinie



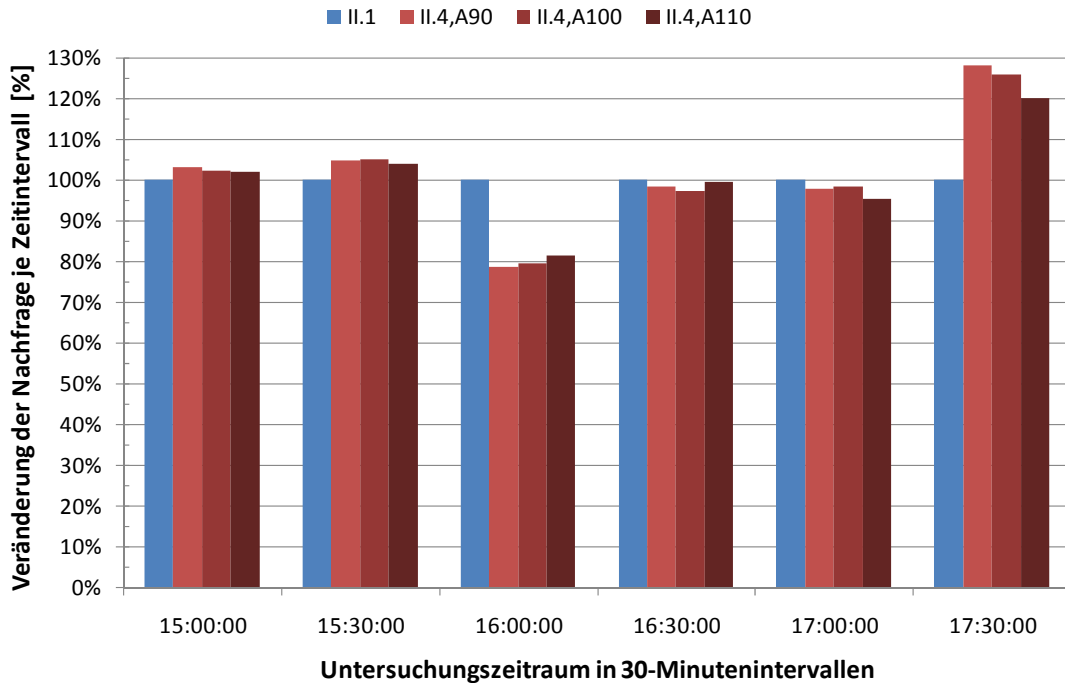
**Abbildung 75: Ganglinie der mittleren Reisezeiten bei einer Netzauslastung von 100%**

Neben der Ganglinie für die Verkehrsnachfrage verdeutlicht auch die Ganglinie der mittleren Reisezeiten in Abbildung 75 den Effekt der Straßenbenutzungsgebühren. Die Kurve mit den Rauten, die den Untersuchungsfall mit Maut (II.4) kennzeichnen, verläuft deutlich flacher als die Linie mit den Rechtecken für den Untersuchungsfall ohne Preise (II.1). Außerdem kann man erkennen, dass durch die Verkehrsverlagerungen an den Rändern zwischen 15:15 und 16:00 sowie zwischen 17:30 und 17:15 Uhr die Reisezeiten gestiegen sind, weil dort die Kurve mit den Rauten über der mit den Rechtecken liegt.

#### 4.2.7.4 Zusammenfassung

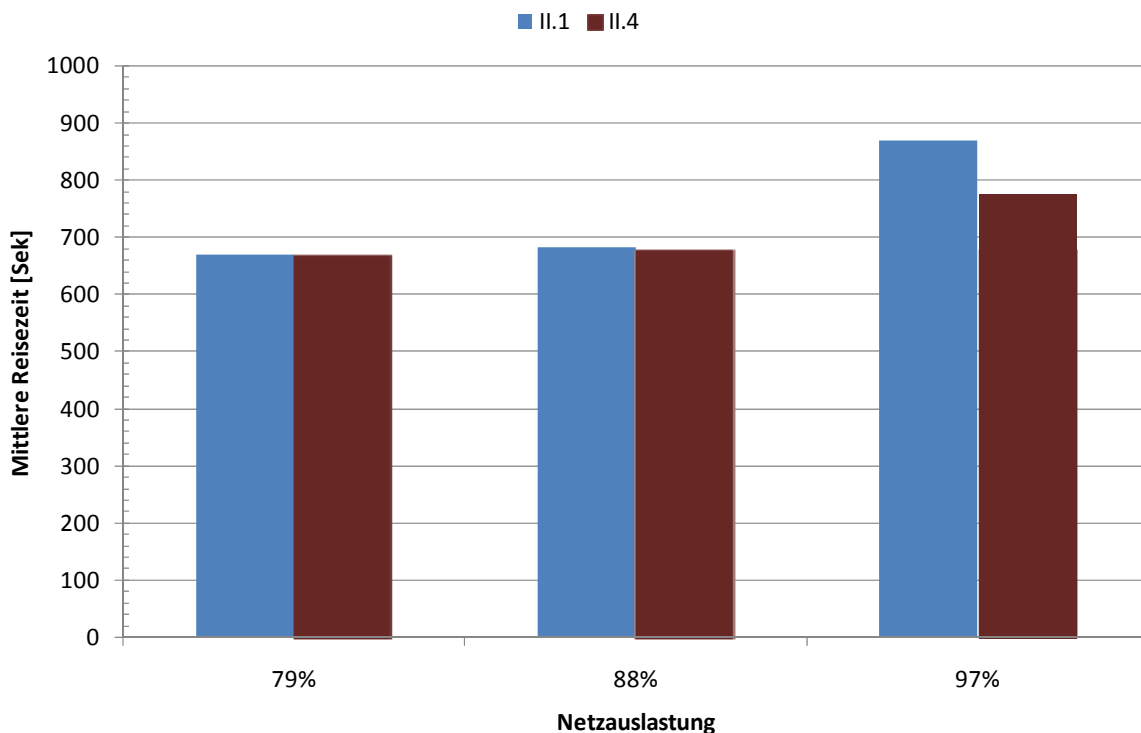
Abbildung 76 fasst die Wirkung der belastungsabhängigen Preise in Abhängigkeit von der Netzauslastung je Halbstundenintervall zusammen. Der erste Balken je Zeitintervall bezieht sich immer auf II.1 und stellt damit die Ausgangssituation mit 100% dar. Die nachfolgenden Säulen für die Untersuchungsfälle mit Maut bei verschiedenen Netzauslastungen (II.4) zeigen entweder eine Zu- (> 100%) oder Abnahme (< 100%) gegenüber II.1. Während bis 16:00 Uhr die Nachfrage in den Szenarien mit Maut steigt, ist eine Abnahme zwischen 16:00 und 16:30 Uhr besonders deutlich zu sehen. Aber auch von 16:30 bis 17:30 Uhr verringert sich die Verkehrsnachfrage wegen der Gebühr. Die größte Zunahme verzeichnet das letzte Zeitintervall, wonach die Fahrer in der Simulation am Nachmittag eher auf spätere Zeiten ausweichen. Die Höhe der jeweils letzten Säule je Zeitintervall zeigt, dass die Veränderung

bei einer Überlastung im Vergleich zu den anderen Untersuchungsfällen am niedrigsten ausfällt. Dies ist plausibel, weil es in einem überlasteten Netz weniger freie Kapazitäten gibt. Folglich sind auch die Reisezeiten in den alternativen Zeitintervallen höher, die neben der Straßenbenutzungsgebühr immer noch bei der Entscheidung berücksichtigt und gegenüber den Kosten abgewogen werden.



**Abbildung 76: Verlagerungen der Verkehrsnachfrage**

Abbildung 77 zeigt die Veränderung der mittleren Reisezeit über den gesamten Untersuchungszeitraum zwischen 15:00 und 18:00 Uhr. Entsprechend wird auch die Netzauslastung über den gesamten Zeitraum berechnet und fällt damit niedriger aus als während der Spitzenstunde zwischen 16:00 und 17:00 Uhr.



**Abbildung 77: Mittlere Reisezeiten in Abhängigkeit von der Netzauslastung**

Bei der niedrigsten, untersuchten Netzauslastung von 79% sind so gut wie keine Verbesserungen der mittleren Reisezeit über den gesamten Zeitraum erkennbar. Daraus folgt, dass die Verlagerungen durch die Maut, die anhand von Abbildung 76 beobachtet wurden, keinen zusätzlichen Nutzen für das Kollektiv der Verkehrsteilnehmer gebracht hat. Lediglich einzelne Fahrer können durch die Maut profitieren, wenn sie zwischen 16:00 und 16:30 Uhr losfahren, weil in diesem Zeitraum die größte Entlastung stattfindet. Bei einer höheren Netzauslastung von 88% im Gesamtzeitraum kommt es zu einer leichten Verbesserung der mittleren Reisezeit. In diesem Fall wird während der Spitzenstunde in etwa die Kapazitätsgrenze erreicht. Erst wenn es zu einer Überlastung in der Spitzenstunde kommt und die Netzauslastung im betrachteten Zeitraum von drei Stunden bei 97% liegt, kann die Maut deutliche Verkürzungen der mittleren Reisezeit über den Gesamtzeitraum erzielen. Aus dieser Analyse folgt, dass die Akzeptanz für Straßenbenutzungsgebühren, um Staus zu vermeiden, erst dann hoch sein wird, wenn die Netzauslastung temporär nahe oder über der Kapazitätsgrenze liegt. Ansonsten wären keine nennenswerten Reisezeitenvorteile zu erzielen, was der Einführung einer Maut zur Steuerung des Verkehrs ein wesentliches Argument entzieht.

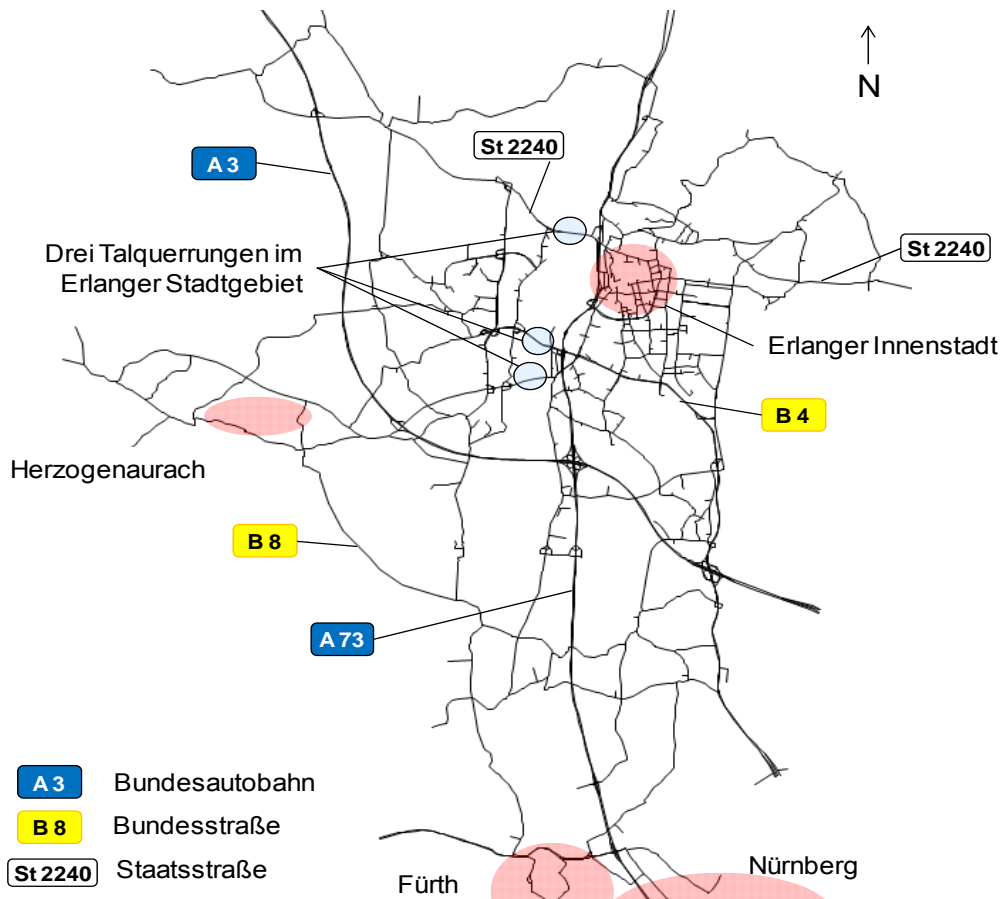
### **4.3 Anwendung für die Stadt Erlangen**

Als Anwendungsfall mit einem realen räumlichen Bezug wurde die Stadt Erlangen gewählt, weil hierfür das Streckennetz, die Verkehrsnachfrage und die Straßenbelastung mit Tageswerten im kalibrierten Zustand vorlagen. Sie wurden vom Stadtplanungsamt Erlangen und der Inovaplan GmbH im VISUM-Format zur Verfügung gestellt. Ferner lag für die Einwohner der Stadt Erlangen eine Verkehrsnachfrage auf Personenebene in Form von Wegeketten mit sekundengenauen Startzeiten für eine Woche vor, die mit einem mikroskopischen Modell simuliert wurden [64]. Darin fehlt allerdings der Verkehr von Personen, die nicht in Erlangen wohnen. Außerdem gibt es dazu keine kalibrierte Netzbelastung.

#### **4.3.1 Netzmodell**

Abbildung 78 zeigt das Straßennetz des Untersuchungsgebietes. Etwa in der Mitte treffen die Bundesautobahn A3 und der Frankenschnellweg (A73) im Autobahnkreuz Erlangen/Fürth aufeinander. Die Stadt Erlangen liegt im Nordosten des betrachteten Raumes. Im Süden grenzen die Städte Nürnberg und Fürth, im Westen Herzogenaurach und im Osten die Bundesstraße B4 das Gebiet ab. Die drei Talquerungen über die Regnitz und den Main-Donau-Kanal stellen während der Spitzenstunde Engpässe in der Straßeninfrastruktur von Erlangen dar.

Für die Anwendung in dieser Arbeit musste das Netzmodell noch soweit angepasst werden, dass es für die mikroskopische Simulation des Verkehrsablaufs aus VISUM nach VISSIM exportiert werden kann. Außerdem musste die Komplexität reduziert werden, damit die großen Datenmengen, die bei einer Mikrosimulation anfallen, mit der aktuell gängigen Computerhardware verarbeitet werden können. Dazu wurden z. B. Verkehrszellen aggregiert und das Streckennetz vereinfacht, indem die Anzahl von Knoten und Kanten reduziert wurde. Letzteres war möglich, ohne einzelne Straßen zu löschen, weil im VISUM-Netz häufig Knoten zwischen zwei Kanten ohne Abbiegerbeziehungen vorhanden waren, auf die verzichtet werden konnte. Abschließend lag eine Version des Straßennetzes mit 2570 gerichteten Kanten, 969 Knoten und 109 Verkehrszellen vor, die für die Abbildung des Verkehrsdienstes und zur Generierung der Routensätze in VISUM verwendet werden kann. Außerdem gab es eine entsprechende Variante des Straßennetzes für die Verkehrsflusssimulation in VISSIM.



**Abbildung 78: Untersuchungsgebiet Erlangen**

Zur Berechnung der Netzauslastung braucht man für diesen Anwendungsfall eine Methode, die ohne die Kenntnis der Nachfragemenge und Kapazität für jede einzelne Kante im Netz auskommt. Ein mögliches Verfahren, das in Kapitel 2.1.3 erläutert wurde, verwendet die aktuellen Reisezeiten auf den Routen im Netz. Danach erreicht eine QZ-Beziehung ihre Kapazitätsgrenze, wenn sich die Reisezeit um einen Faktor  $x$  gegenüber der Reisezeit  $t_0$  im unbelasteten Netz verlängert. Die Auslastung einer QZ-Beziehung ergibt sich entsprechend aus dem Verhältnis von mittlerer Reisezeit und der gerade noch akzeptierte Reisezeit. Für diese Auswertung wird für den Faktor  $x$  ein Wert von 2 angenommen, d. h. die Kapazitätsgrenze wird erreicht, wenn sich die Geschwindigkeit halbiert und damit die Reisezeit auf einer QZ-Beziehung in etwa verdoppelt hat ([1], z. B. 3-11 – 3-14).

### 4.3.2 Verkehrsnachfrage

Da das Netz nicht grundlegend geändert wurde, soll die Verkehrsnachfrage für den MIV aus dem VISUM-Modell verwendet werden, weil damit bereits eine kalibrierte Netzbelastung für den Straßenverkehr vorliegt. Die restliche Verkehrsnachfrage für andere Verkehrsmittel wird vernachlässigt, weil die Untersuchung sich nur auf den Straßenverkehr bezieht. Ein Problem bei der Übernahme der Verkehrsnachfrage aus VISUM besteht darin, dass diese sich als aggregierte Fahrtenmenge auf einen ganzen Tag bezieht. Für die Mikrosimulation in dieser Arbeit sind aber sekundengenaue Startzeiten notwendig, die mit den Simulationsergebnissen aus dem mikroskopischen Verkehrsnachfragemodell für die Einwohner von Erlangen vorliegen. Danach kann für jede QZ-Beziehung für Fahrten mit dem Pkw eine Tagesganglinie erstellt werden, indem man die einzelnen Wege je Zeitintervall von z. B. einer halben Stunde aufsummiert. Als nächstes wird dann die Tagesnachfrage aus VISUM anteilig auf die Zeit-



scheiben aufgeschlüsselt. Innerhalb eines Zeitraums kann dann durch eine Monte-Carlo-Simulation ein sekundengenauer Start für jede Fahrt zufällig berechnet werden. Dabei wird eine Gleichverteilung der Abfahrtszeiten je Zeitintervall angenommen. Für die QZ-Beziehungen, für die das Mikromodell keine Fahrten mit dem Pkw berechnet hat, wurde die Tagesganglinie für den Pkw-Quellverkehr oder ggf. die Tagesganglinie über alle QZ-Beziehungen im MIV für die zeitliche Aufteilung benutzt.

### 4.3.3 Eigenschaften der Untersuchungsfälle

Tabelle 23 fasst die verschiedenen Untersuchungsfälle für den Anwendungsfall Erlangen zusammen. Das erste Szenario III.1 stellt die Ausgangssituation ohne Störung, Informationen und Maut dar. Danach kommt mit III.2 und III.3 die Simulation einer Störung ohne bzw. mit Stauinformationen. Bei III.4 handelt es sich um einen Anwendungsfall mit einer belastungsabhängigen Maut auf den drei Talquerungen im Erlanger Stadtgebiet. Die Verkehrsnachfrage wird, wie in Kapitel 4.3.1 beschrieben, anhand einer Ganglinie mit sekundengenauen Abfahrten für den Nachmittag zwischen 14:30 bis 19:00 beschrieben. Für diesen Zeitraum ergeben sich für das Untersuchungsgebiet 100362 Fahrten mit dem Pkw. Lkw-Fahrten sind darin als umgerechnete Pkw-Einheiten enthalten.

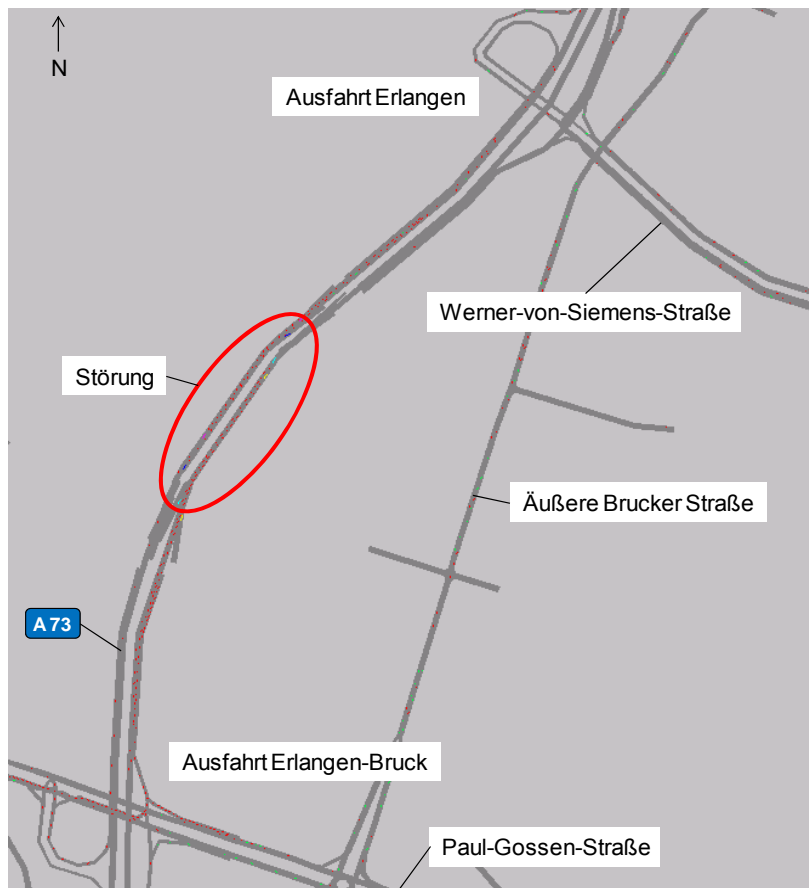
	Untersuchungszeitraum		Verkehrsnachfrage	Störung	Stauinformationen		Maut
	Fahrzeuge einsetzen	Dauer der Simulation			On-Trip	Pre-Trip	
III.1	16.200 Sek.	21.600 Sek.	Ganglinie	Nein	Nein	Nein	Nein
III.2	16.200 Sek.	21.600 Sek.	Ganglinie	Ja	Nein	Nein	Nein
III.3	16.200 Sek.	21.600 Sek.	Ganglinie	Ja	Ja	Ja	Nein
III.4	16.200 Sek.	21.600 Sek.	Ganglinie	Nein	Nein	Nein	Ja

**Tabelle 23: Charakterisierung der Untersuchungsfälle im Anwendungsfall Erlangen**

Wie schon in der vorangehenden Untersuchung im Ringnetz in Kapitel 4.2 ist die Simulationsdauer in VISSIM mit 21600 Sekunden länger als der Zeitraum für die Simulation der Nachfrage. Damit haben die Fahrzeuge am Ende die Möglichkeit, ihren Zielort noch zu erreichen, um die Reisezeiten zu erfassen. Für die Auswertung wird wieder der Zeitraum zwischen 15:00 und 18:00 Uhr betrachtet, um die zeitlichen Ränder abzuschneiden. Dadurch sollen unrealistische Effekte ausgeschaltet werden, die entstehen, weil das Streckennetz zu Beginn der Simulation leer ist und am Ende keine neue Nachfrage mehr simuliert wird. Die betrachteten Nutzungsgrade in III.3 variieren zwischen 30, 50, 70 und 90%.

#### 4.3.3.1 Modellierung einer Störung des Verkehrsablaufs

Zur Untersuchung der Wirkung von Stauinformationen wurde eine Störung des Verkehrsablaufs auf dem Frankenschnellweg zwischen den Auffahrten Erlangen und Erlangen-Bruck von ca. 16:00 bis 17:00 Uhr für beide Richtungen gesetzt. Die Störungsstärke entspricht in etwa der Reduktion der Streckenkapazität auf 50%. Dabei wurden die Einstellungen übernommen, die im symmetrischen Ringnetz durch eine Kalibrierung für eine zweispurige Schnellstraße ermittelt wurden. Abbildung 79 zeigt den entsprechenden Netzausschnitt in VISSIM.

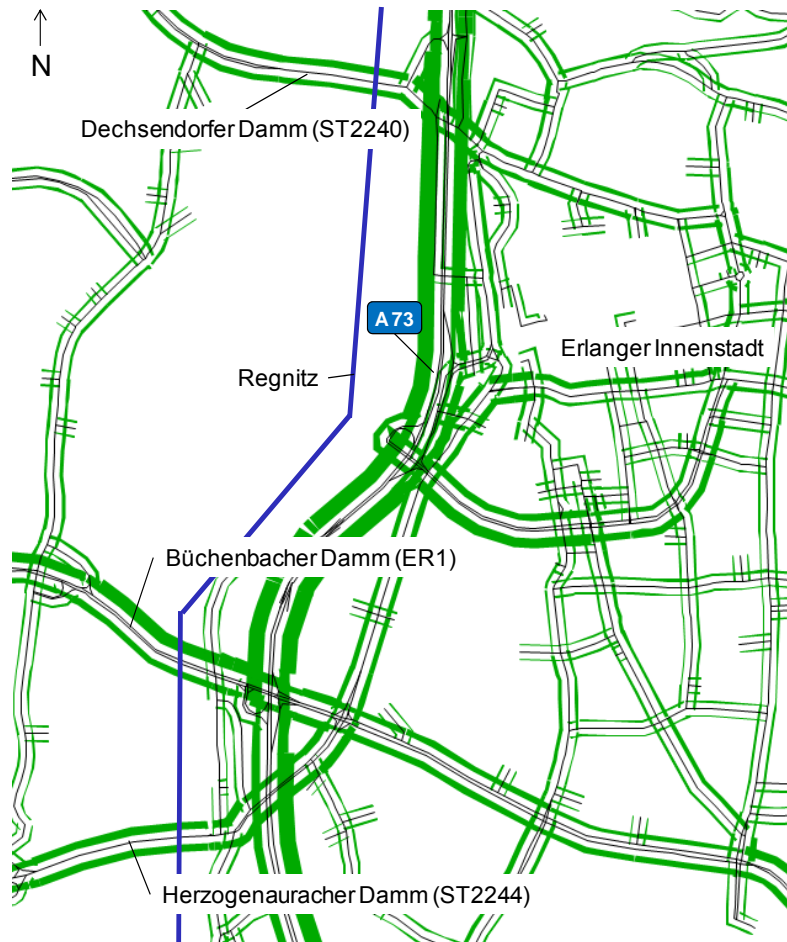


**Abbildung 79: Störung auf dem Frankenschnellweg**

#### 4.3.3.2 Differenzierte Preise für die Straßenbenutzung

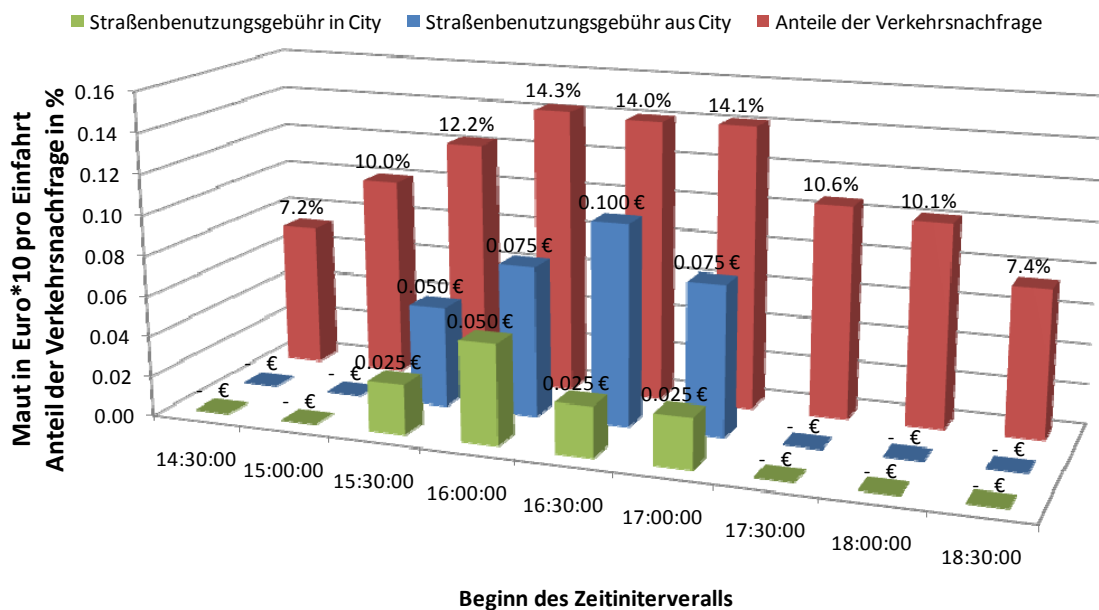
Tabelle 24 stellt die Merkmalsausprägungen des Mautsystems für den Anwendungsfall in Erlangen zusammen. Dabei ist das Ziel der Maut erneut die Steuerung der Verkehrsnachfrage (1). Grundsätzlich sollten Straßenbenutzungsgebühren nach Fahrzeugtypen, wie z. B. Pkw und Lkw differenzieren (2). Zur Vereinfachung wurden für das Modell Lkw in Pkw-Einheiten umgerechnet. Deshalb spielen Lastwagen für die Unterscheidung keine weitere Rolle. Da die Talquerungen während der Spitzenstunde einen Engpass im Straßennetz von Erlangen darstellen, wurden diese punktuell (4) mit einer zeitlich (3) abhängigen Maut versehen. Bei den betroffenen Strecken handelt es sich um kommunale oder Landes- bzw. Staatstraßen (5). Außerdem sollen alle Fahrspuren kostenpflichtig sein (6). Die Maut wird immer je Einfahrt erhoben (7).

Abbildung 80 zeigt den Ausschnitt des Streckennetzes mit Erlanger Innenstadt und den Brücken Dechsendorfer Damm im Norden, Büchenbacher Damm in der Mitte sowie Herzogenauracher Damm im Süden. Die Belastungsbalken an den Straßen entsprechen der berechneten Verkehrsstärke zwischen 15:00 und 18:00 Uhr nach einer dynamischen Umlegung der Verkehrsnachfrage. Anhand der Balkenbreite auf den Brücken wird deutlich, dass die Verkehrsströme aus Erlangen heraus stärker sind als in die Gegenrichtung. Diese unsymmetrische Belastung entspricht der zeitlich differenzierten Betrachtung, wonach die radial verlaufenden Strecken morgens ins Stadtzentrum hinein stärker und nachmittags aus dem Kern heraus höher belastet sind.



**Abbildung 80: Talquerungen im Erlanger Stadtgebiet**

Die Nachfrageganglinie in Abbildung 81 fasst die Verkehrsströme für die Querschnitte der drei Brücken zusammen. Insgesamt fahren im Modell zwischen 15:00 und 18:00 Uhr ca. 15% mehr Fahrzeuge aus der Innenstadt heraus als hinein. Deshalb ist es wegen der un-symmetrischen Belastung je Richtung am Nachmittag grundsätzlich teurer in die Innenstadt hinein zu fahren als heraus.



**Abbildung 81: Preishöhe je Fahrt und Richtung in Abhängigkeit von der Nachfrageganglinie**

Da die Preise belastungsabhängig sein sollen, werden sie zusammen mit den Anteilen der Verkehrsnachfrage in einer Grafik in Abbildung 81 dargestellt. Damit die Säulen für die Preise im Verhältnis zu den Prozentzahlen nicht zu hoch werden, wurden die Werte durch zehn geteilt. Anhand der Darstellung kann man ablesen, dass der höchste Preis mit einem Euro zwischen 16:30 und 17:00 Uhr bezahlt werden muss, um in Richtung Innenstadt zu fahren sowie 50 Cent zwischen 16:00 und 16:30 Uhr in die entgegengesetzte Richtung. Die Höhe der Preise wurde in Abhängigkeit von der Belastung je Zeitintervall und Fahrtrichtung festgelegt. Sie orientiert sich an der Größenordnung für die Höhe von Parkgebühren, die in der Erlanger Innenstadt zwischen 50 Cent und 1,70 Euro je Stunde liegen [65].

Merkmale	Ausprägungen			
	Ziel (1)	Finanzierung der Infrastruktur	Internalisierung externer Kosten	Steuerung der Nachfrage
Fahrzeugtyp (2)	Differenziert		Undifferenziert	
Tageszeit (3)	Differenziert		Undifferenziert	
Raum (4)	Eine Zone	Mehrere Zonen	kontinuierlich	punktuell
Straßentyp (5)	Autobahn	Bundesstraße	Landesstraßen	Kommunale Straßen
Fahrspur (6)	Partiell		Alle	
Abrechnung (7)	Pro Einfahrt	Mehrere Einfahrten	Km-abhängig	
Anpassung der Preise (8)	Kurzfristig (< 1 Jahr)		Langfristig (> 1 Jahr)	
Fahrzeugidentifikation (9)	Im oder am Fahrzeug		Außerhalb des Fahrzeugs	
Kontrolle (10)	Persönlich		Elektronisch	
Bezahlung (11)	Aktiv		Passiv	

**Tabelle 24: Ausprägungen des zu untersuchenden Mautsystems**

Wenn eine Maut nur punktuell auf einzelnen Streckenabschnitten erhoben wird, ist eher von einer technisch weniger anspruchsvollen Lösung auszugehen. Folglich werden die mautpflichtigen Fahrzeuge außerhalb z. B. durch Kameras identifiziert (9). Anhand einer automatischen Bildauswertung könnte dann kontrolliert werden, ob die Maut bezahlt wurde oder nicht. Ferner sind sowohl aktive als auch passive Bezahlungssysteme denkbar (10).

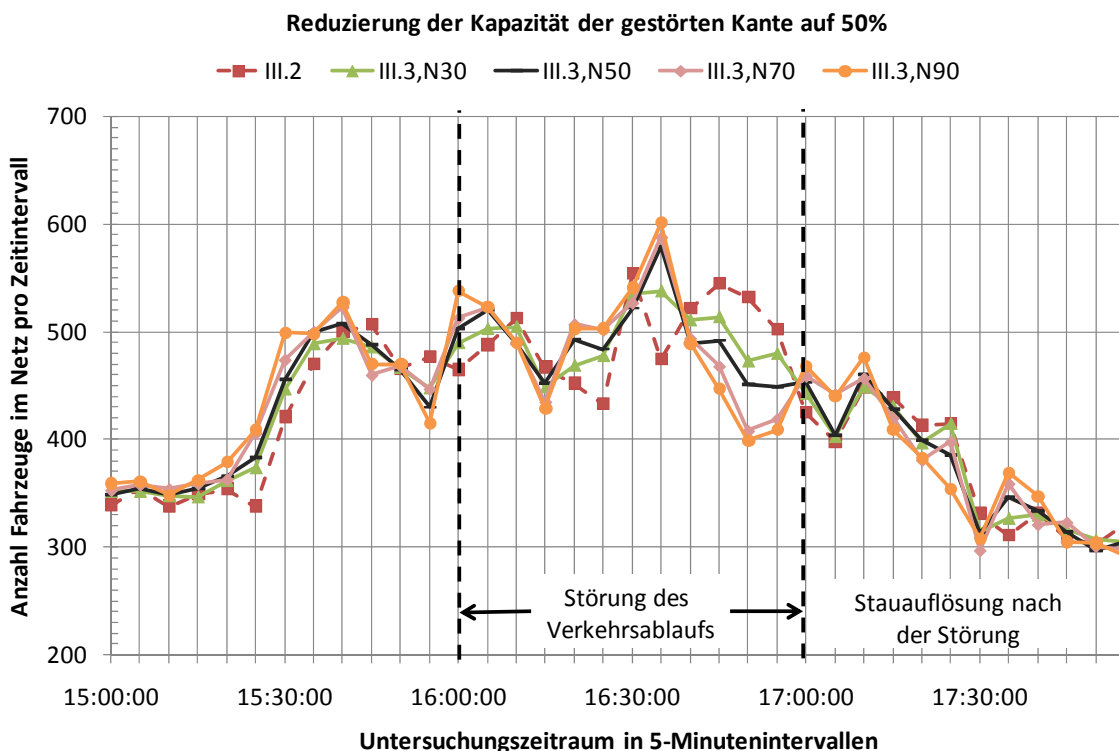
#### 4.3.4 Pre- und On-Trip-Informationen bei spontan auftretender Störung

Bei Störungen des Verkehrsablaufs, wie z. B. durch einen Unfall, verringert sich die Kapazität auf der betroffenen Strecke. Die Kapazitätsreduzierung kann sich auf einen größeren Netzausschnitt auswirken und hat direkte Folgen für die Auslastung des Netzes. Um die Netzauslastung in Abhängigkeit von einer Störung zu berechnen, muss zuerst der relevante Netzausschnitt definiert werden, der von der Störung betroffen ist. Denn Teile eines Netzes, die zwar noch freie Kapazitäten aufweisen, aber aufgrund einer nicht mehr akzeptablen Reisezeit als Ausweichstrecke nicht in Frage kommen, dürfen nicht bei der Berechnung der Netzauslastung berücksichtigt werden. Somit umfasst der relevante Bereich alle alternativen Routen für die QZ-Beziehungen, die von der Störung betroffen sind. Das entspre-

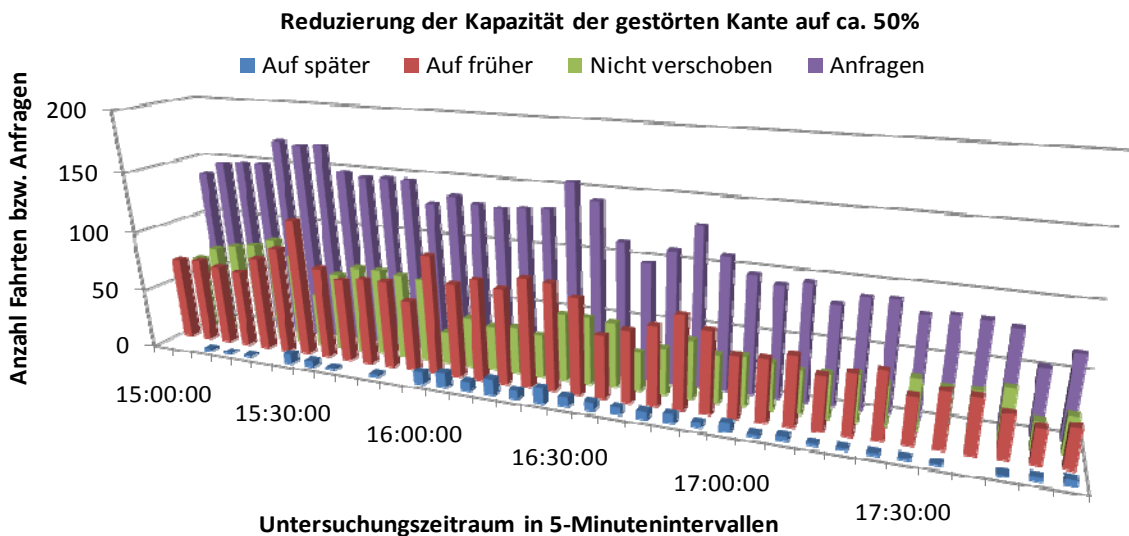
chende Strombündel, das über die gestörten Strecken fährt, kann mithilfe von VISUM berechnet werden.

#### 4.3.4.1 Wirkung von Pre-Trip-Informationen auf die Verkehrsnachfrageganglinie

Abbildung 82 verdeutlicht, dass Verkehrsteilnehmer ihre Fahrten bei steigender Belastung und Nutzung von Pre-Trip-Informationen tendenziell nach vorne verlegen. Dies ist in den Modellrechnungen ab ca. 15:15 Uhr bereits schon vor Beginn der Störung zu erkennen. Die Verschiebungen vor der Störung können damit begründet werden, dass sich das Netz nicht in einem vollkommenen Gleichgewichtszustand befindet. Die steigenden Verkehrsbelastungen am Nachmittag führen zu höheren Reisezeiten und stärkeren Streuungen der Fahrtzeit zwischen den verschiedenen Routen. Deshalb findet der Verkehrsdienst auch häufig eine bessere Alternative zur Initialroute. Da die Probanden in der empirischen Studie ein hohes Vertrauen in die Verkehrsdienste hatten, reagieren die Fahrer im Modell häufig mit einer Vorverlegung der Abfahrtszeit, falls der Informationsdienst eine bessere, frühere Route empfiehlt. Dieses Phänomen wurde in abgeschwächter Form bereits in den Simulationsergebnissen mit dem Ringnetz bei höheren Netzauslastungen beobachtet. Insgesamt war dort die Anzahl der Verschiebungen vor Störungsbeginn geringer, weil die beiden alternativen Routen aufgrund der Symmetrie vollkommen identisch in Hinblick auf ihre Kapazitäten und Widerstandsfunktionen sind.

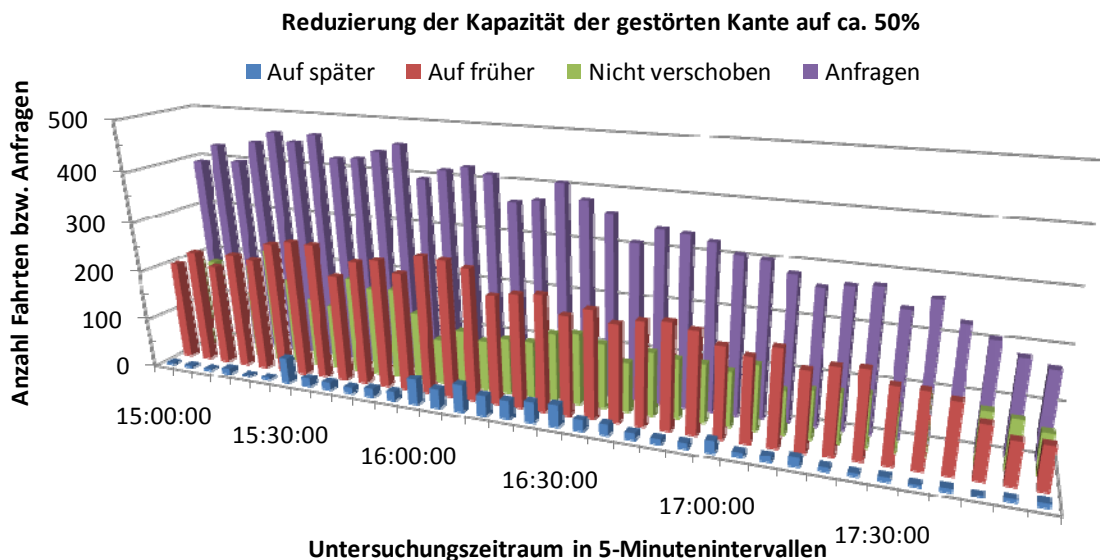


Weiterhin fällt auf, dass sich die Verkehrsnachfrage im Zeitintervall bis ca. 16:35 Uhr bei Nutzungsgraden ab 50% stark erhöht. Dieser Anstieg von Fahrtwünschen wurde ebenfalls schon bei den Simulationen im Ringnetz beobachtet. Denn die Störung, die zwischen 16:00 und 17:00 gesetzt wurde, veranlasst viele Verkehrsteilnehmer dazu, ihre Abfahrtszeit auf früher zu verschieben, in der Hoffnung dadurch nicht zu spät zu kommen.



**Abbildung 83: Nutzung von Pre-Trip-Informationen in Erlangen bei Nutzungsgrad von 30%**

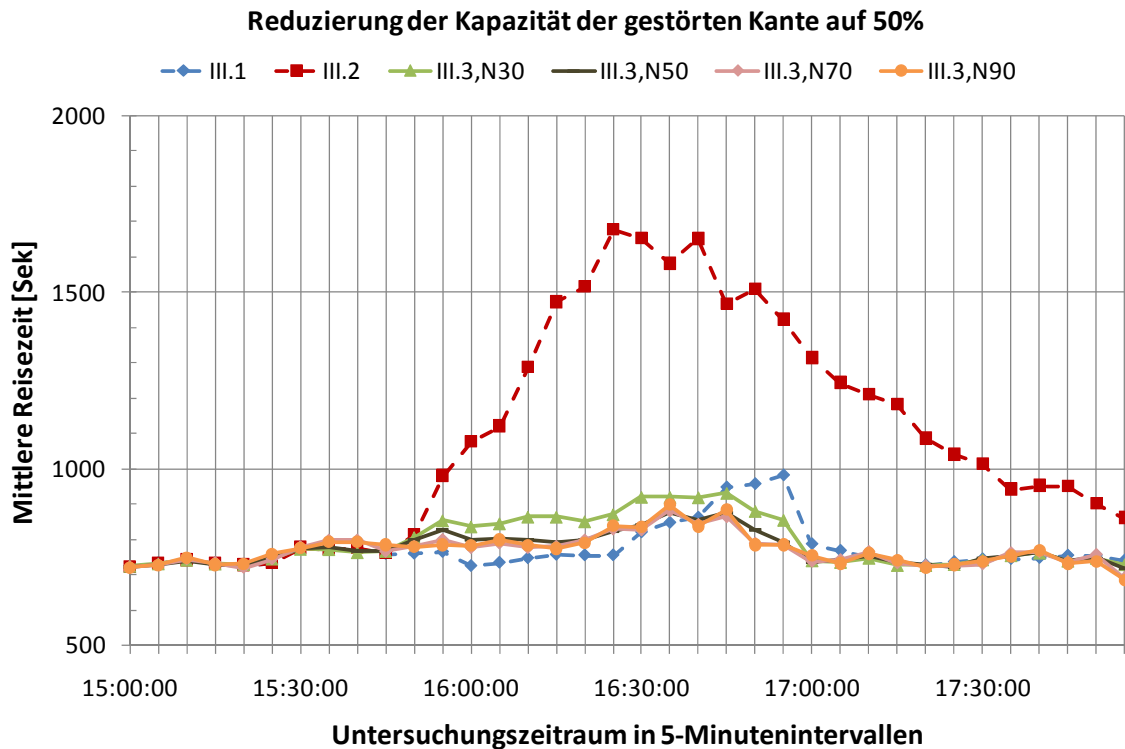
In Abbildung 83 und Abbildung 84 sieht man das Nutzungs- und Befolgungsverhalten der Verkehrsteilnehmer in Bezug auf Pre-Trip-Informationen. Der tendenziell nach vorne verschobene Verlauf der Nachfrageganglinie Abbildung 82 lässt sich anhand der relativ hohen Anzahl an Verschiebungen auf früher erkennen. Ferner ist während der Störung ab ca. 16:00 Uhr eine erhöhte Anzahl von Entscheidungen für eine spätere Startzeit sichtbar. Insgesamt nimmt zu späterer Tageszeit die Anzahl der Anfragen ab, weil auch die Nachfrage sinkt. Abgesehen von der absoluten Anzahl der Anfragen unterscheidet sich das Anfrage- und Befolgungsverhalten zwischen einem Nutzungsgrad von 30, 50, 70 und 90% nicht. Die zusätzlichen Grafiken für Nutzungsgrade von 50 und 70% stehen im Anhang I.IV.



**Abbildung 84: Nutzung von Pre-Trip-Informationen in Erlangen bei Nutzungsgrad von 90%**

#### 4.3.4.2 Veränderung der Reisezeitenganglinie

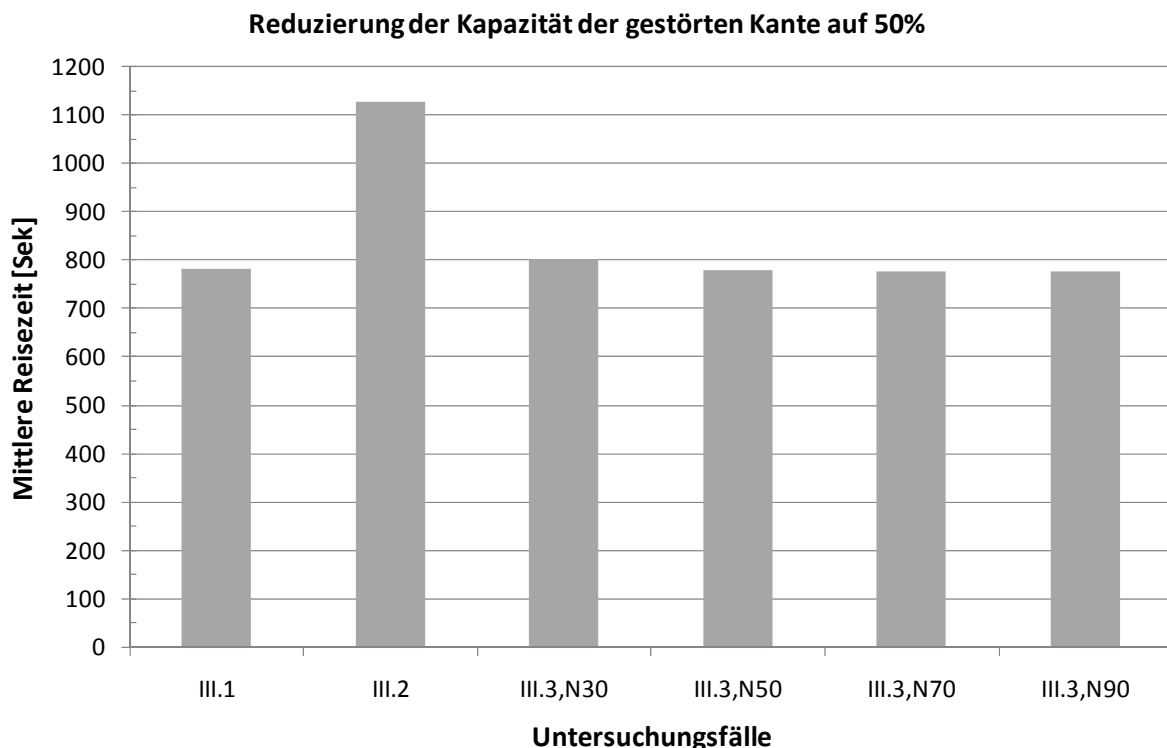
Abbildung 85 zeigt den Verlauf der mittleren Reisezeit je Zeitintervall, in dem eine Fahrt begonnen wurde. In Bezug auf die Simulation mit Störung, ohne Informationen (III.2) wird ein deutlicher Anstieg der mittleren Reisezeit deutlich, der sich in der Spitze für Abfahrten zwischen 16:15 und 16:30 Uhr mehr als verdoppelt. Im weiteren zeitlichen Verlauf stabilisiert sich die mittlere Reisezeit wieder, weil die Störung ab ca. 17:00 Uhr beendet ist und die Nachfrage sinkt.



**Abbildung 85: Veränderung der Reisezeitenganglinie in Erlangen**

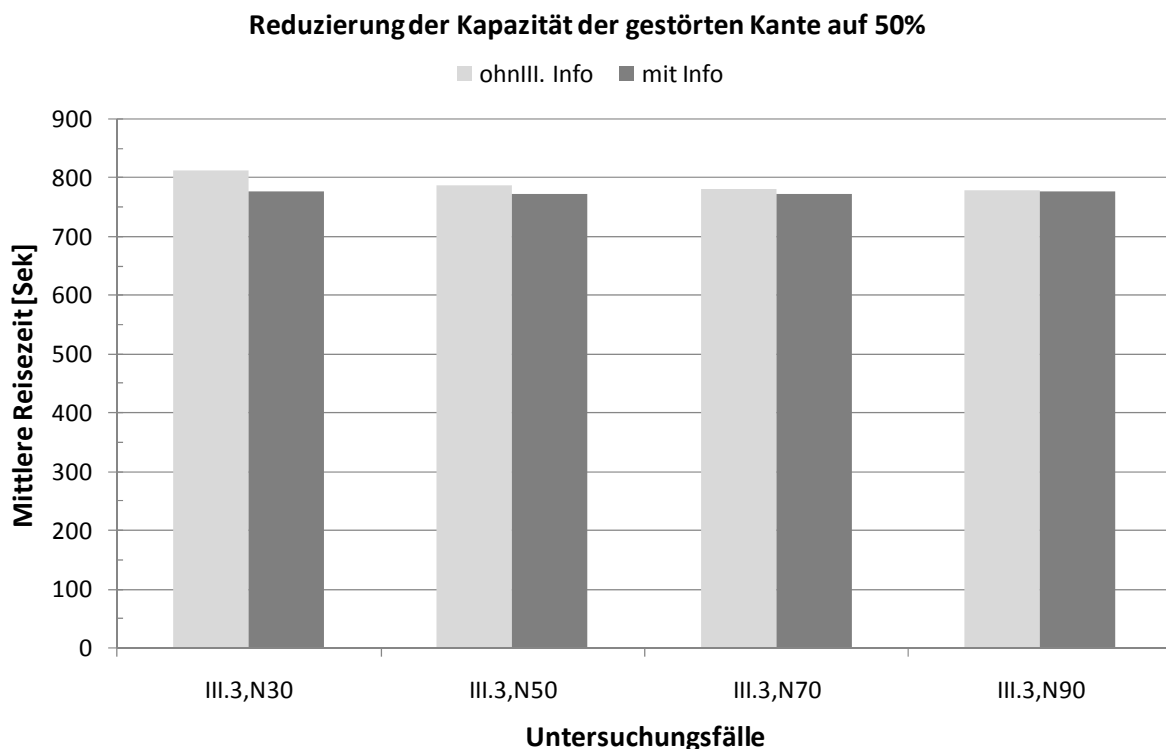
Die flachen Kurvenverläufe für die mittlere Reisezeit mit Informationen verdeutlichen eine positive Wirkung der Informationsdienste. Dabei fällt auf, dass die Wirkung eines Nutzungsgrades von 30% noch verbessert werden kann, wenn sich die Anzahl der Dienstnutzer auf 50% erhöht. Darüber hinaus sind keine nennenswerten Verbesserungen oder Verschlechterungen mehr zu erwarten.

#### 4.3.4.3 Mittlere Reisezeiten



**Abbildung 86: Mittlere Reisezeiten je Untersuchungsfall**

Die mittleren Reisezeiten für das Intervall zwischen 15:00 und 18:00 Uhr in Abhängigkeit vom Untersuchungsfall stehen in Abbildung 86. Danach wird noch einmal deutlich, dass die Wirkung der Informationen im Modell bei der betrachteten Störung im Erlanger Straßennetz positiv ausfällt. Denn die Verkehrsdienste können durch Stauinformationen die erhöhte mittlere Reisezeit aufgrund der Störung des Verkehrsablaufs bei allen betrachteten Nutzungsgraden von 30, 50, 70 und 90% fast auf das Ausgangsniveau senken. Eine Ursache für die positiven Wirkungen ist das Vorhandensein freier Kapazitäten im Netz. Betrachtet man den Zeitraum während der Störung zwischen 16:00 und 17:00 Uhr lässt sich eine Netzauslastung für die von der Störung betroffenen QZ-Beziehungen von 113% berechnen. Erweitert man den Betrachtungszeitraum auf das Intervall zwischen 15:00 und 18:00 Uhr beträgt die Netzauslastung allerdings nur noch 66%.



**Abbildung 87: Mittlere Reisezeiten von Nichtnutzern und Nutzern von Stauinformationen**

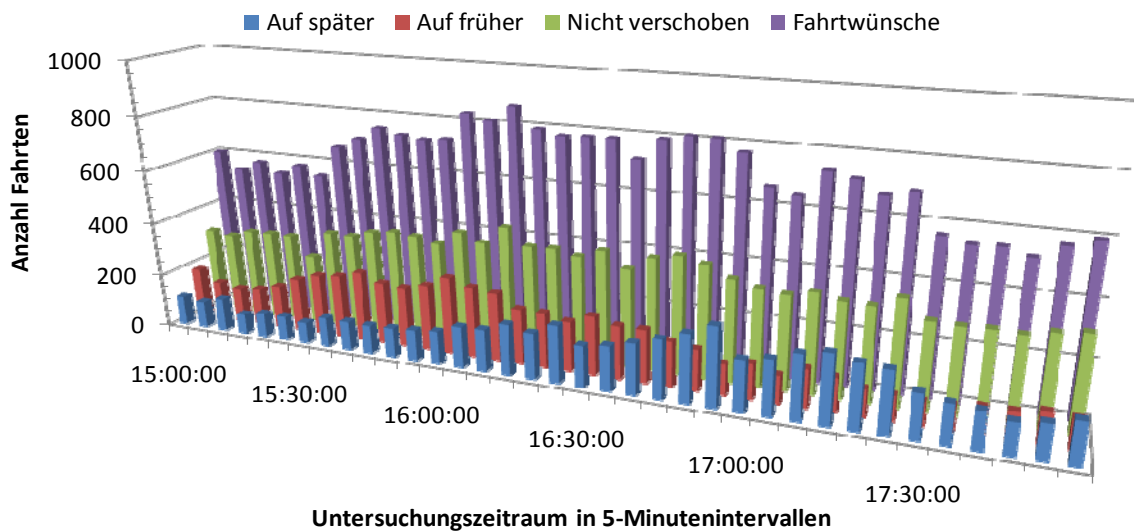
Ein Vergleich der mittleren Reisezeit zwischen nicht informierten Fahrern und Nutzern von Verkehrsdiensten zeigt Abbildung 87. Danach wird deutlich, dass unabhängig vom Nutzungsgrad die informierten Verkehrsteilnehmer stets profitieren, und zwar umso mehr, je niedriger der Nutzungsgrad ist. Dieses Ergebnis entspricht den Erkenntnissen aus den Simulationsläufen im Ringnetz.

#### 4.3.5 Belastungsabhängige Preise auf den Erlanger Talquerungen

##### 4.3.5.1 Verschiebung der Abfahrtszeit

Die Entscheidungen über die Startzeit für Fahrten, die bei einer Maut über die Talquerungen im Erlanger Stadtgebiet führen, stehen in Abbildung 88. Wie schon bei der Untersuchung der Wirkung von Stauinformationen verdeutlicht die Abbildung eine größere Bereitschaft zur Verschiebung der Abfahrtszeit im Anwendungsfall mit Erlangen als in den Simulationsläufen mit dem symmetrischen Ringnetz.

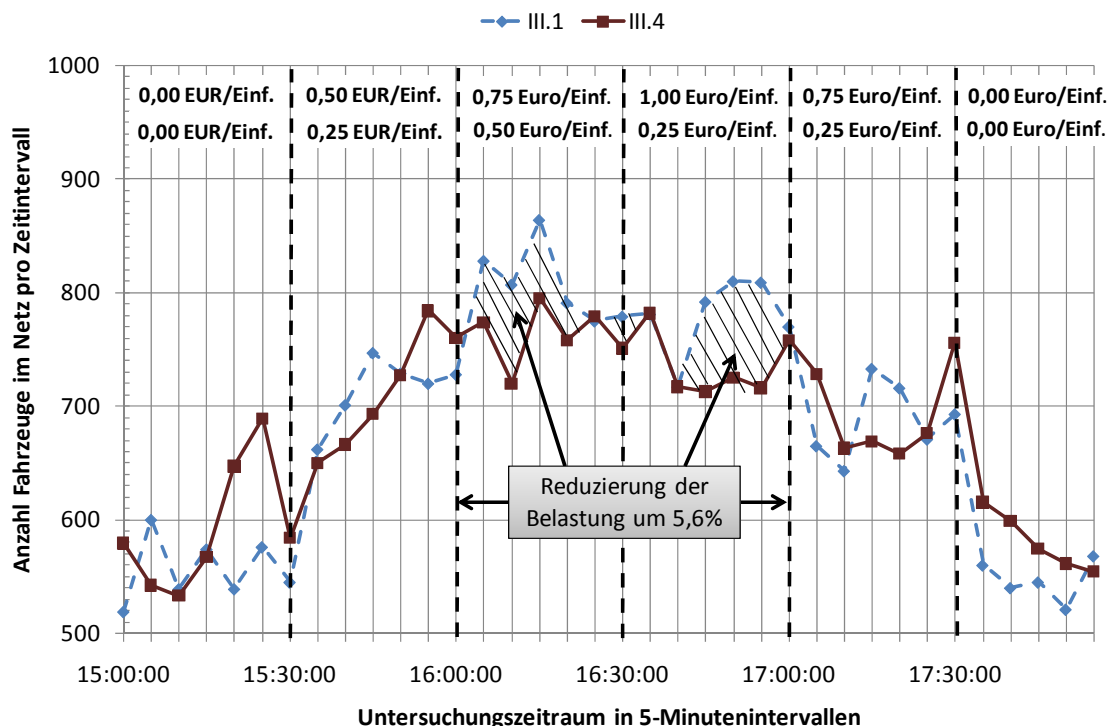




**Abbildung 88: Verschiebung der Abfahrtszeit aufgrund von Straßenbenutzungsgebühren**

Die hintere Datenreihe steht für alle Fahrtwünsche und bildet somit die Nachfrageganglinie ab. Mit dem Beginn der Mauterhebung im Zeitintervall ab 15:30 Uhr steigt der Anteil der Fahrten, die auf einen früheren Zeitraum verlegt werden, deutlich an. Im Gegensatz dazu erhöht sich die Anzahl der Fahrten zum Ende der Mauthebung, die auf eine spätere Startzeit verlegt werden. Wenn die Maut ab 17:30 Uhr wegfällt, sinkt die Zahl der verschobenen Fahrten wieder. Somit liefert das Modell plausible Ergebnisse.

#### 4.3.5.2 Veränderung der Verkehrsnachfrageganglinie



**Abbildung 89: Veränderung der Verkehrsnachfrageganglinie**

Abbildung 89 vergleicht die Verkehrsnachfrageganglinien ohne (III.1) und mit (III.4) Straßenbenutzungsgebühren miteinander. Dabei lässt sich feststellen, dass die Spitzenbelastungen auf den Talquerungen durch Straßenbenutzungsgebühren geglättet werden können. Auffällig sind die beiden lokalen Maxima bei 15:25 Uhr in dem Zeitintervall bevor die Maut beginnt und um 17:30 Uhr nachdem keine Preise mehr erhoben werden. Dieser Nachfrageanstieg ist

plausibel, weil diese Zeitintervalle unmittelbar vor bzw. nach Beginn der Preiserhebung liegen und damit bevorzugt bei einer Verschiebung der Abfahrtszeit gewählt werden.

#### 4.3.5.3 Veränderung der Reisezeitenganglinie

Der flachere Verlauf der Reisezeitenganglinie für III.4 in Abbildung 90 verdeutlicht einen positiven Effekt der Straßenbenutzungsgebühren. Während ohne Maut die Reisezeiten von 15:00 bis 17:00 Uhr um ca. 25% ansteigen, erhöht sich die mittlere Reisezeit mit belastungsabhängigen Preisen über den gesamten Betrachtungszeitraum nicht mehr als um ca. 10%. Die kleinen Anstiege der Kurve mit den Rauten über die Linie der Rechtecke gegen 15:30 und 17:15 Uhr ist plausibel, weil sich in diesen Zeitintervallen durch die Verschiebung der Abfahrtszeit die Nachfrage gegenüber dem Szenario ohne Straßenbenutzungsgebühren erhöht hat.

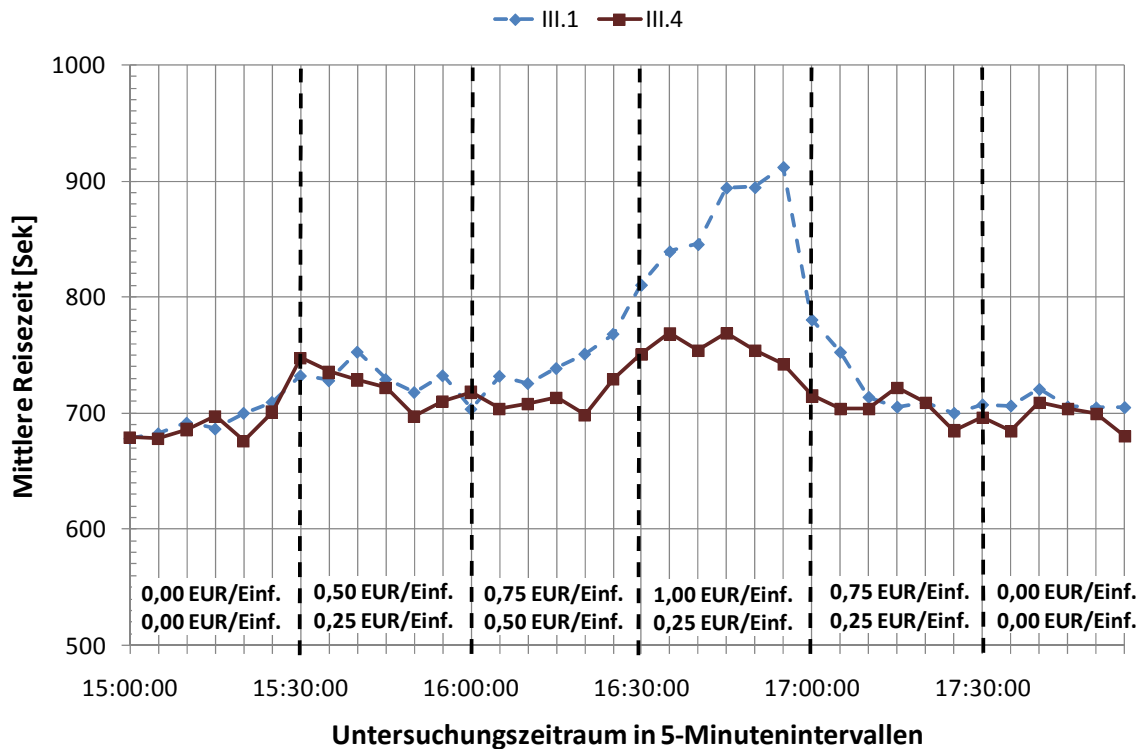


Abbildung 90: Ganglinie der mittleren Reisezeiten

## **5 Verkehrsinformationen und belastungsabhängige Preise können teilweise die Effizienz und Robustheit im Straßenverkehr erhöhen**

Zur Untersuchung der Wirkung von Pre- und On-Trip-Informationen bei spontanen Verkehrsstörungen sowie belastungsabhängigen Preisen bei notorischen Staus wurde ein mikroskopisches Modell entwickelt, das die Verbindungswahl einzelner Verkehrsteilnehmer abbildet. Für die Entwicklung und Kalibrierung des Entscheidungsmodells wurde eine empirische Studie über das Verkehrsverhalten mit dynamischen Stauinformationen und Straßenbenutzungsgebühren ausgewertet. Die Verkehrsnachfrage wurde in Form einer Liste mit einzelnen Fahrtwünschen und sekundengenauen Abfahrtszeiten erzeugt. Außerdem wurde für die Untersuchungsfälle mit Informationen ein dynamischer Verkehrsdienst entwickelt, der individualisierte Empfehlungen für seine Kunden generiert. Hierbei wurden die Rückkopplungen zwischen der Nachfrage auf der Straße, den Empfehlungen des Informationsdienstes und den Entscheidungen der einzelnen Verkehrsteilnehmer berücksichtigt. In den Untersuchungsfällen mit einer belastungsabhängigen Maut gab es eine Rückkopplung, um die Lernerfahrungen der Verkehrsteilnehmer abzubilden. Denn bis sich ein neuer Gleichgewichtszustand nach der Einführung von Straßenbenutzungsgebühren einstellt, wird eine Iteration benötigt, damit die Autofahrer die Möglichkeit haben, auf die Entscheidungen der anderen zu reagieren. Abschließend gingen die Fahrten in ein mikroskopisches Verkehrsflussmodell ein, um anhand der Reisezeiten die verschiedenen Szenarien zu bewerten. Für die Auswertung wurden verschiedene Verfahren zur Berechnung der Netzauslastung entwickelt.

Als Anwendungsfälle wurden ein virtueller Raum mit einfachem, symmetrischem Ringnetz und die Stadt Erlangen simuliert. Im Ringnetz ging es darum, die Wirkungen von Verkehrsinformationen und belastungsabhängigen Preisen systematisch zu untersuchen. Dabei wurden für die Analyse der Informationsdienste die Verkehrsnachfragemenge, die Stärke der Verkehrsstörung und der Nutzungsgrad von Informationen variiert. Die Reaktionen der Verkehrsteilnehmer auf Pre-Trip-Informationen hat das Modell zur Verbindungswahl abgebildet. Die Straßenbenutzungsgebühren wurden ausschließlich bei hohen Auslastungen bzw. Überlastungen untersucht. Dabei war die Höhe des Preises an die Höhe der Belastung je Zeitintervall gekoppelt. In Erlangen wurde das Modell in einem realen Raum angewendet. Dazu wurde ein Netzmodell benutzt, das im kalibrierten Zustand vorlag. Dadurch war die Nachfrage festgelegt, und es wurden nur noch verschiedene Nutzungsgrade von Informationsdiensten bei einer mittleren Stärke der Verkehrsstörung verändert.

Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen mit dynamischen, individualisierten Verkehrsinformationen bei spontan auftretenden Staus lassen sich mit den folgenden Aussagen zusammenfassen:

1. Niedrige Nutzungsgrade haben überwiegend positive Wirkungen auf die mittlere Reisezeit aller Autofahrer.

Die Simulationen haben gezeigt, dass niedrige Nutzungsgrade bis etwa 30% dafür sorgen, dass Verkehrsinformationen sich überwiegend positiv auf die Verkürzung der mittleren Reisezeit aller Autofahrer auswirken. Denn bei weniger Nutzern werden immer nur kleine Fahr-

zeugmengen im Netz umgeleitet. Somit ist die Wahrscheinlichkeit gering, dass die Verschiebung von Verkehrsströmen einen neuen Stau auf der Alternativroute verursacht, der sich stärker negativ auf die mittlere Reisezeit auswirkt als die ursprüngliche Störung.

## 2. Hohe Nutzungsgrade können die Verkehrsverhältnisse auf der Straße destabilisieren.

Bei hohen Nutzungsgraden ab ca. 70% leiten die Informationsdienste einen großen Teil der Autofahrer um. Dadurch verschiebt sich bei einer schwachen Verkehrsstörung, welche die Streckenkapazität um bis zu ca. 30% reduziert, der Stau leicht auf die Ausweichroute. Dort werden die Verkehrsverhältnisse dann schneller schlechter als auf dem Weg mit der ursprünglichen Störung. Ferner können bereits kleine Ungleichgewichte zwischen den Reisezeiten alternativer Routen wegen erhöhten Verkehrsaufkommens auch ohne Kapazitätsreduktion entstehen.

Falls kleine Unterschiede zwischen alternativen Wegen länger andauern, besteht die Gefahr, dass Informationen zu einem Aufschaukeln des Verkehrssystems führen. Das bedeutet, dass die Reisezeit nicht nur auf der gestörten, sondern auch auf der alternativen Route immer weiter ansteigt, während die Differenz zwischen den Widerständen der alternativen Pfade gering bleibt und der Stau sich auf weitere Bereiche des Netzes ausdehnt. Deshalb kann sich mit Informationen ein insgesamt schlechterer Zustand einstellen als ohne Verkehrsdienst. Außerdem zeigen die Ergebnisse, dass insbesondere bei hohen Nutzungsgraden die Verkehrsprognosen sich selbst zerstören können.

Um das Oszillieren der Fahrzeugbelastungen zu dämpfen, könnten die Aktualisierungsintervalle zur Berechnung der Verkehrslage kleiner werden. Hier sind aber technische Grenzen in der Datenverarbeitung gesetzt. Außerdem darf der Verkehrsdienst den Nutzer nicht durch ständig neue Empfehlungen aufgrund der kurzen Aktualisierungsintervalle verwirren oder überfordern. Damit würde die Akzeptanz für Verkehrsinformationen schnell sinken. Eine einfache, praktische Lösung ist, geringe Unterschiede in den Reisezeiten zwischen alternativen Routen gar nicht erst an die Fahrer zu melden. Somit müsste ein Schwellenwert definiert werden, um wie viel Prozent die Reisezeit auf dem alternativen Pfad abweichen muss, damit ein Verkehrsdienst sie empfehlen darf. Allerdings ist dieser Schwellenwert nicht einfach zu bestimmen, weil stets der erwartete Nutzungs- und Befolgungsgrad berücksichtigt werden muss. In der Tendenz sollte der Schwellenwert aber umso größer sein, je höher der Nutzungs- und Befolgungsgrad ist. Denn je größer die Menge an informierten und reagierenden Verkehrsteilnehmern ist, desto stärker muss auch die Verkehrsstörung sein, um eine positive Wirkung zu erzielen.

## 3. Ab einem Nutzungsgrad von 50% lassen sich kaum noch Verbesserungen der mittleren Reisezeit aller Autofahrer erzielen, die von der Störung betroffen sind.

Der Wirkungsbereich von Verkehrsinformationen für eine Verbesserung der mittleren Reisezeit wird umso größer, je stärker eine Störung die Kapazität einer Strecke reduziert. Denn sehr kleine Störungen wirken sich auch ohne Informationen erst bei höheren Netzauslastungen negativ aus. Folglich können Verkehrsdienste bei schwachen Störungen und niedrigeren Netzauslastungen die mittlere Reisezeit nicht maßgeblich verbessern. Je stärker die Störung aber wird, desto geringer muss die Netzauslastung sein, damit die negativen Folgen auf die mittlere Reisezeit sichtbar werden. Durch die starke Erhöhung des Widerstands auf der gestörten Route steigt die Anzahl alternativer Wege im betrachteten Netz. Somit können mehr

Fahrzeuge erfolgreich umgeleitet werden, ohne dass dadurch die Verkehrssituation auf den Ausweichwegen schlechter wird als auf der gestörten Route. Deshalb steigt mit zunehmender Stärke der Kapazitätsreduktion auch die Möglichkeit, dass höhere Nutzungsgrade von Verkehrsinformationen die mittlere Reisezeit verbessern.

Da die Kapazitäten der Ausweichrouten aber begrenzt sind, wird in Abhängigkeit von der Netzauslastung ein Punkt erreicht, ab dem höhere Nutzungsgrade keinen Mehrwert mehr bieten, weil es keine Spielräume für erfolgreiche Umleitungen mehr gibt. Dies erklärt das in den Simulationsrechnungen beobachtete Phänomen, dass häufig ab einer höheren Netzauslastung und einem Nutzungsgrad von ca. 50% kaum noch weitere Verbesserungsmöglichkeiten der Verkehrszustände durch Informationen möglich sind. Somit stellt sich schließlich ein Gleichgewichtszustand zwischen Netzauslastung und Nutzungsgrad ein, von wo aus eine Erhöhung des Nutzungsgrades die mittlere Reisezeit nicht mehr wesentlich reduzieren kann.

#### 4. Nutzer profitieren gegenüber Nichtnutzern eher bei niedrigen Nutzungsgraden.

Falls es Verkehrsdienste gibt, profitieren meistens auch die nicht informierten Fahrer davon, weil Umleitungen die Belastung auf der gestörten Route reduzieren. Die größten Unterschiede zwischen informierten und nicht informierten Verkehrsteilnehmern gibt es bei niedrigen Nutzungsgraden bis etwa 30%, wobei die Nutzer von Informationen meistens die besseren Reisezeiten erzielen können. Je höher der Nutzungsgrad allerdings wird, desto mehr gleichen sich die Reisezeiten zwischen informierten und nicht informierten Personen an. Dies kann bei hohen Nutzungsgraden und kleinen Störungen sogar soweit führen, dass die Nichtnutzer bessere mittlere Reisezeiten erreichen als die Nutzer von Verkehrsdiensten. Der Grund dafür ist das unter 2. beschriebene Oszillieren der Belastungen auf den alternativen Pfaden und die damit zusammenhängende Verschlechterung der Verkehrsverhältnisse.

#### 5. Pre-Trip-Informationen können zu einer Verschärfung des Staus führen.

In den Simulationsläufen gab es eher Verbesserungen des Verkehrsablaufs, falls ausschließlich On-Trip-Informationen gegeben wurden. Hatten die Pkw-Fahrer zusätzlich die Möglichkeit, sich vor Fahrtantritt zu informieren, fielen Reisezeitgewinne häufig niedriger aus, und zwar umso mehr, je höher der Nutzungsgrad war. Der Grund dafür ist die Selbstzerstörung der Prognose. Da viele Verkehrsteilnehmer über den Stau informiert werden, fahren sie früher los, in der Hoffnung dadurch noch rechtzeitig ihr Ziel zu erreichen. Im Ergebnis stellen sich aber noch mehr Fahrzeuge direkt in den Stau, was die Situation nur noch verschärft. Daher müsste der Verkehrsdienst eigentlich empfehlen, gar nicht erst loszufahren, weil man ohnehin im Stau stehen wird. Alternativ könnte auch eine Empfehlung auf einen wesentlich späteren Zeitpunkt gegeben werden.

Als Ergebnis der Simulationen mit belastungsabhängigen Preisen und notorischen Staus können die folgenden Aussagen formuliert werden:

#### 6. Eine belastungsabhängige Maut glättet die Verkehrsnachfrageganglinie.

Aus der Einführung von belastungsabhängigen Straßenbenutzungsgebühren folgt die Verlagerung von Fahrten in Zeitintervalle mit niedrigeren Preisen. Als Ergebnis der Simulationsrechnungen wurde die Verkehrsmenge in der Spitzenstunde um etwa 5 bis 12% reduziert,

indem die Abfahrtszeiten verschoben wurden. Verlagerungen auf alternative Verkehrsmittel sind hierbei nicht berücksichtigt.

7. Effizienzsteigerungen kann eine belastungsabhängige Maut eher bei Auslastungen im Bereich der Kapazitätsgrenze und bei Überlastungen erreichen.

Auch wenn Straßenbenutzungsgebühren zu einer Verschiebung von Verkehrsmengen in andere Zeit- und Netzbereiche führen, sind Reisezeitverkürzungen v. a. dann möglich, wenn die Netzauslastung in der Nähe der Kapazitätsgrenze oder darüber liegt. Falls nämlich die praktische Leistungsfähigkeit noch nicht erreicht ist, steigen Reisezeiten auf einer Strecke relativ langsam. Folglich führt eine Verschiebung von Fahrten zu keinen nennenswerten Veränderungen der Reisezeit. Erst wenn die praktische Leistungsfähigkeit einer Strecke überschritten ist, steigen die Reisezeiten steil an, und eine Verschiebung kann eine wesentlich größere Wirkung erzielen. Wenn man den Gewinn durch eine Maut hauptsächlich über Reisezeitverkürzungen misst, ist eine Straßenbenutzungsgebühr bei Auslastungen unterhalb der praktischen Leistungsfähigkeit eher ineffizient, weil durch die Preise nur die Kosten für die Verkehrsteilnehmer steigen, nicht aber der Nutzen.

Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen zeichnen ein differenziertes Bild. Danach können Verkehrsinformationen bei niedrigen Nutzungsgraden oder bei starken, spontan auftretenden Verkehrsstörungen mit großer Wahrscheinlichkeit die mittlere Reisezeit aller Autofahrer verkürzen. Dadurch wird das Verkehrssystem effizienter und robuster. Belastungsabhängige Preise steigern zwar grundsätzlich die Robustheit des Verkehrssystems, indem Belastungsganglinien geglättet werden. Effizient sind sie aber nur bei der Anwendung in der Nähe der Kapazitätsgrenze oder darüber. Neben der Verbesserung von Reisezeiten können Informationen noch einen Beitrag zur besseren Transparenz und Verlässlichkeit im Straßenverkehr leisten, was die Zufriedenheit der Verkehrsteilnehmer auf der Straße erhöht. Die höhere Verlässlichkeit kann sich u. a. auch positiv auf die Produktivität im Wirtschaftsverkehr auswirken. Wenn in der Zukunft die Ausstattung mit Informationsdiensten und deren Nutzung weiter steigt, müssen neue Lenkungsstrategien entwickelt werden. Ansonsten besteht die Gefahr, dass Staus nur verlagert werden, wenn ein Verkehrsdienst allen Kunden stets die schnellste Route empfiehlt. Als Folge können sich die Verkehrsverhältnisse sogar gegenüber dem Fall ohne Informationen verschlechtern. Daraus folgt auch, dass mit steigendem Nutzungsgrad die Notwendigkeit für Kooperationen zwischen verschiedenen Diensteanbietern immer dringender wird, weil sich die unterschiedlichen Lenkungsstrategien gegenseitig beeinflussen. Dies kann dazu führen, dass kein Anbieter das mit seiner Strategie verfolgte Ziel erreicht.

Außerdem kann eine Maut in der Zukunft ein entscheidender Faktor sein, um den Verkehr effizient zu steuern. Denn falls sehr viele Menschen Verkehrstelematik verwenden und über Straßenbenutzungsgebühren informiert sind, können die für einen stabilen Verkehrsfluss benötigten Befolgungsgrade erreicht werden, indem ein langsamerer Weg über den Preis attraktiver gemacht wird. Damit würden nicht alle Fahrzeuge auf die schnellere Alternativroute ausweichen. Außerdem könnte man sich auf diese Art auch dem Ziel der Verkehrssteuerung nähern, ein Systemoptimum zu erreichen.

# I. Anhang

## I.I. Nutzung von Pre-Trip-Informationen bei einem Nutzungsgrad von 30%

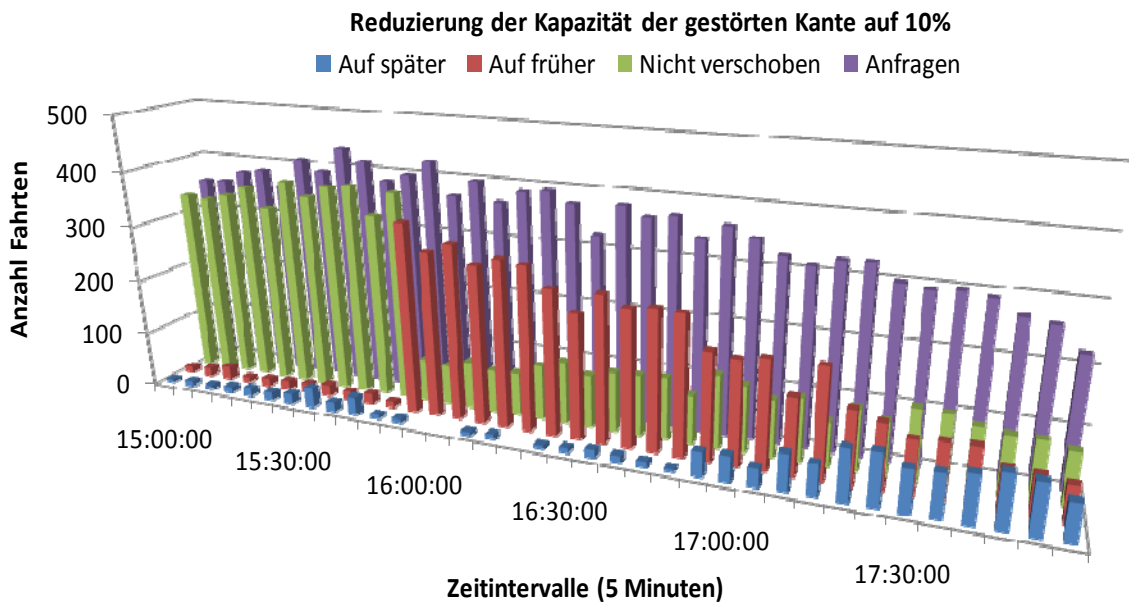


Abbildung 91: Nutzung von Pre-Trip-Informationen bei einer Netzauslastung von 110%

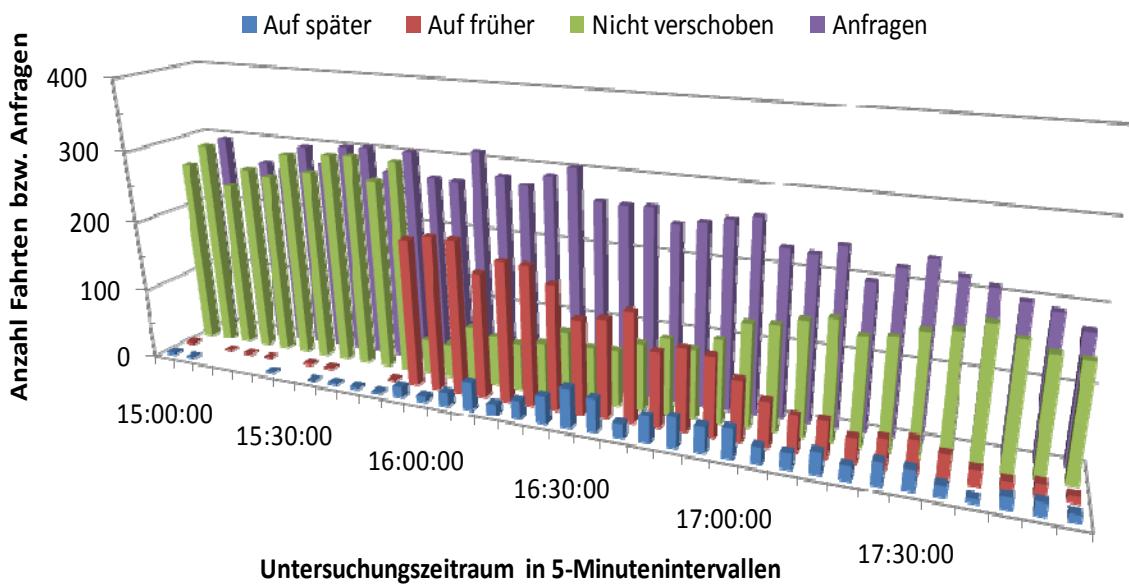


Abbildung 92: Nutzung von Pre-Trip-Informationen bei einer Netzauslastung von 80%

## I.II. Mittlere Reisezeiten in Abhängigkeit von der Kantenkapazität bei Pre- und On-Trip-Informationen

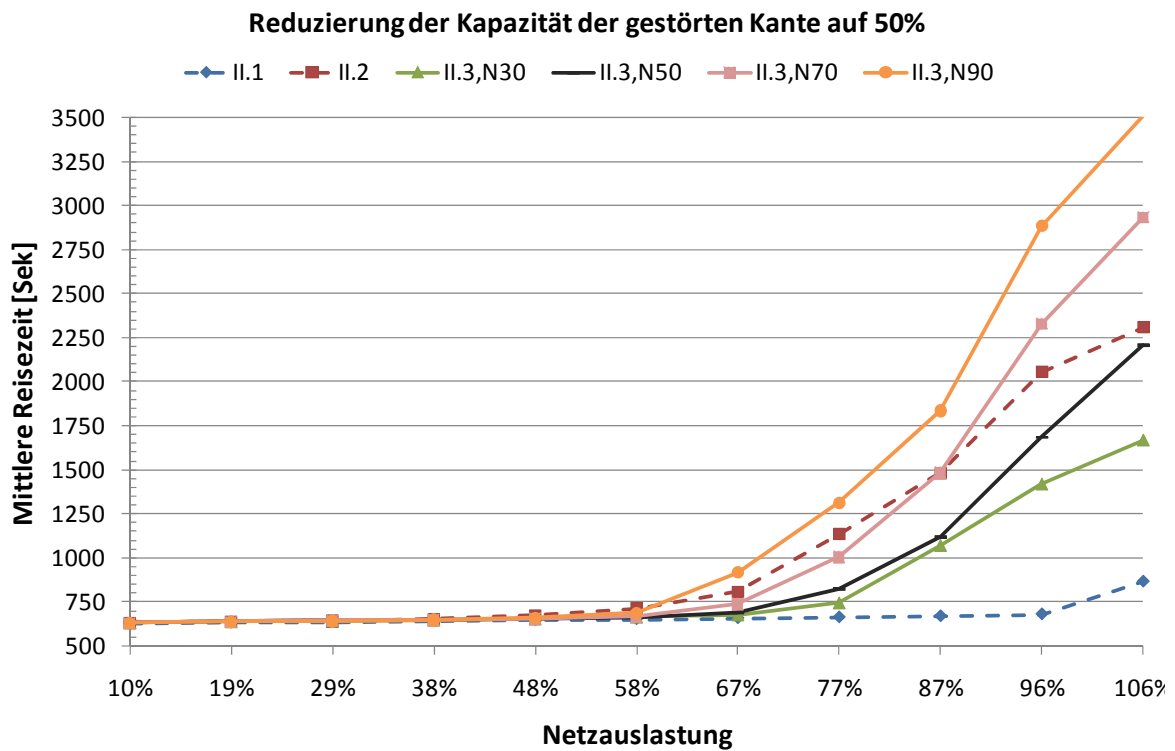


Abbildung 93: Mittlere Reisezeiten bei Reduzierung der Kantenkapazität auf 50%

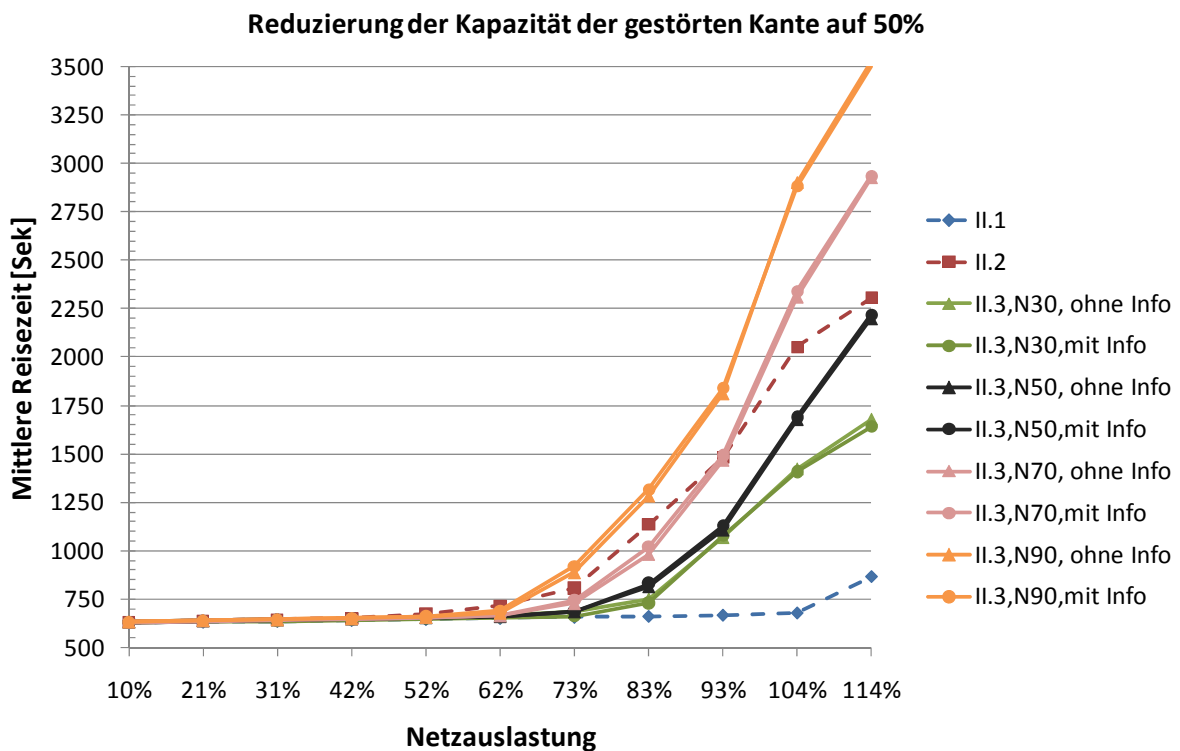


Abbildung 94: Mittlere Reisezeit nach Nutzern und Nichtnutzern von Informationen



### I.III. Veränderung der Verkehrsnachfrageganglinie bei Straßenbenutzungsgebühren

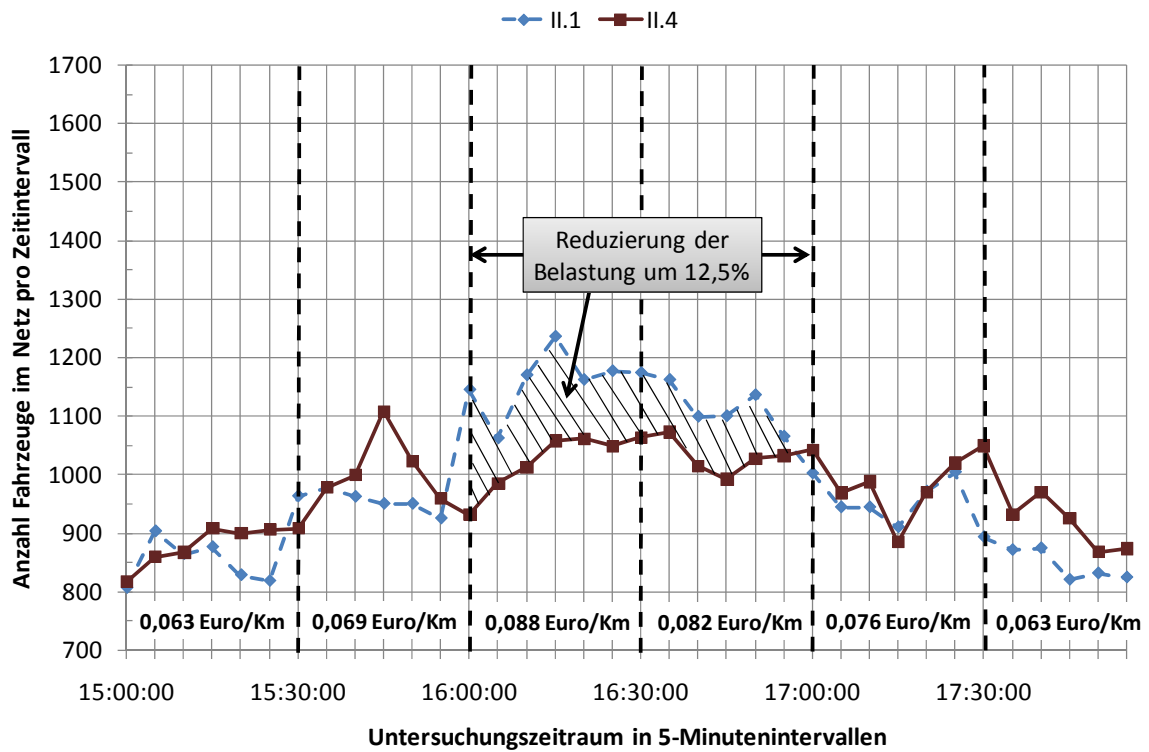


Abbildung 95: Veränderung der Nachfrageganglinie bei einer Netzauslastung von 90%

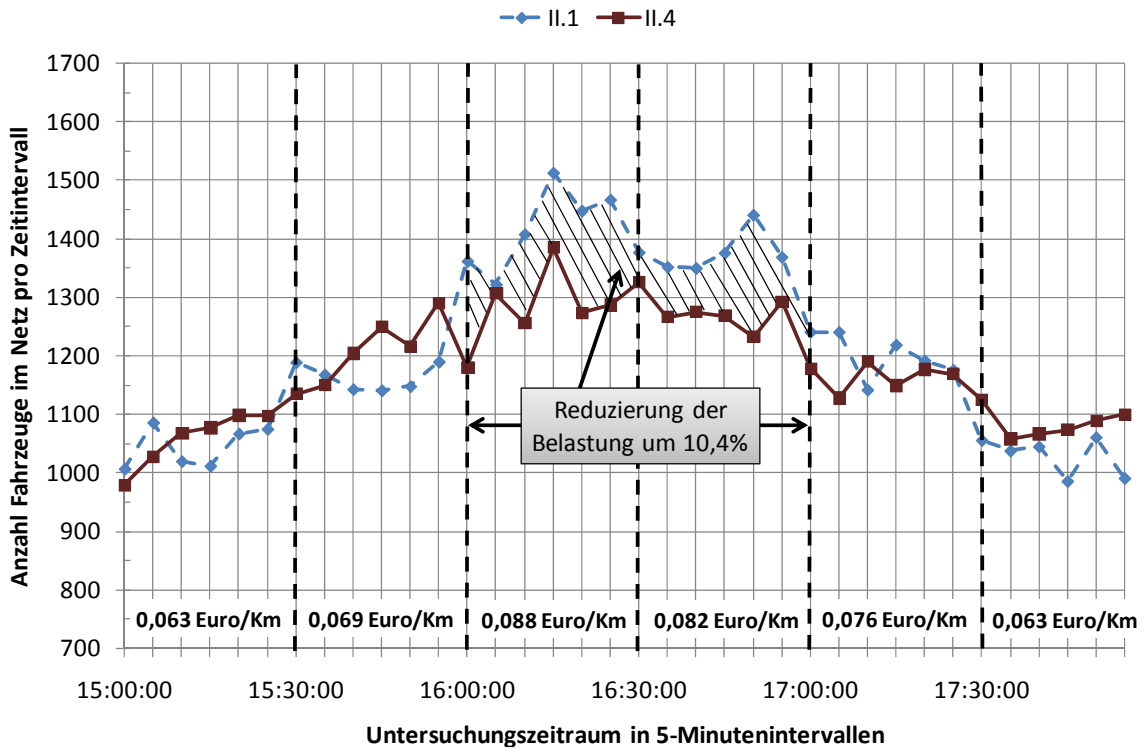


Abbildung 96: Veränderung der Nachfrageganglinie bei einer Netzauslastung von 110%

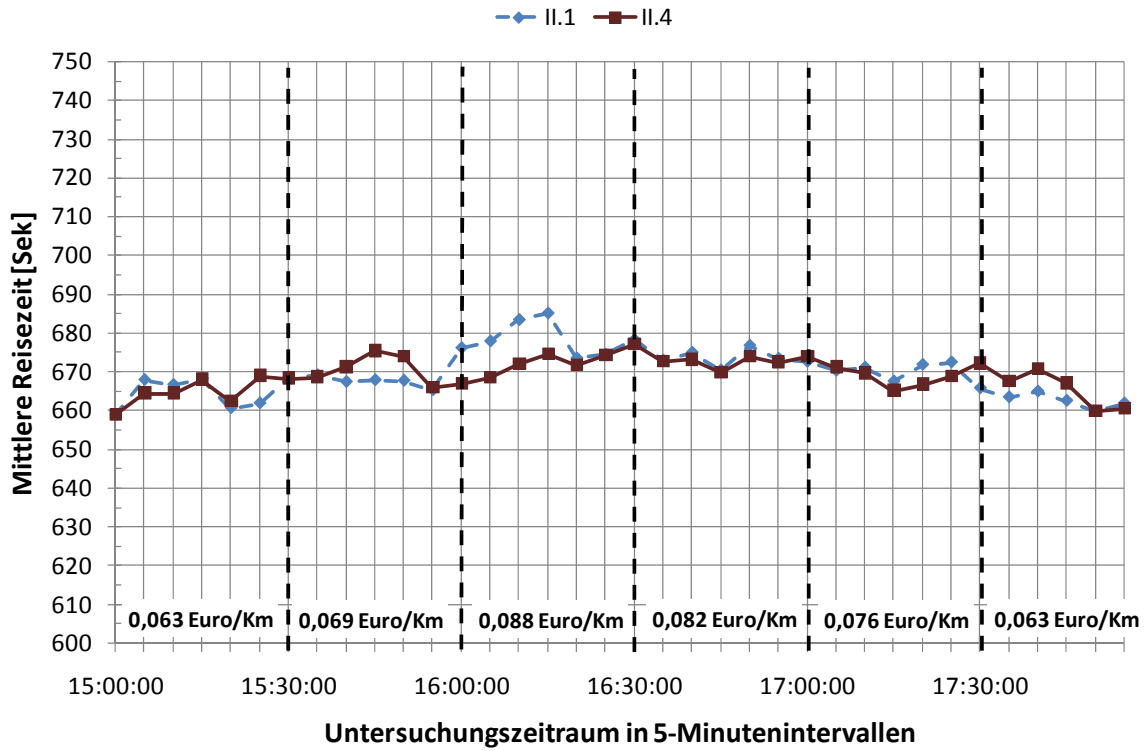


Abbildung 97: Ganglinie der mittleren Reisezeiten bei einer Netzauslastung von 90%

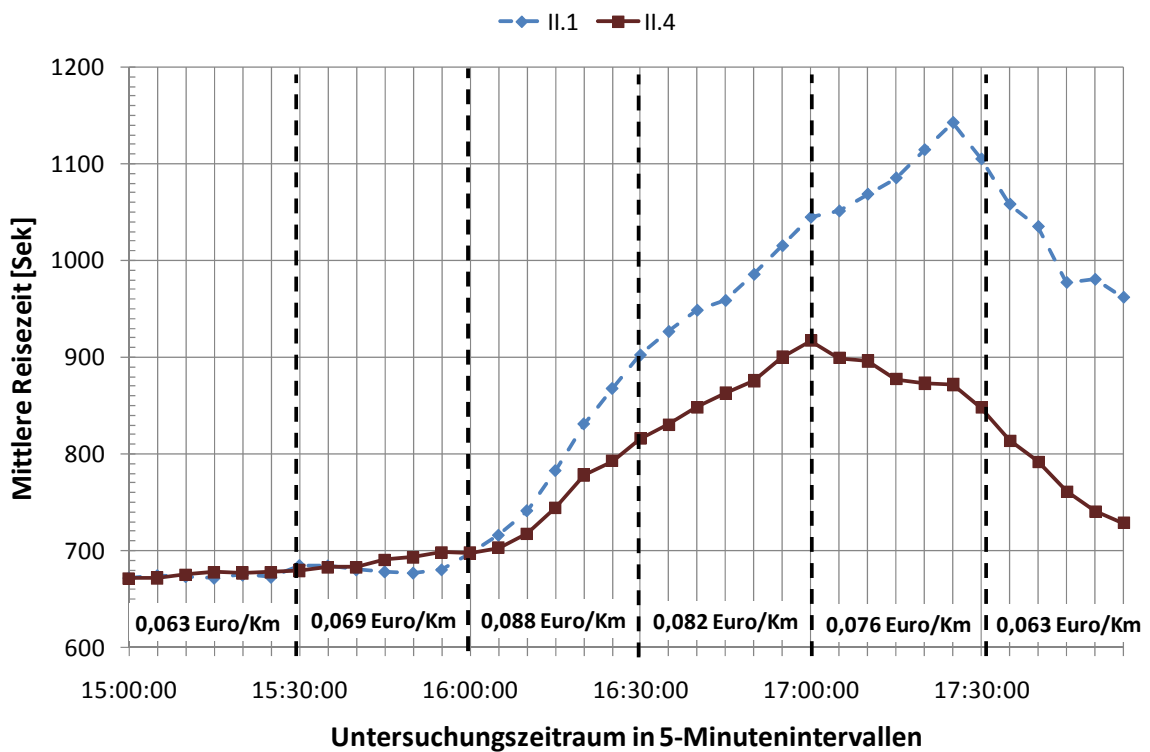


Abbildung 98: Ganglinie der mittleren Reisezeiten bei einer Netzauslastung von 110%

I.IV. Nutzungs- und Befolgungsverhalten von Pre-Trip-Informationen in Erlangen

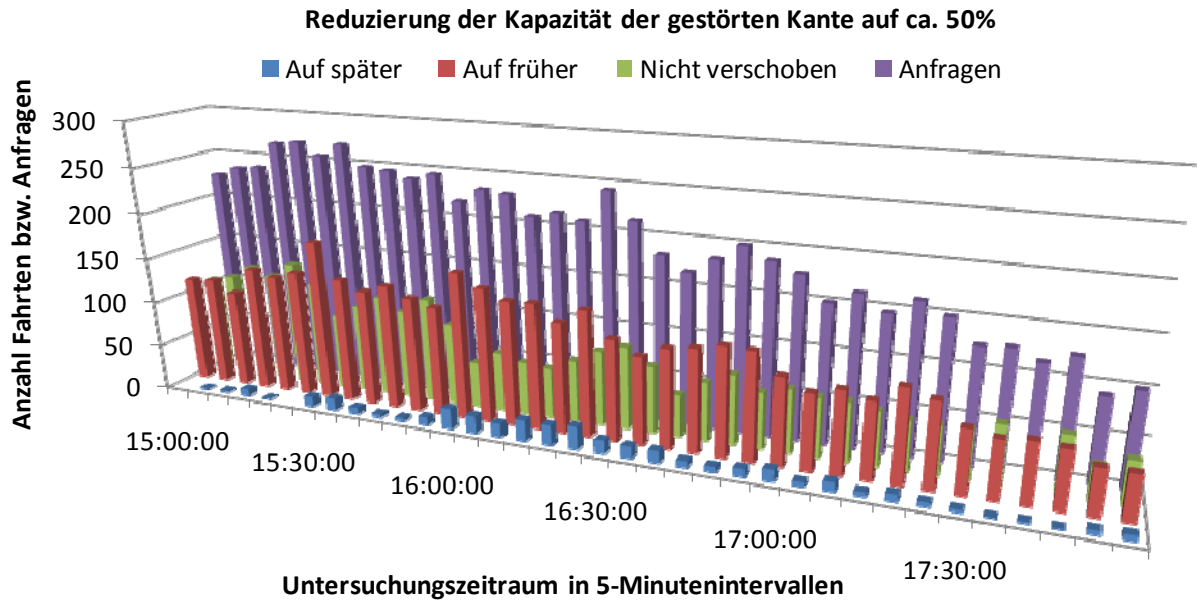


Abbildung 99: Nutzung von Pre-Trip-Informationen bei Nutzungsgrad von 50%

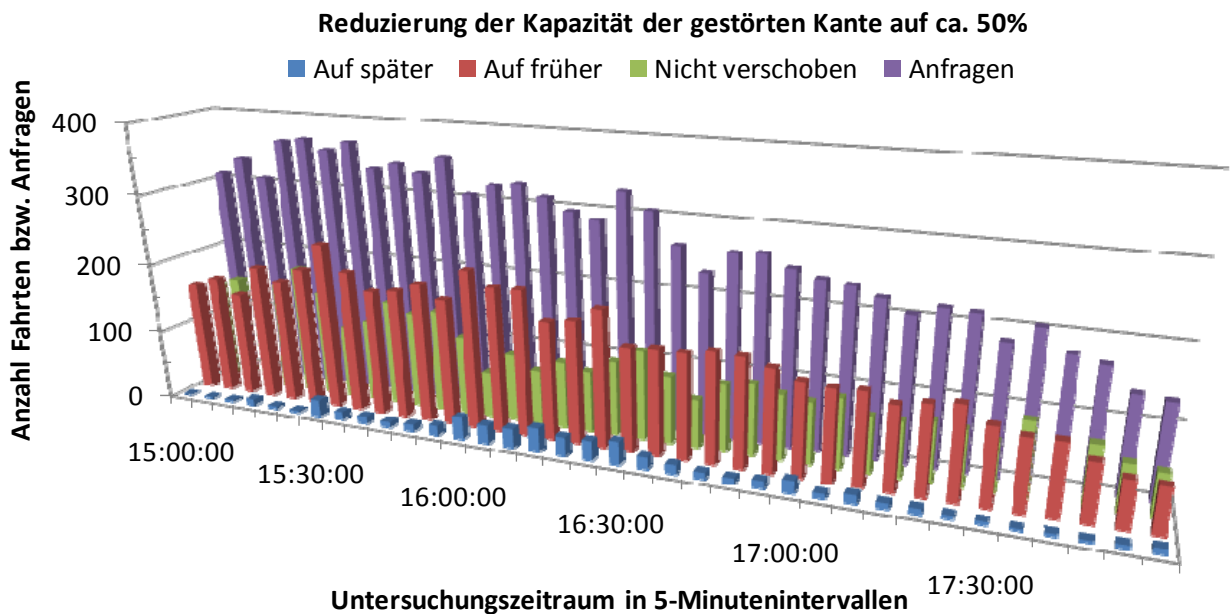


Abbildung 100: Nutzung von Pre-Trip-Informationen bei Nutzungsgrad von 70%



## II. Abkürzungsverzeichnis

ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobil Club
BAG	Bundesamt für Güterverkehr
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BPR	Bureau of Public Roads
CAPI	Computer Aided Personal Interview
COM	Component Object Model
CR-Funktion	Capacity-Restraint-Funktion
CR-Funktion	Capacity-Restraint-Funktion
DDG	Gesellschaft für Verkehrsdaten
DK	Durchschnittskosten
FCD	Floating Car Data
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
FHWA	Federal Highway Administration
Fz	Fahrzeug(e)
GC	Generalized Costs
GK	Grenzkosten
GSM	Global System for Mobile Communication
h	Stunde
HBS	Handbuch zur Bemessung von Straßen
HBS	Handbuch zur Bemessung von Straßen
km	Kilometer
LRI	Likelihood-Ratio Index
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MOP	Deutsches Mobilitätspanel
ÖV	Öffentlicher Verkehr
PC	Personal Computer
PTA	Personal Travel Assistant
Q	Verkehrsstärke
QV-Beziehung	Verkehrsstärke-Geschwindigkeits-Beziehung
QZ-Beziehung	Quelle-Ziel-Beziehung
RDS	Radio Data System

RP	Revealed Preferences
SP	Stated Preferences
TK	Totale Kosten
TMC	Traffic Message Chanel
U	Utility (Nutzen)
UKW	Ultrakurzwellen
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
V	Geschwindigkeit
WDDTA	Within-Day Dynamic Traffic Assignment
ZKS	Zeitkostensatz

### III. Literaturverzeichnis

1. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. (2001). Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen. Kommission Bemessung von Straßenverkehrsanlagen. Köln, FGSV-Verlag.
2. Kossak, A. (2004). Straßenbenutzungsgebühren. Internationales Verkehrswesen 56 - 12, S. 536-540. Hamburg, Deutscher-Verkehrs-Verlag GmbH.
3. Stopher, P. R. (2004). Reducing road congestion: a reality check. Transport Policy [11], 117-131. Elsevier.
4. Zumkeller D. et al. (2007). Panelauswertung 2007. <http://mobilitaetspanel.ifv.uni-karlsruhe.de/wissenschaft/indexwissenschaft.htm> . Institut für Verkehrswesen, Universität Karlsruhe (TH).
5. Radke, S. (2007). Verkehr in Zahlen 2007/2008. 36. Hamburg, DVV Media Group GmbH. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.
6. Mokhtarian, P. L. (2004). Reducing road congestion: a reality check - a comment. Transport Policy [11], 183-184. Elsevier.
7. Hank, R. and W. von Petersdorff (2008). Der neue Preis der langen Wege. Frankfurter Allgemeine Sonntagszeitung . Frankfurt. 2008.
8. Stadt Stockholm (2006). Evaluation of the Effects of the Stockholm Trial on Road Traffic. <http://www.stockholmsforsoket.se/> .
9. Chlond, B., W. Manz und D. Zumkeller (2002). Stagnation der Verkehrsnachfrage - Sättigung oder Episode? Internationales Verkehrswesen 54 - 9. Hamburg, Deutscher-Verkehrs-Verlag GmbH.
10. Wardrop, J. G. (1952). Some theoretical aspects of road traffic research. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. London.
11. Helling, U. (2006). Fahrzeit- und Informationsvorteile durch Dynamische Zielführung - Der Einfluss der Verkehrsmeldungsqualität unter Beachtung von Netzauslastung und Alternativrouten. Essen, Universität Duisburg-Essen.
12. Matschke Irina (2007). Einfluss dynamischer Navigation auf das Verkehrsgeschehen in städtischen Straßennetzen. Hannover, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.
13. Klaus, P. und W. Krieger (2000). Gabler-Lexikon Logistik. Wiesbaden, Gabler.
14. Höfler, F. (2006). Verkehrswesen-Praxis. Band 2: Verkehrstechnik. Berlin, Bauwerk-Verlag.
15. Vortisch, P. (2006). Modellunterstützte Messwertpropagierung zur Verkehrslageschätzung in Stadtstraßennetzen. Karlsruhe, Universität Karlsruhe (TH).
16. Mertens, P. (2001). Lexikon der Wirtschaftsinformatik. Mertens, Peter. 4. Berlin, Springer Verlag.

17. Busch, F. et al. (2004). Telematikanwendungen im Straßenverkehr - Stand und Perspektiven Teil 2. Straßenverkehrstechnik [7], 355-362.
18. Bovy, P. und E. Stern (1990). Route Choice: Wayfinding in Transport Networks. Studies in Operational Regional Science [9]. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.
19. Fastenrath, U. (2004). Stau-Schau - Auf dem Weg zum intelligenten Verkehrsinformationssystem. c't Magazin für Computertechnik [9], -172. 181.
20. Friedrich, M. (2006). Zustandsschätzung in Netzen. Summer School Verkehr. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Straßen- und Verkehrswesen. 2006.
21. Bell, M. G. H. und M. Grömling (1998). The Path Flow Estimator as a network observer. Traffic Engineering and Control 39 - 10, S. 540-549.
22. Friedrich, M. (2006). Prognose des Verkehrsablaufs. Summer School Verkehr. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Straßen- und Verkehrswesen. 2008.
23. Röbbke-Doerr und Peter (2006). Am Stau vorbei. Die Unterschiede zwischen TMC und TMCpro. c't Magazin für Computertechnik [13].
24. Franken, V. und Luley Torsten (2005). Verkehrstelematik und Analysen zu ihrer Akzeptanz: Sachstand, Defizite, Potenziale. FGSV. Heureka '05 Tagungsbericht . Köln.
25. Bobinger, R. (1993). Straßenbenutzungsgebühren in Theorie und Praxis. München, Technische Universität / Fachgebiet Verkehrstechnik und Verkehrsplanung.
26. Wikipedia (2008). Maut. <http://de.wikipedia.org/wiki/Maut> . 19-5-2008.
27. Schütte, C. (1998). Road-pricing in der Praxis. Ein konkretes Preiskonzept für Deutschland. Technische Universität Berlin. [D83]. Berlin. Schriftenreihe des Instituts für Straßen- und Verkehrswesen.
28. Hennecke, R. (2003). Wegausgabenorientierte Straßennutzungsgebühren. Aberle, Gerd. [Band 17]. Hamburg, Deutscher Verkehrsverlag. Giessener Studien zur Transportwirtschaft und Kommunikation.
29. Singapore Land Transport Authority (2008). Electronic Road Pricing. [http://www.lta.gov.sg/motoring\\_matters/index\\_motoring\\_erp.htm](http://www.lta.gov.sg/motoring_matters/index_motoring_erp.htm) . 21-4-2008.
30. Transport for London (2008). Congestion Charging. <http://www.tfl.gov.uk/roadusers/congestioncharging/default.aspx> . 21-4-2008.
31. Swedish Road Administration (2008). Congestion tax in Stockholm. [http://www.vv.se/templates/pagIII.3\\_\\_\\_\\_\\_17154.aspx](http://www.vv.se/templates/pagIII.3_____17154.aspx) . 19-5-2008.
32. Hau, T. D. (1999). Electronic Road Pricing: Developments in Hong Kong 1983-89. Journal of Transport Economics and Policy 24, Nr.2, S. 203-214.
33. 91 Express Lanes (2008). Toll Schedules. <http://www.91expresslanes.com/tollschedules.asp> . 21-4-2008.
34. Eidgenössische Zollverwaltung (2008). Nationalstraßenabgabe. [http://www.ezv.admin.ch/zollinfo\\_privat/informationen/00421/index.html?lang=de](http://www.ezv.admin.ch/zollinfo_privat/informationen/00421/index.html?lang=de) . 21-4-2008.
35. Pigou, A. C. (1960). The Economics of Welfare. New York, Macmillan & Co. LTD.



36. Schnabel, W. und D. Lohse (1997). Grundlagen der Straßen-Verkehrstechnik und der Verkehrsplanung. Band 2. Verlag für Bauwesen.
37. Neumann, M. (1995). Theoretische Volkswirtschaftslehre II. 4. München, Vahlen Verlag.
38. Rouwendal, J. und E. T. Verhoef (2006). Basic economic principles of road pricing: From theory to applications. Transport Policy 13 - 2, S. 106-114. Elsevier.
39. Rothengatter, W. (2003). How good ist the first best? Marginal cost and other pricing principles for user charging in transport. Transport Policy 10 - 2, S. 121-130. Elsevier.
40. Schade, J. und B. Schlag (2003). Acceptability of Transport Pricing Strategies. Schade, Jens Schlag Bernhard. Oxford, Elsevier LTD.
41. Schade, J. (2005). Akzeptanz von Straßenbenutzungsgebühren: Entwicklung und Überprüfung eines Modells. Lengerich, Pabst.
42. Zumkeller, D. (1989). Ein sozial-ökologisches Verkehrsmodell zur Simulation von Verkehrsnachfragewirkungen. [46]. Braunschweig. Veröffentlichungen des Instituts für Stadtbauwesen der TU Braunschweig.
43. Kutter, E. (2003). Modellierung für die Verkehrsplanung. Technische Universität Hamburg-Harburg. [Working Paper 21]. Hamburg. ECTL.
44. Schnabel, W. und D. Lohse (1997). Grundlagen der Straßen-Verkehrstechnik und der Verkehrsplanung. Band 1. Verlag für Bauwesen.
45. Ortuzar, J. d. D. und L. G. Willumsen (1990). Modelleing Transport. Chichster, New York, Brisbane, Toronto, Songapore, John Wiley Sons.
46. Manz, W. (2005). Mikroskopische längsschnittorientierte Abbildung des Personenfernverkehrs. 62/05. Karlsruhe, Institut für Verkehrswesen, Universität Karlsruhe.
47. Friedrich, M. und P. Vortisch (2005). Verfahren zur dynamischen Verkehrsumlegung - Ein methodischer Überblick. Straßenverkehrstechnik - 03, S. 128-144. Köln, FGSV.
48. Cascetta, E. (2001). Transportation Systems Engineering: Theory and Methods. Dordrecht, Kluver Academic Publishers.
49. Ben-Akiva, M. und S. R. Lerman (1985). Discrete Choice Analysis Theorie and Application to Travel Demand. Cambridge, London, MIT Press.
50. Train, K. (2003). Discrete Choice Methods with Simulation. University Press Cambridge.
51. Geweke, S. und D. Zumkeller (2006). A Simulation Game to Explore the Effects of Information on Traveler Behavior. Transportation Research Board, 85th Meeting. Washington, D. C., USA.
52. Gringmuth, C., G. Liedtke, S. Geweke und W. Rothengatter (2006). Impacts of intelligent information systems on transport and the economy - the micro-based modeling system OVID. Advances in Modeling, Optimization and Managment of Transportation Processes and Systems: Theory and Practice, 10th Meeting of the EURO Working Group Transportation (EWGT). Posen.

53. Axhausen, K. W. und G. Sammer (2001). Hypothetische Märkte als Befragungsthe-  
ma. Internationales Verkehrswesen 53 [6], 274-278. Hamburg, Deutscher Verkehrs-  
Verlag GmbH.
54. Geweke, S. und C. Schulz (2004). How far individual travel behaviour will be influ-  
enced by transport information services? "Progress in Activity-Based Analysis", Euro-  
pean Institute of Retailing and Services Studies (EIRASS). Maastricht.
55. Deutsches Mobilitätspanel (2007). Homepage des Deutschen Mobilitätspanels MOP.  
Institut für Verkehrswesen, Universität Karlsruhe TH. [http://mobilitaetspanel.ifv.uni-  
karlsruhe.de/](http://mobilitaetspanel.ifv.uni-karlsruhe.de/) . 14-10-2003.
56. PTV AG (2007). VISUM 10.0 Benutzerhandbuch. Karlsruhe.
57. PTV AG (2007). VISSIM 4.3 Benutzerhandbuch. Karlsruhe.
58. Wiedemann, R. (1974). Simulation des Straßenverkehrsflusses. [Heft 8]. Schriften-  
reihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe (TH).
59. Herz, R., H. Schlichter und Siegner W. (1976). Angewandte Statistik für Verkehrs-  
und Regionalplaner. Düsseldorf, Werner Verlag.
60. van der Mede, P. und E. van Berkum (1994). The Impact of Traffic Information: Dy-  
namics in Route and Departure Time Choice. Delft, Delft Universität.
61. Lipps, O. (2001). Modellierung der individuellen Verhaltensvariation bei der Ver-  
kehrsentstehung. [Heft 58]. Karlsruhe. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen  
der Universität Karlsruhe.
62. Toll Collect GmbH (2008). Mauthöhe. [http://www.toll-  
collect.de/mautsystem/tcrdifr002-012\\_schadstoffklassen.jsp](http://www.toll-collect.de/mautsystem/tcrdifr002-012_schadstoffklassen.jsp) . 21-4-2008.
63. Fukuda, T., K. Takefuji, Y. Ikemoto und Y. Hasegawa (2002). Dynamical Route-  
Planning for Vehicles based on Global Traffic Information and Communication. The  
IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Systems. Singapur.  
Singapur. 2002.
64. Kuhnimhof, T. (2007). Längsschnittmodellierung der Verkehrsnachfrage zur Abbil-  
dung multimodalen Verhaltens. Institut für Verkehrswesen, Universität Karlsruhe.
65. BMW Group (2008). parkinfo.com. <http://www.parkinfo.com/de/index.jsp?land=DE> .

## Lebenslauf

<i>Name:</i>	Stefan Geweke
<i>Geburtstag und –ort:</i>	17.06.1975 in Celle
<i>Familienstand:</i>	verheiratet, zwei Kinder
<i>Mai 1995</i>	Hölty-Gymnasium Celle, Abitur
<i>Juli 1995 - Juni 1996</i>	Wehrdienst im Panzerlehrbataillon 334, Celle
<i>Okt. 1996 – Juli 1997</i>	Studium der Germanistik und Romanistik an der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg
<i>Okt. 1997 – Mai 2002</i>	Studium der Betriebswirtschaftslehre an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg und der Clemson University (USA) mit den Schwerpunkten Logistik, Wirtschaftsinformatik und Unternehmensführung
<i>Juli 2002 – Apr. 2003</i>	Anwendungsentwickler und Consultant für Logistiksysteme bei der Itellium Systems & Services GmbH, Nürnberg
<i>Mai 2003 – Juli 2008</i>	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verkehrswesen an der Universität Karlsruhe (TH)
<i>Seit August 2008</i>	Consultant bei der UNICONSULT Universal Transport Consulting GmbH, Hamburg



## **Veröffentlichungen aus dem Institut für Verkehrswesen**

(Die mit \* versehenen Veröffentlichungen sind vergriffen)



**Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen (ISSN 0341–5503)**

Die Hefte der Schriftenreihe können über das Institut für Verkehrswesen zum Preis von 11,00 Euro sowie über den Buchhandel bestellt werden. Mit \* gekennzeichnete Hefte sind leider vergriffen.

**Heft 68 – Wittowsky, D. (2009)**

Dynamische Informationen im ÖPNV – Nutzerakzeptanz und Modellierung

**Heft 67 – Geweke, S. (2009)**

Wirksamkeit von Verkehrsinformationen und belastungsabhängigen Preisen zur Nutzung von Kapazitätsreserven im Straßennetz

**Heft 66 – Kuhnimhof, T. (2007)**

Längsschnittmodellierung der Verkehrsnachfrage zur Abbildung multimodalen Verhaltens

**Heft 65 – Last, J. (2006)**

Barrieren und Potenziale intermodaler Angebotskonzepte im Personenfernverkehr

**Heft 64 – Vortisch, P. (2006)**

Modellunterstützte Messwertpropagierung zur Verkehrslageschätzung in Stadtstraßennetzen

**Heft 63 – Heine-Nims, T. (2006)**

Einbeziehung kurzfristiger Verhaltensänderungen bei der Modellierung der Verkehrsnachfrage

**Heft 62 – Manz, W. (2005)**

Mikroskopische längsschnittorientierte Abbildung des Personenverkehrs

**Heft 61 – Eberhard, O. (2005)**

Wirkungsanalyse individuell-dynamischer Zielführungssysteme im Straßenverkehr

**Heft 60 - Waßmuth, V. (2002)**

Modellierung der Wirkungen verkehrsreduzierender Siedlungskonzepte

**Heft 59 - Oketch, T. (2001)**

A Model for Heterogeneous Traffic Containing Non-Motorised Vehicles

**Heft 58\* - Lipps, O. (2001)**

Modellierung der individuellen Verhaltensvariationen bei der Verkehrsentstehung

**Heft 57 - Lee, S. (1999)**

Wechselwirkungen zwischen Verkehr und Telekommunikation in einer asiatischen Stadtumgebung

**Heft 56 - Kickner, S. (1998)**

Kognition, Einstellung und Verhalten – Eine Untersuchung des individuellen Verkehrsverhaltens in Karlsruhe

**Heft 55 - Chlond, B. (1996)**

Zeitverwendung und Verkehrsgeschehen – Zur Abschätzung des Verkehrsumfangs bei Änderungen der Freizeitdauer

**Heft 54 - Schwarzmann, R. (1995)**

Der Einfluß von Nutzerinformationssystemen auf die Verkehrsnachfrage

**Heft 53 - Reiter, U. (1994)**

Simulation des Verkehrsablaufs mit individuellen Fahrbeeinflussungssystemen

**Heft 52 - Nickel, F. (1994)**

Stationsmanagement von Luftverkehrsgesellschaften - Eine systemanalytische Betrachtung und empirische Untersuchung der Stationsmanagement-Systeme internationaler Luftverkehrsgesellschaften

**Heft 51 - Rekersbrink, A. (1994)**

Verkehrsflußsimulation mit Hilfe der Fuzzy-Logic und einem Konzept potentieller Kollisionszeiten

**Heft 50 - Höfler, F. (1994)**

Leistungsfähigkeit von Ortsdurchfahrten bei unterschiedlichen Geschwindigkeitsbeschränkungen - untersucht mit Hilfe der Simulation

**Heft 49 - Liu, Y. (1994)**

Eine auf FUZZY basierende Methode zur mehrdimensionalen Beurteilung der Straßenverkehrssicherheit

**Heft 48 (1992)**

30 JAHRE INSTITUT FÜR VERKEHRSWESEN

**Heft 47 - Grigo, R. (1992)**

Zur Addition spektraler Anteile des Verkehrslärms

**Heft 46 - Hsu, T.P. (1991)**

Optimierung der Detektorlage bei verkehrsabhängiger Lichtsignalsteuerung

**Heft 45 - Schnittger, ST. (1991)**

Einfluß von Sicherheitsanforderungen auf die Leistungsfähigkeit von Schnellstraßen

**Heft 44 - Zoellmer, J. (1991)**

Ein Planungsverfahren für den ÖPNV in der Fläche

**Heft 43 - Aly, M.S. (1989)**

Headway Distribution Model and Interrelationship between Headway and Fundamental Traffic Flow Characteristics

**Heft 42 - Heidemann, D. (1989)**

Ein mathematisches Modell des Verkehrsflusses

**Heft 41 - Becker, U. (1989)**

Beobachtung des Straßenverkehrs vom Flugzeug aus: Eigenschaften, Berechnung und Verwendung von Verkehrsgrößen

**Heft 40 - Axhausen, K. (1989)**

Eine ereignisorientierte Simulation von Aktivitätenketten zur Parkstandwahl

**Heft 39 - Maier, W. (1988)**

Bemessungsverfahren für Befragungszählstellen mit Hilfe eines Warteschlangenmodells

**Heft 38 - Bleher, W.G. (1987)**

Messung des Verkehrsablaufs aus einem fahrenden Fahrzeug – Beurteilung der statistischen Genauigkeit mittels Simulation

**Heft 37\* - Möller, K. (1986)**

Signalgruppenorientiertes Modell zur Optimierung von Festzeitprogrammen an Einzelknotenpunkten

**Heft 36\* (1987)**

25 JAHRE INSTITUT FÜR VERKEHRSWESEN



**Heft 35 - Gipps, P.G. (1986)**

Simulation of Pedestrian Traffic in Buildings

**Heft 34 - Young, W. (1985)**

Modelling the Circulation of Parking Vehicles - A Feasibility Study

**Heft 33 - Stucke, G. (1985)**

Bestimmung der städtischen Fahrtenmatrix durch Verkehrszählungen

**Heft 32 - Benz, TH. (1985)**

Mikroskopische Simulation von Energieverbrauch und Abgasemission im Straßenverkehr (MISEVA)

**Heft 31\* - Baass, K. (1985)**

Ermittlung eines optimalen Grünbandes auf Hauptverkehrsstraßen

**Heft 30 - Bosserhoff, D. (1985)**

Statistische Verfahren zur Ermittlung von Quelle-Ziel-Matrizen im Öffentlichen Personennahverkehr - Ein Vergleich

**Heft 29 - Haas, M. (1985)**

LAERM - Mikroskopisches Modell zur Berechnung des Straßenverkehrslärms

**Heft 28 - May, A.D. (1984)**

Traffic Management Research at the University of California

**Heft 27\* - Mott, P. (1984)**

Signalsteuerungsverfahren zur Priorisierung des Öffentlichen Personennahverkehrs

**Heft 26\* - Hubschneider, H. (1983)**

Mikroskopisches Simulationssystem für Individualverkehr und Öffentlichen Personennahverkehr

**Heft 25\* (1982)**

20 JAHRE INSTITUT FÜR VERKEHRSWESEN - Ein Institut stellt sich vor

**Heft 24\* - Leutzbach, W. (1982)**

Verkehr auf Binnenwasserstraßen

**Heft 23\* - Jahnke, C.-D. (1982)**

Kolonnenverhalten von Fahrzeugen mit autarken Abstandswarnsystemen

**Heft 22\* - Adolph, U.-M. (1981)**

Systemsimulation des Güterschwerverkehrs auf Straßen

**Heft 21\* - Allsop, R.E. (1980)**

Festzeitsteuerung von Lichtsignalanlagen

**Heft 20\* - Sparmann, U. (1980)**

ORIENT - Ein verhaltensorientiertes Simulationsmodell zur Verkehrsprognose

**Heft 19\* - Willmann, G. (1978)**

Zustandsformen des Verkehrsablaufs auf Autobahnen

**Heft 18\* - Handschmann, W. (1978)**

Sicherheit und Leistungsfähigkeit städtischer Straßenkreuzungen unter dem Aspekt der Informationsverarbeitung des Kraftfahrzeugführers

**Heft 17\* - Zahn, E.M. (1978)**

Berechnung gesamtkostenminimaler außerbetrieblicher Transportnetze

**Heft 16\* - Sahling, B.-M. (1977)**

Verkehrsablauf in Netzen - ein graphentheoretisches Optimierungsverfahren

**Heft 15 - Laubert, W. (1977)**

Betriebsablauf und Leistungsfähigkeit von Kleinkabinenbahnstationen

**Heft 14\* - Bahm, G. (1977)**

Kabinengröße und Betriebsablauf neuer Nahverkehrssysteme

**Heft 13\* - Haenicke, W. (1977)**

Der Einfluß von Verflechtungen in einem bedarfsorientierten Nahverkehrssystem auf die Reisegeschwindigkeit

**Heft 12 - Koffler, TH. (1977)**

Vorausschätzung des Verkehrsablaufs über den Weg

**Heft 11 - Pape, P. (1976)**

Weglängen-Reduzierung in Fluggast-Empfangsanlagen durch flexible Vorfeldpositionierung

**Heft 10 - Thomas, W. (1974)**

Sensitivitätsanalyse eines Verkehrsplanungsmodells

**Heft 9\* - Köhler, U. (1974)**

Stabilität von Fahrzeugkolonnen

**Heft 8\* - Wiedemann, R. (1974)**

Simulation des Straßenverkehrsflusses

**Heft 7\* - Bey, I. (1972)**

Simulationstechnische Analyse der Luftfrachtabfertigung

**Heft 6\* (1972)**

10 JAHRE INSTITUT FÜR VERKEHRSWESEN

**Heft 5 - Droste, M. (1971)**

Stochastische Methoden der Erfassung und Beschreibung des ruhenden Verkehrs

**Heft 4\* - Böttger, R. (1970)**

Die numerische Behandlung des Verkehrsablaufs an signalgesteuerten Straßenkreuzungen

**Heft 3\* - Koehler, R. (1968)**

Verkehrsablauf auf Binnenwasserstraßen - Untersuchungen zur Leistungsfähigkeitsberechnung und Reisezeitverkürzung

**Heft 2\* - Stoffers, K.E. (1968)**

Berechnung von optimalen Signalzeitenplänen

**Heft 1\* - Baron, P.S. (1967)**

Weglängen als Kriterium zur Beurteilung von Fluggast-Empfangsanlagen

---

**Sonderdruck 1/96 – Leutzbach, W.**

Institutsgeschichte 1962 - 1991

**Sonderdruck 2/96**

ÖPNV in Mittelstädten – Dokumentation eines Fachgesprächs mit Planungshinweisen

**Sonderdruck 3/03**

80 Jahre Wilhelm Leutzbach – Vorträge zur Festveranstaltung am 14. November 2002.

## Im Buchhandel erhältliche Publikationen

**Saunders, M. J.; Chlond, B.; Kuhnimhof, T.; da Silva, A. N. R. (2008)**

Incorporating transport energy into urban planning, in: Transportation Research Part A: Policy and Practice (42), Issue 6, S. 874 - 882, Elsevier 2008

**Mühlhans, H.; Chlond, B.; Zumkeller D. (2008)**

Abschätzung der zukünftigen Entwicklung von Verkehr und Mobilität in der Region Frankfurt Rhein-Main bis zum Jahr 2030 – Methodisches Konzept und ausgewählte Ergebnisse, in : FGSV (Hrsg.): Heureka 2008 (Optimierung in Verkehr und Transport 5./6. März 2008, Stuttgart/Köln 2008, S.198 - 217

**Last, J.; Zumkeller, D. (2008)**

„Intermodaler Personenfernverkehr und die Bedeutung der „letzten Meile“, in: Der Nahverkehr, Heft 1-2/ 2008

**Chlond, B.; Ottmann, P. (2007)**

Das Mobilitätsverhalten Alleinerziehender und ihre Aktivitäten außer Haus. In: Deutsche Zeitschrift für Kommunalwissenschaften (46) 2007/II, S. 49-61

**Zumkeller, D. (2007)**

„Prognosen in der kommunalen Verkehrsplanung“, in: Handbuch der kommunalen Verkehrsplanung, Hrsg.: Apel; Holzapfel; Kiepe; Lehmbrock; Müller; Economia Verlag Bonn, 46. Ergänzungslieferung, Teil 3.2.3.1, 2007

**Kuhnimhof, T.; Chlond, B., Zumkeller, D. (2006).**

„Nonresponse, Selectivity and Data Quality in Travel Surveys - Experiences from Analyzing the Recruitment for the German Mobility Panel“ in: Transport Research Board (Hrsg.), Travel Survey Methods, Information Technology and Geospatial Data, Transport Research Record, No. 1972, 2006, ISBN 0-309-09981-1, S. 29-37

**Zumkeller, D.; Vallée, D. (2006)**

„Die Zukunft wird unzuverlässiger – Renaissance der Planung angesichts des demographischen Wandels?“, in: Straßenverkehrstechnik 11/2006, S. 657-664

**Zumkeller, D.; Madre J-L.; Chlond, B.; Armoogum, J. (2006)**

„Panel Surveys“, paper presented for Costa Rica Conference 2004, August 1-6, 2004. In: Stopher, P., Stecher, Ch. (Hrsg): Travel Survey Methods. Quality and Future Directions, Elsevier Oxford/Amsterdam 2006, ISBN 978-0-08-044662-2, S. 363-389

**Chlond, B.; Zumkeller, D. et.al (2006)**

„Hinweise zu verkehrlichen Konsequenzen des demographischen Wandels“, Arbeitspapier zum Arbeitskreis 1.1.30 / 1.6.7 / 1.11.19 der FGSV, FGSV (Hrsg.) 144/2006, ISBN 3-937356-80-0

**Zumkeller, D.; Weißkopf, W. (2006)**

„Ausreichende Verkehrsbedienung – wie sie sich bestimmen lässt. Erfahrungen mit der Leitlinie zur Nahverkehrsplanung in Bayern“, in: Der Nahverkehr, 1-2 / 2006, S. 42-47

**Zumkeller, D., (2005)**

„Stagniert die Nachfrage im Personenverkehr?“, Vortrag beim DVWG-Workshop Demografischer Wandel, Mobilität und Verkehr am 19. Oktober 2004 in Kaiserslautern, in: Schriftenreihe der Deutschen Verkehrswissenschaftlichen Gesellschaft e.V. DVWG, Reihe B, Heft B 279/2005, ISBN 3-937877-09-6, S. 94-123

**Zumkeller, D., (2004)**

„Verkehrliche Wirkungen des demografischen Wandels – Erkenntnisse aus zehn Jahren Panel“, Vortrag beim Deutschen Straßen- und Verkehrskongress der FGSV, 13.-15. Oktober 2004 in Berlin, in: Straßenverkehrstechnik 12/04, S. 651–658 und in: FGSV (Hrsg.), FGSV 001/20: Deutscher Straßen- und Verkehrskongress 2004, CD-ROM, ISBN 3-937356-67-3

**Zumkeller, D.; Chlond, B.; Manz, W. (2004)**

„Infrastructure Development under Stagnating Demand Conditions – a new Paradigm?“, Conference paper presented at TRB Annual Meeting January 11-15, 2004 in Washington DC, In: Transportation Research Record No. 1864, Transportation Finance, Economics and Economic Development 2004, S. 121–128.

**Zumkeller, D. (2004)**

„Fördert Telekommunikation den Bedeutungsverlust der Nähe? – ein Zukunftsbild unserer Mobilität“, Vortrag bei der Tagung „City.net – Städte im Zeitalter der Telekommunikation“ am 19.6.2003 in Weimar, in: Hassenpflug, D., Tegeder G. (Hrsg.), City.net – Städte im Zeitalter der Telekommunikation, Marburg 2004, ISBN 3-8288-8711-2, S. 149-173.

**Zumkeller, D.; Allsop, R. (Hrsg.) (2003)**

Kleines Fachwörterbuchs Verkehrswesen Englisch-Deutsch/Deutsch-Englisch, Klett-Verlag (PONS-Wörterbücher), ISBN 3-12-518276-6

**Zumkeller, D. (2002)**

„Ein Zukunftsbild unserer Mobilität“, Vortrag beim 5. Mainauer Mobilitätsgespräch am 17. Juli 2002, in: 5. Mainauer Mobilitätsgespräch, Mainauer Gesprächsbeiträge zu gesellschaftlichen Fragen unserer Zeit, Schriftenreihe der Lennart Bernadotte-Stiftung, S. 11-18, ISBN 3-926937-90-4

**Zumkeller, D. (2002)**

„Transport and Telecommunication: First Comprehensive Surveys and Simulation Approaches“, in: Mahmassani, H.S. (Hrsg.): In Perpetual Motion: Travel Behavior Research Opportunities and Application Challenges, Amsterdam et al., ISBN 0-08-044044-4

**Zumkeller, D. (2001)**

„Personenverkehr“, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Forschungsberichte, Hrsg. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr, Bonn–Bad Godesberg, Heft 800/2001, ISBN 3–934458–2

**Zumkeller, D. (2001)**

„Telekommunikation, Telematik und Verkehr im Jahre 2020 – Ein Zukunftsbild unserer Mobilität“, in: Perspektiven und Konzepte für Mobilität und Infrastruktur, Analysen, Materialien und Forschung des Mobilitätskongresses 2000 vom 8./9. November in Berlin, Hrsg. InformationsZentrum Beton GmbH, 2001, S. 134–145

**Zumkeller, D. (2001)**

„The Impact of Telecommunication and Transport on Spatial Behaviour“, in: Henscher, David, International Association for Travel Behaviour Research (Hrsg.): Travel Behaviour Research – The Leading Edge IATBR '2000, the 9<sup>th</sup> Meeting of the International Association for Travel Behaviour Research, Brisbane, Australia 2000, ISBN 008–043924–1

**Zumkeller, D. (2001)**

„Erhebungen, Prognose- und Szenariotechnik“, in: Der Ingenieurbau – Fachwissen Verkehr, Wiley–VCH–Verlag, Weinheim

**Zumkeller, D.; Köhler, U. (2001)**

„Induzierter Verkehr“, Kap. A-9 in: Köhler, U. (Hrsg.), Ingenieurbau: Verkehr – Straße, Schiene, Luft, Verlag Ernst & Sohn, Berlin 2001, ISBN 3-433-01576-7, S. 120-125 sowie Kap. B-2.2, S. 153-167, B-2.4, S. 192-204

**Zumkeller, D. (2000)**

„Eigenschaften von Paneluntersuchungen – Anwendungen und Einsatzmöglichkeiten im Verkehrsbereich“, in: Dynamische und statische Elemente des Verkehrsverhaltens – Das Deutsche Mobilitätspanel, Wissenschaftliches Kolloquium in Karlsruhe am 28./ 29. September 2000, Reihe B 234, S. 3–34, ISBN 3–933392–34–9

**Chlond, B.; Manz, W. (2000)**

„INVERMO. Das Mobilitätspanel für den Fernverkehr“, in: Dynamische und statische Elemente des Verkehrsverhaltens – Das Deutsche Mobilitätspanel, Reihe B 234, S. 203–227, ISBN 3–933392–34–9

**Lipps, O. (2000)**

„Variation im individuellen Mobilitätsverhalten und Anwendungsmöglichkeiten für die Verkehrsplanung“, in: Dynamische und statische Elemente des Verkehrsverhaltens – Das Deutsche Mobilitätspanel, Reihe B 234, S. 203–227, ISBN 3–933392–34–9

**Zumkeller, D.; Schwarzmann, R.; Heinze, G.W.; Kill, H.H. (2000)**

50 Jahre Straßenwesen in der Bundesrepublik Deutschland. 1949–1999. Ein Rückblick, Hrsg. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn, ISBN 3–00–007506–2

**Zumkeller, D.(1999)**

„Verkehr und Telekommunikation – Grundlagen und Simulationsansätze“, in: Arbeitsmaterial der Akademie für Raumforschung und Landesplanung – Hannover ARL, Nr. 251, ISBN 3–88838–651–9

**Zumkeller, D. (1999)**

„Verhaltensmodelle in den Verkehrswissenschaften“, Verhaltensänderungen im Verkehr: „Restriktionen versus Soft-Policies“, Ergebnisse der Veranstaltung X der Workshop-Reihe im Themenbereich Verkehr und Raumstruktur, Akademie für Technikfolgenabschätzung, Arbeitsbericht Nr. 147, Stuttgart-Hohenheim

**Zumkeller, D.; Chlond, B.; Lipps, O. (1998)**

„Das Mobilitäts-Panel (MOP) – Konzept und Realisierung einer bundesweiten Längsschnittbeobachtung“, in: Hrsg. Deutsche Verkehrswissenschaftliche Gesellschaft, 9. DVWG-Workshop über Verkehrsstatistik: „Innovative Konzepte und Methoden – dringlicher denn je“, Reihe B 217, S. 33–53, Heilbronn

**Zumkeller, D.; Chlond, B. (1997)**

„Future Time Use and Travel Time Budget Changes – Estimation Transportation Volumes in the Case of Increasing Leisure Time“, IATBR '97, the 8<sup>th</sup> Meeting of the International Association for Travel Behaviour Research, Austin, Texas

**Zumkeller, D. (1997)**

„Modelle und Szenarien der Verkehrsplanung“, in: Handbuch der kommunalen Verkehrsplanung, Hrsg.: Apel; Holzapfel; Kiepe; Lehmbrock; Müller; Economica Verlag Bonn, 18. Ergänzungslieferung, Teil 3.2.4. 1, S.1–27

**Zumkeller, D.; Blechinger, W.; Chlond, B.; Seitz, H.; Axhausen, K.; van Maanen, T. (1994)**

„Paneluntersuchungen zum Verkehrsverhalten“, Hrsg. Bundesministerium für Verkehr, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 688 Bonn–Bad Godesberg

**Zumkeller, D.; Seitz, H. (1993)**

„Aufbereitung vorhandener Daten für Verkehrsplanungszwecke als Ersatz für neue Befragungen“, Hrsg. Bundesministerium für Verkehr, Forschung, Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 642, Bonn–Bad Godesberg

**Zumkeller, D. et al. (1993)**

Part I: Europe: A Heterogeneous 'Single Market' und Part III: Germany: On the Verge of a New Era, in: Salomon, I.; Bovy, P.; Orfeuil, J.-P. (Hrsg.): "A Billion Trips a Day - Tradition and Transition in European Travel Patterns", Kluwer Academic Publishers Group, Dordrecht, ISBN 0-7923-229-5

**Zumkeller, D.; Steinbach, J. (1992)**

„Integrierte Planung von Hochgeschwindigkeitsverkehr in Europa“, Hrsg. Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung, Heft 4, Bonn

**Zumkeller, D. (1989)**

„Ein sozialökologisches Verkehrsmodell zur Simulation von Maßnahmewirkungen“, Diss., TU-Braunschweig 1988, in: Veröffentlichungen des Instituts für Stadtbauwesen, TU Braunschweig, ISSN 0341-5805

**Leutzbach, W. (1988)**

Introduction to the Theorie of Traffic Flow, Springer-Verlag Berlin-Heidelberg-New York, ISBN 3-540-17113-4

**Wiedemann, R.; Hubschneider, H. (1987)**

„Simulationsmodelle“, in: Lapiere, R; Steierwald, G. (Hrsg.) Verkehrsleittechnik für den Straßenverkehr, Band 1, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, ISBN 3-540-16850-8

**Ruppert, W.-R.; Leutzbach, W.; Adolph, U.-M. et al. (1981)**

Achslasten und Gesamtgewichte schwerer Lkw, Nutzen-Kosten-Untersuchung der zulässigen Höchstwerte, Hrsg. Bundesminister für Verkehr, Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln, ISBN 3-88585-035-4

**Herz, R.; Schlichter, H.-G.; Siegener, W. (1976)**

Angewandte Statistik für Verkehrs- und Regionalplaner, Werner-Ingenieur-Texte 42, Werner-Verlag, Düsseldorf, ISBN 3-8041-1934-4, 2. neu bearbeitete und erweiterte Auflage (1992), ISBN 3-8041-1971-9

**Beckmann, H.; Jacobs, F.; Lenz, K.-H.; Wiedemann, R.; Zackor, H. (1973)**

Das Fundamentaldiagramm, Kirschbaum-Verlag, Bad Godesberg, ISBN 3-7812-0846X

**Leutzbach, W. (1972)**

Einführung in die Theorie des Verkehrsflusses, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, ISBN 3-540-05724-2

**Lenz, K.-H.; Garsky, J. (1968)**

Anwendung mathematisch-statistischer Verfahren in der Straßenverkehrstechnik, Kirschbaum-Verlag, Bad Godesberg

