Schlussbericht der Universität Stuttgart

Forschungsprojekt *wiki*

Wirkungen von individueller und kollektiver ontrip Verkehrsbeeinflussung auf den Verkehr in Ballungsräumen

31.01.2012

Beitrag des Zuwendungsempfängers:	Universität Stuttgart Lehrstuhl für Verkehrsplanung und -leittechnik Pfaffenwaldring 7 70569 Stuttgart
Laufzeit:	01.01.2008 – 31.01.2012

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie

unterstützt und gefördert mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi)

Der vorliegende Bericht enthält alle Tätigkeiten und Ergebnisse der Universität Stuttgart innerhalb des Projekts *wiki*.

Zitiervorschlag:
Friedrich, M., Mandir, E., Pillat, J. (2012): *wiki* – Wirkungen von individueller und kollektiver ontrip Verkehrsbeeinflussung auf den Verkehr in Ballungsräumen, *Schlussbericht der Universität Stuttgart*, Forschungsbericht Förderkennzeichen 19 P 7048 B (BMWi).

Die Arbeiten aller Projektpartner sind in einem gemeinsamen Schlussbericht inhaltlich zusammengefasst aufbereitet. Detaillierte Beschreibungen der Projektbeträge der einzelnen Partner sind den jeweiligen Einzelberichten zu entnehmen. Alle Berichte können unter folgender Stelle eingesehen werden:

Technische Informationsbibliothek
Deutsche Forschungsberichte, Postfach 6080, 30060 Hannover.

Inhalt

1 Einführung 5

1.1 Aufgabenstellung 5

1.2 Projektstruktur 6

1.2.1 Projektvoraussetzungen 6

1.2.2 Projektplanung und -ablauf 8

1.2.3 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 11

2 Wissenschaftlicher und technischer Stand 13

3 Erzielte Ergebnisse 15

3.1 Aufbau Datenplattform zur Erfassung der aktuellen Verkehrslage im Testgebiet München 15

3.2 Erfassung von Ortsveränderungen zur Analyse des Routen- und Abfahrtszeitwahlverhaltens 20

3.2.1 Erhebungsdesign für die Erfassung des Routenwahl- und Abfahrtszeitwahlverhaltens 22

3.2.2 Befragung der Teilnehmer 25

3.2.3 Zusammenfassung 38

3.3 Aufbereitung der Verkehrslagedaten 39

3.3.1 Aufbereitung der Befragungsdaten 40

3.3.2 Aufbereitung der GPS-Log Befahrungen 51

3.3.3 Aufbau Verkehrsmodell 68

3.3.4 Zusammenfassung 76

3.4 Analyse des Routenwahl- und Abfahrtszeitwahlverhaltens 78

3.4.1 Analyse der Nutzung von Verkehrsinformationen und der Befolgung von Empfehlungen 79

3.4.2 Erstellung der Choice Sets 90

3.4.3 Analyse der Routenwahlverhaltens 114

3.4.4 Aufbereitung der Wirkungszusammenhänge des Routenwahlverhaltens 119

3.4.5 Analyse des Abfahrtszeitwahlverhaltens 121

3.4.6 Aufbereitung der Wirkungszusammenhänge des Abfahrtszeitwahlverhaltens 126

3.4.7 Zusammenfassung 128

3.5 Ermittlung der Potentiale von Verkehrsbeeinflussungssystemen 129
3.5.1 Ziele, Zielkonflikte und Potentiale einer Beeinflussung der Routen- und Abfahrtszeitwahl 130
3.5.2 Ermittlung von Verkehrszuständen 138
3.5.3 Quantifizierung der Potentiale bezogen auf den Reisezeitaufwand und den Kraftstoffverbrauch 143
3.5.4 Ermittlung von Leistungsreserven 152
3.5.5 Zusammenfassung 152
3.6 Ableitung von Handlungsempfehlungen 153

4 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertungsplan 157

5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen 159

6 Veröffentlichungen von Projektergebnissen 161
6.1 Partner übergreifende Veröffentlichungen 161
6.2 Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik 161

7 Glossar 163
7.1 Netzobjekte 163
7.2 Routen und Ortsveränderungen 163
7.3 Maßnahmen und Strategien 165
7.4 Dynamische Daten 166
7.5 Netze 167
7.6 Entscheidungsmodelle 167

8 Literatur 169

9 Abbildungsverzeichnis 175

10 Tabellenverzeichnis 179

11 Anhang 181
11.1 Online Befragung 181
11.2 Stated Preference Befragung zur Routenwahl 188
11.3 Beispiel Datenbericht 195

1 Einführung

1.1 Aufgabenstellung

Die Sicherung einer ausreichenden Mobilität (im Sinne von Ortsveränderungen) für die Bevölkerung sowie der zügige Transport von Gütern und Waren ist eine unverzichtbare Voraussetzung für die wirtschaftliche Entwicklung des Standorts Deutschland. Um die hierfür erforderliche Leistungsfähigkeit der Verkehrsinfrastrukturen zu gewährleisten und insbesondere bestehende Leistungsreserven zu aktivieren, werden Verkehrsmanagementmaßnahmen eine hohe Bedeutung beigemessen. Als Bestandteil eines dynamischen Verkehrsmanagements sollen vielfältige Verkehrsbeeinflussungssysteme (vgl. Brilon et al. [12]) dazu beitragen, die Verkehrsströme gleichmäßiger im Netz zu verteilen, Belastungsspitzen zu entzerren, und so den Verkehr verträglicher abwickeln. Diese Beeinflussung kann dabei durch Meldungen (z. B. Verkehrsfunk), durch Lenkung (z. B. Wechselwegweisung oder Navigationsgerät) und durch Vorschriften (z. B. Geschwindigkeitsbeschränkungen über Streckenbeeinflussungsanlagen) erfolgen.

Obwohl bereits erheblich in diesen Bereich investiert wurde, existieren über die Wirksamkeit der einzelnen Verkehrsbeeinflussungssysteme nur teilweise belastbare Erkenntnisse. Insbesondere über die Wirksamkeit von Systemen, die im Kfz-Verkehr die Routenwahl oder die Wahl der Abfahrtszeit beeinflussen, fehlt eine Quantifizierung der Wirkungszusammenhänge:

- Genügt es, allen Verkehrsteilnehmern möglichst „perfekte“ Verkehrsinformationen zur Verfügung zu stellen, oder ist es besser, wenn eine Verkehrsmanagementzentrale die Entscheidungen der Verkehrsteilnehmer direkt beeinflusst? Fließt der Verkehr besser, wenn jeder Verkehrsteilnehmer auf der Basis möglichst perfekter Verkehrslageinformation seine Entscheidungen selbst trifft (selbstorganisierender Verkehr) oder durch konkrete Empfehlungen zum Beispiel über Wechselwegweisungen geleitet wird (gesteuerter Verkehr)?
- Was können Betreiber tun, um die Verkehrsstärke auf einem überlasteten Streckenzug um 10 % zu reduzieren? Ist diese Größenordnung überhaupt durch verkehrsbeeinflussende Maßnahmen erreichbar oder wird sie sogar überschritten, so dass es auf Alternativrouten zu Überlastungen kommt?
- In welchem Umfang können über die Verkehrsbeeinflussungssysteme Verkehrsfunk, Wechselwegweisung und Navigationsgerät verkehrsbezogene Kenngrößen (Zeitaufwand) und umweltbezogene Kenngrößen (Emissionen) verbessert werden und was muss getan werden, um dieses Potenzial zu erschließen.

- Hat die Qualität der Verkehrsinformationen[1] einen Einfluss auf das Verhalten bzw. den Befolgungsgrad eines Verkehrsteilnehmers?

Der Grund für diese Unkenntnis liegt darin, dass die Reaktionen der Verkehrsteilnehmer auf Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen und der Kontext, in dem Verkehrsteilnehmer ihre Entscheidungen treffen, nur sehr aufwändig zu erfassen sind.

1.2 Projektstruktur

1.2.1 Projektvoraussetzungen

Ausgehend von diesen Fragestellungen werden im Forschungsvorhaben *wiki* die Wirkungen von Verkehrsbeeinflussungssystemen untersucht, die Routenwahl und die Abfahrtszeitwahl im Kfz-Verkehr beeinflussen. Dabei werden sowohl kollektive Systeme (Verkehrsfunk, Wechselwegweisung) als auch individuelle Systeme (verschiedene Ausprägungen von Navigationssystemen) berücksichtigt. Um die Wirkungszusammenhänge zu quantifizieren, wurde das Verkehrsverhalten von Autofahrern in einem Testfeld mit verschiedenen sich ergänzenden Methoden erfasst. Die Kombination dieser drei Erhebungsmethoden ermöglicht es, alle mutmaßlichen Einflussgrößen auf die Routenwahl zu erfassen:

- Erhebung 1: Beobachtung des Routenwahlverhaltens im Hauptstraßennetz mit Hilfe von Kennzeichenerfassungssystemen (große Stichprobe, wenig Information über das Individuum):
  Die Kennzeichenerfassung erfasst das Routenwahlverhalten auf Teilrouten für ein großes Kollektiv über einen langen Zeitraum. Gleichzeitig liefert die Kennzeichenerfassung über die Erfassung der Reisezeit qualitativ hochwertige Informationen zur Beschreibung der Verkehrslage, die so durch einzelne FCD-Befahrungen nicht erreichbar sind.
- Erhebung 2: Beobachtungen des Routenwahl- und Abfahrtszeitwahlverhaltens ausgewählter Verkehrsteilnehmer mit Hilfe von GPS-Loggern und ergänzenden Befragungen (kleine Stichprobe, umfassende Information über das Individuum):
  Die Erfassung der Bewegungsmuster ausgewählter Personen über einen längeren Zeitraum ermöglicht es, Routenwahlentscheidungen im Kontext individueller Randbedingungen zu erfassen. Die Einflussgrößen auf die Routenwahl lassen sich nur auf dieser individuellen Ebene erfassen, da hier beobachtet werden kann, welche Verkehrsbeeinflussungssysteme dem Verkehrsteilnehmer tatsächlich zur Verfügung stehen und über welche Netzkenntnis er verfügt.

[1] Der Begriff der Verkehrsinformation umfasst alle Daten, die von Verkehrsbeeinflussungssystemen an den Verkehrsteilnehmer weitergegeben werden (z. B. Meldungen, Routenempfehlungen).

- Erhebung 3: Beobachtungen des ontrip Verkehrsverhaltens und -empfindens ausgewählter Verkehrsteilnehmer in städtischen Verkehrssituationen während der Fahrt mit einem Fahrsimulator (kleine Stichprobe, umfassende Information über das Individuum):
  Die Untersuchungen im Fahrsimulator ergänzen die Wirkungsermittlung um den Bereich, der in der Realität nicht erlebbar oder erfassbar ist. Dies umfasst zum einen die direkte Interaktion mit dem Fahrer während der Fahrsituation. Zum anderen wird es mit den Fahrsimulationen möglich, mehrere Probanden in exakt die gleichen Bedingungen zu versetzen und somit die inter- und intrapersonellen Eindrücke zu testen.

Die so gewonnenen Verhaltensdaten werden mit den gleichzeitig erhobenen Verkehrslagedaten aus der Kennzeichenerfassung und aus anderen Quellen in Verbindung gesetzt. Diese Datenbasis ist dann die Grundlage für die Analyse der Einflussgrößen auf das Routenwahl- und Abfahrtszeitwahlverhalten. Dabei werden Eigenschaften der Person (z. B. Ortskenntnis, Häufigkeit einer Fahrt) ebenso berücksichtigt wie die Verkehrslage zum Zeitpunkt der Entscheidung (z. B. Reisezeit auf Alternativrouten), Eigenschaften der Route (z. B. Zuverlässigkeit, Anzahl Kreuzungen), und die Art, der Umfang und die Qualität von Verkehrsinformationen. Die Qualität der Verkehrsinformationen lässt sich aus einem Vergleich mit den tatsächlichen Reisezeiten ableiten, die für die gewählte Route aus den GPS-Daten und für die Alternativrouten aus der Kennzeichenerfassung verfügbar sind.

Aufbauend auf den für eine Routenwahl relevanten Wirkungszusammenhängen zwischen Information und Verhalten wird in einem zweiten Schritt das Potenzial der untersuchten Verkehrsbeeinflussungssysteme abgeschätzt, um so konkrete Handlungsempfehlungen für zukünftige Verkehrsbeeinflussungssysteme geben zu können, und den Betrieb der vorhandenen Systeme weiter zu optimieren. Dazu soll die Größenordnung von Optimierungspotenzialen bezogen auf den Zeitaufwand und den Kraftstoffverbrauch quantifiziert werden, die man mit den Verkehrsbeeinflussungs-systemen bei sonst gleichen Randbedingungen (gleiche Quelle-Ziel-Relation, gleiches Verkehrsmittel, gleicher Fahrer) erreichen kann.

Ziel des Projekts ist es, die komplexen Wirkungszusammenhänge von Verkehrsbeeinflussung und Routenwahl durch umfassende empirische Unter-suchungen zu quantifizieren, um darauf aufbauend fundierte Handlungsstrategien für das Verkehrsmanagement abzuleiten. Die Erkenntnisse aus der Empirie ermöglichen auch eine verbesserte Parametrisierung von Verkehrsmodellen für die Planung und Steuerung des Verkehrs.

1.2.2 Projektplanung und -ablauf

Das Projektvorhaben ist in sechs Arbeitspakete gegliedert. In AP1 wurden auf dem Basisnetz die Verkehrsdaten - dabei handelt es sich um Detektorzählungen und ANPR-Messungen, Verkehrsmeldungen sowie Schaltzustände der Verkehrsbeeinflussungsanlagen - referenziert und fusioniert, so dass als Ergebnis eine Verkehrslage resultiert. Der dazu notwendige Prozess wurde qualitätsüberprüft. Aus der Verkehrslage wurden die Verkehrsinformationen für individuelle Navigationsservices wie auch die kollektive Verkehrsbeeinflussung gewonnen und zur Verfügung gestellt.

Die Aufgaben der Universität Stuttgart im Rahmen von AP1 bestanden in der Formulierung der Anforderungen an die Datenstruktur der Speicherinhalte der dynamischen Daten wie Reisezeiten aus ANPR-Systemen, Schaltzustände der Wechselwegweisungen und Streckenbeeinflussungsanlagen sowie Zählwerte der strategischen Detektoren. Weiterhin wurde eine Spezifikation des Datenmodells aller zur Analyse des Routenwahlverhaltens benötigten Daten erarbeitet. Diese umfasst die Erhebungsdaten, Netzdaten und Daten der Ortsveränderungen und diente den Projektpartnern als Grundlage für die Umsetzung der Versorgung mit Verkehrsdaten und dem Aufbau des Servers zur Archivierung der Ortsveränderungen der Probanden.

AP2 umfasst die empirische Datenerhebung, die neben der Kennzeichenerfassung und der GPS-Log-Befahrung auch eine Befragung von Probanden und Tests mit Probanden im Fahrsimulator beinhaltete.

Die Universität Stuttgart beteiligte sich an der Erweiterung des Kennzeichenerfassungssystems. Zur Erhöhung der Erfassungsqualität modellierte die Universität Stuttgart wichtige Hauptrouten, woraufhin zusätzliche Kamerastandorte festgelegt wurden.

Während der Planung der empirischen Erhebung mit GPS-Loggern und der Befragung erarbeitete die Universität Stuttgart die inhaltliche Ausgestaltung und technische Umsetzung der Online-Befragung und des Stated Preference Experiments bzgl. des Routenwahlverhaltens der Probanden.

Bei der technischen Umsetzung der Erfassung der Ortsveränderungen mit GPS-Loggern beteiligte sich die Universität Stuttgart mit einer Qualitätsanalyse der übertragenen Daten und der Entwicklung eines Mapmatching-Algorithmus‘.

Die Universität der Universität Stuttgart führte zusammen mit den Projektpartnern die erste Erhebungswelle vom 16.02.09 bis 03.05.09 durch.

Die Aufbereitung der Erhebungsdaten erfolgte in AP3. Neben der getrennten Behandlung der Datenpakete aus den verschiedenen Erhebungsmethoden des AP2 wurden die gesamten Daten auch mit der durch das Datenmodell des AP1 gewonnenen Referenzverkehrslage in Verbindung gesetzt. Durch diese Fusion wurde

die Voraussetzung geschaffen, dass der Einfluss der zu den unterschiedlichen Zeitpunkten vorliegenden Verkehrszuständen, Verkehrsinformationen und Schaltzuständen in der Auswertung des Routenwahlverhaltens berücksichtigt werden konnte.

Bei der Plausibilisierung der erhobenen GPS-Daten war die Universität Stuttgart verantwortlich für die Aufbereitung der Ortsveränderungen aus den GPS-Daten und Verknüpfung dieser Daten mit der Referenzverkehrslage und dem Informations-zustand.

Für die spätere Analyse der Potentiale von Verkehrsinformation erstellte die Universität Stuttgart ein Verkehrsmodell für den Untersuchungsraum mit stundenfeiner und wochentags abhängiger Verkehrsnachfrage.

In AP4 wurden Rückschlüsse zum Routenwahl- und Abfahrtszeitwahlverhalten aus den aufbereiteten Daten gezogen. Zur Analyse des Routenwahlverhaltens wurden die unterschiedlichen Routenwahlmöglichkeiten und die verschiedenen Charakteristika der Routen berücksichtigt und Zusammenhänge zu den Befolgungsgraden und den Wirkungen der Verkehrsbeeinflussungssysteme gezogen. Das Abfahrtszeitwahl-verhalten wurde im Hinblick auf die veränderte Bereitschaft zum Wechseln der üblichen Abfahrtszeit in Bezug auf Information über einen möglichen Reisezeitgewinn zu einer anderen Abfahrtszeit und der Sicherheit dieser Prognose untersucht.

Die Universität war in AP 4 verantwortlich für die Erstellung der Choice Sets. Hierzu wurde ein Verfahren zur Generierung alternativer Routen von einer Quelle zu einem Ziel implementiert. Alle Alternativrouten wurden daraufhin mit dynamischen Attributen der Verkehrslage- und Information versehen.

Desweiteren entwickelte die Universität Stuttgart einen Choice Set Generator zum automatisierten Generieren von nicht gewählten Alternativrouten für große Netze. Die gewonnenen Routenmengen wurden dann mit den beobachteten GPS-Routen und den in der Befragung genannten Routen zu einem personenbezogenen Choice Set fusioniert.

Zur Vorbereitung der Schätzung der Routenwahlmodelle machte die Universität Stuttgart erste statistische Auswertungen zur Signifikanz einzelner Attribute der Stated Preference Interviews.

Zur Schätzung der Routenwahl auf ANPR-Daten analysierte die Universität Stuttgart zusammen mit der TU München die Anzahl der wiedererkannten Fahrzeuge auf Kamerarouten im Untersuchungsraum.

Weiterhin wurde zur Ermittlung von Befolgungsgraden von Wechselwegweisern ein Experimental-Design erstellt und in Zusammenarbeit mit der TU München ANPR-Daten vom Autobahnkreuz Neufahrn zur Analyse aufbereitet.

Potenziale von Verkehrsbeeinflussungssystemen wurden in AP5 aufgezeigt. Die Ziele einer Verkehrsbeeinflussung, die aus Betreibersicht zum Teil anders geartet sind als die des einzelnen Verkehrsteilnehmers, wurden erläutert und Zielkonflikte erörtert. Durch Ermittlung von Leistungsreserven wurden die möglichen Handlungsspielräume bestimmt, wobei das theoretische Optimum, ein Zustand mit perfekter Information und der tatsächlich erreichte Zustand identifiziert und miteinander in Verhältnis gesetzt wurden.

Die Universität Stuttgart wirkte an der Entwicklung von Verkehrsbeeinflussungsstrategien für den Betrieb im Testfeld mit, um die Befolgungsgrade von Wechselwegweisungen mit und ohne strategiekonformem Routing analysieren und die Potentiale solcher Anlagen ermitteln zu können.

Alle geleisteten Arbeiten, erzielte Ergebnisse sowie verwendete Methoden werden in Kapitel 3 gegliedert nach den Arbeitspaketen beschrieben. An einzelnen Stellen wird dabei auf die Einzelberichte der anderen Projektpartner verwiesen.

Zur Ermittlung von Verkehrszuständen hat die Universität Stuttgart ein strategisches Verkehrsnetz für den Untersuchungsraum und tageszeitabhängige Kapazitäten von Einzelanlagen abgebildet.

Zur Untersuchung des Potentials von Abfahrtszeitwahl entwickelte die Universität Stuttgart eine Modellierungsmethodik, die in das makroskopische Modell integriert wurde.

Zur Ermittlung der Potentiale von Verkehrsbeeinflussungssystemen bezogen auf Kraftstoffverbrauch erstellte die Universität Stuttgart ein zeitabhängiges makroskopisches Emissionsmodell des Untersuchungsraums. Zusammen mit den Projektpartnern hat die Universität Stuttgart den Kraftstoffverbrauch von ausgewählten GPS-Trajektorien simuliert und verwendet diese mikroskopischen Ergebnisse derzeit um das makroskopische Emissionsmodell aufzuwerten.

Das AP6 umfasst die Folgerungen, die aus der Erhebung und Analyse des Routenwahlverhaltens sowie den Anforderungen an Informationen und Lenkungsmaßnahmen gestellt werden. Dabei wurden Handlungsempfehlungen entwickelt, die nicht nur die kollektiven und individuellen Beeinflussungssysteme getrennt berücksichtigen, sondern auch Hinweise zu einem abgestimmten kombinierten Einsatz erarbeitet.

Die Universität Stuttgart hat in AP6 gemeinsam mit den Projektpartnern Handlungsempfehlungen zum Einsatz von Verkehrsbeeinflussungssystemen entwickelt und die Abschlussveranstaltung organisiert und durchgeführt.

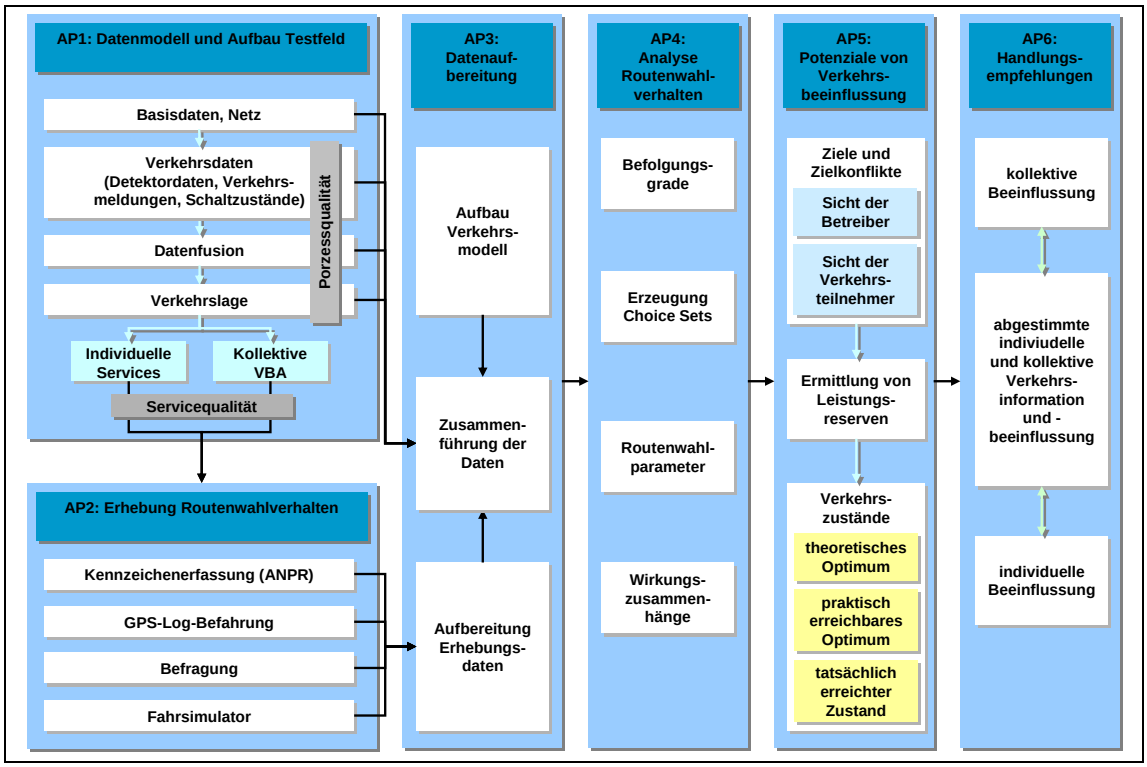


Bild 1: Aufbau und Zusammenhang der Arbeitspakete

1.2.3 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Forschungsvorhaben arbeiteten die sechs im Folgenden genannten Partner aus öffentlicher Hand, Privatwirtschaft und Forschung zusammen. Folgende Arbeitsteilung lag dem Projekt zugrunde:

- BMW: Gesamtprojektleitung, Begleitung der empirischen Erhebungen und Auswertungen, Bereitstellung von Messausrüstung, Durchführung von Untersuchungen mittels Fahrsimulator.
- PTV: Analyse und Bewertung des Netzzustands, Analyse und Bewertung individueller Verkehrsinformationen, Aufbau Demonstrator zur Generierung und Evaluation von Verkehrsinformationen, Aufbau eines Servers für die Befragung der Probanden, Stated Preference Experimente.
- Technische Universität Dresden: Analyse von Nutzen- und Bewertungsfunktionen für die Routen- und Abfahrtszeitwahl, Experimente mit ökonometrischen Entscheidungsmodellen, Validierung der Routenwahlergebnisse, Aufbereitung der Ergebnisse für die Anwendung in Verkehrsplanungsmodellen und Verkehrsleitsystemen.
- Technische Universität München: Erhebungen mit Kennzeichenerfassungssystemen, Datenprüfung- und Auswertung, Untersuchungen der Wirkungen von Verkehrsinformation und -beeinflussung.

- Universität Stuttgart: Konzeption und Durchführung der Erhebungen zur Routenwahl, Analyse und Bewertung der Routenwahl, Potenziale von Verkehrsbeeinflussungssystemen.
- Autobahndirektion Südbayern: Bereitstellung der Verkehrs- und Beeinflussungsdaten, Bereitstellung von Messausrüstung, Bewertung der Verkehrsstrategien.
- Gemeinsam: Entwicklung und Abstimmung der detaillierten Untersuchungsmethodik, Festlegung der Szenarien, Ableitung von Empfehlungen.

2 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Die Bewertung der Wirkungsermittlung von Verkehrsbeeinflussungssystemen gestaltet sich äußerst schwierig, da der Prozess von der Informationsgabe bis zur Routenwahl des Einzelnen von vielerlei Faktoren beeinflusst wird. Neben der Berücksichtigung der Art und der Qualität der Informationen, der gewählten Medien zur Informationsweitergabe, der Routenempfehlungen über Netzbeeinflussungsanlagen und der Übereinstimmung oder den Widersprüchen in diesen Aussagen, stellt vor allem die Erfassung und Abbildung der Routenentscheidung eine Herausforderung dar, da es ein von Dynamik und Stochastizität geprägter Vorgang ist.

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

Um dem Anliegen von *wiki* nachgehen zu können, wurde eine Erweiterung der Betrachtung auf ein gesamtes Netz notwendig. Aufgrund der noch offenen Fragen der Wirkung von kollektiven und individuellen Verkehrsbeeinflussungssystemen wurden folgende Anforderungen an das Projekt gestellt:

- Der Untersuchungsraum ist von einer beschränkten Strecken- oder Streckenzugbetrachtung auf eine netzweite Betrachtung zu erweitern.
- Um Hintergründe des Routenwahlverhaltens analysieren zu können, ist zunächst eine detaillierte Analyse des netzweiten Verkehrsgeschehens (Hauptrouten, Verlagerungen, Belastungsverteilung, etc.), aber auch eine Untersuchung der individuellen Motivations- und Entscheidungshintergründe notwendig.

Neben verkehrlichen Wirkungen von Verkehrsbeeinflussungssystemen sollten auch umweltbezogene Wirkungen analysiert und bei der Erarbeitung von Empfehlungen berücksichtigt werden.

Das Projekt *wiki* greift bereits gewonnene Erkenntnisse zur Routenwahl, zum Verkehrsablauf und zur Verkehrsbeeinflussung aus anderen Projekten auf. Insbesondere folgende Projekte lieferten wesentliche Grundlagen für *wiki*:

- arrive
  Werkzeuge und Prozesse für die notwendige Entwicklung von Strategien, Verfahren und Anlagen zur dynamischen Steuerung, für verlässliche Verkehrsinformationen und Konzepte für die Kooperation in der Region München.

- AKTIVE - Adaptive und Kooperative Technologien für den Intelligenten Verkehr
  Neue Fahrerassistenzsysteme, Informationstechnologien sowie Lösungen für ein effizientes Verkehrsmanagement und für die Fahrzeug-Fahrzeug- bzw. Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation.
- Dmotion
  Baulastträgerübergreifendes Strategiemanagementtool mit online Anwendung, welches unterschiedliche Steuerungsmaßnahmen vergleicht und in einem automatisierten Prozess zwischen den Zentralen konkrete Maßnahmen einleitet.
- Do-iT - Datenoptimierung für integrierte Telematik
  Verkehrsdatenerfassung durch Ortung von Mobilfunkgeräten (Floating Phone Data) zur Analyse der Routenwahlentscheidungen, jedoch ohne Informationen über den Verkehrsteilnehmer und Fahrtzweck.
- INVENT - Intelligenter Verkehr und nutzergerechte Technik
  Verknüpfung von Verkehrs-, Informations- und Kommunikationstechnologien für Assistenzsysteme, u. a. auch Berücksichtigung öffentlicher Verkehrslenkungs- und managementstrategien in individuellen Navigationssystemen.
- Differenzierte Bewertung der Qualitätsstufen im HBS im Bereich der Überlastung
  Einfluss von Überlastungen auf die Verkehrsqualität von einzelnen Verkehrsanlagen und Routen.
- Survive - Simulationsgestützte Untersuchung der individuellen Reaktion auf Verkehrsinformationen mit variierenden Entscheidungsgrundlagen:
  Empirisch gestützte Theorien über die Auswirkung von Verkehrsnachrichten auf das Verhalten der Verkehrsteilnehmer

3 Erzielte Ergebnisse

Das Kapitel 3 einhält die eingehende Beschreibung der Tätigkeiten und Ergebnisse der Universität Stuttgart. Im Einzelnen werden dabei folgende Punkte beleuchtet:

- Verwendung der Zuwendung
- Gegenüberstellung der erzielten Ergebnisse den vorgegebenen Ziele
- Wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises
- Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

3.1 Aufbau Datenplattform zur Erfassung der aktuellen Verkehrslage im Testgebiet München

Um die Wirkungszusammenhänge von Verkehrsbeeinflussung und Routenwahl sowie Abfahrtszeitwahl quantifizieren zu können, sind Informationen über die Verkehrslage zum Zeitpunkt der Entscheidung (z. B. Reisezeit auf Alternativrouten) und die Art, der Umfang und die Qualität von Verkehrsinformationen erforderlich.

Ziel des ersten Arbeitspakets ist es, eine Datenplattform zu erstellen, die alle relevanten Daten für das Testgebiet zusammenstellt und archiviert. Dieses Datenarchiv wird im AP3 dann zu einer einheitlichen Referenzverkehrslage aufbereitet. Die Universität Stuttgart unterstützte die Technische Universität München bei der Bestimmung der routenspezifischen Qualität der Verkehrsinformationen.

Um die Qualität der Verkehrsinformationen routenspezifisch zu bewerten, werden die dem Verkehrsteilnehmer zur Verfügung gestellten Verkehrslageinformationen mit den tatsächlichen Reisezeiten, die aus einer Kennzeichenerfassung per ANPR-Kameras verfügbar sind, verglichen.

In welcher Form die Verkehrslageinformationen dem Verkehrsteilnehmer vorliegen, per straßenseitigen Anzeigetafeln, per Verkehrsfunk, per RDS-TMC Meldung oder als Routenempfehlung per Navigation wird dabei nicht betrachtet. Die Verkehrslageinformation ist im Untersuchungsgebiet aus dem Verkehrsdatenarchiv der VIB (Verkehrsinfo Bayern) alle 15 Minuten aktuell verfügbar. Die Reisezeitprognosen basieren dabei auf dem Verfahren ASDA/FOTO. Eine ausführliche Beschreibung der Kurzzeitprognose der Verkehrslage auf Autobahnen findet sich im Schlussbericht der Technischen Universität München (vgl. Busch et al. [13]). Dabei werden auf Basis lokaler Detektordaten Staulängen und Reisezeiten identifiziert und anhand von typischen, empirisch beobachteten, räumlich-zeitlichen Verkehrsmustern prognostiziert (vgl. Kerner [25], Rehborn et al. [33]).

Die Reisezeitprognose wird anhand der Abweichung zu der tatsächlichen Reisezeit entlang des Routenabschnitts beurteilt. Diese Analyse betrachtet somit die Qualität von

Verkehrsinformation im Falle einer perfekten Übermittlung an die Verkehrsteilnehmer, ohne dabei die in der Praxis oftmals fehlende Aktualität der Meldungen zu bewerten. Die hierfür untersuchte Route umfasst einen Streckenabschnitt entlang der A9 zwischen dem Autobahnkreuzen Neufahrn und München-Nord in Fahrtrichtung München, siehe Bild 2 markiert in schwarz.

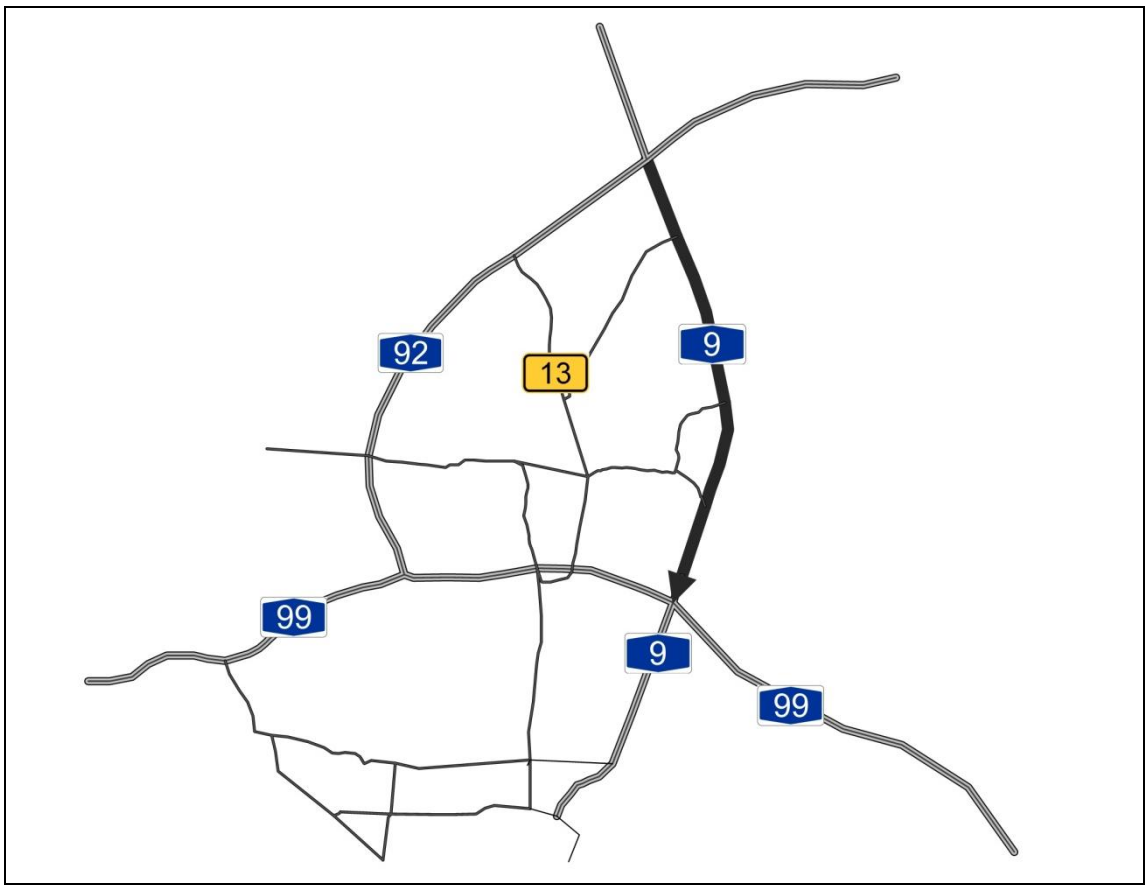


Bild 2: Route für Qualitätsanalyse der prognostizierten Reisezeit

Alle Messwerte der Reisezeit entlang der betrachteten Route innerhalb eines 5-Minuten-Intervalls werden über den gesamten Erhebungszeitraum mit den entsprechenden Reisezeiten aus der Kurzfristprognose verglichen. Bild 3 zeigt die relative Differenz der prognostizierten und gemessenen Reisezeit in Sekunden. Die Verteilung der Reisezeitdifferenz zeigt einige wenige Fehlerextrema der Reisezeitprognose. Prognostizierte Reisezeiten sind unter anderem zu gering, falls einer oder mehrere der lokalen Detektoren keine Eingangsdaten für ASDA/FOTO lieferten. Zu hohe prognostizierte Reisezeiten entstehen im Falle einer fälschlich detektierten Störung. Generell überschätzt die Reisezeitprognose die tatsächlichen Reisezeiten entlang der Route. In nur 38% aller untersuchten 5-Minuten-Intervalle ist die prognostizierte Reisezeit kleiner als die tatsächlich gemessene Reisezeit. Aus diesem Grund schneidet die Kurve der Reisezeitdifferenz die Y-Achse bei 0,38. Die Überschätzung der tatsächlichen Reisezeit ist dadurch bedingt, dass für den Großteil des analysierten Zeitraums geringe Belastungen bei freiem Verkehrsfluss detektiert

wurden. Im freien Verkehr konnte beobachtet werden, dass Fahrzeuge oftmals die zulässige Höchstgeschwindigkeit überschreiten. ASDA/FOTO prognostiziert in diesen Fällen dennoch Reisezeiten entsprechend freiem Verkehr gemäß der zugelassenen Höchstgeschwindigkeit. Die gestrichelten Linien zeigen das 90%-Perzentil bzw. das 95%-Perzentil der Reisezeitdifferenz aller 5-Minuten-Intervalle. In Summe weicht die prognostizierte Reisezeit in 95% aller Fälle nicht mehr als ±20% von der tatsächlich gemessenen Reisezeit ab.

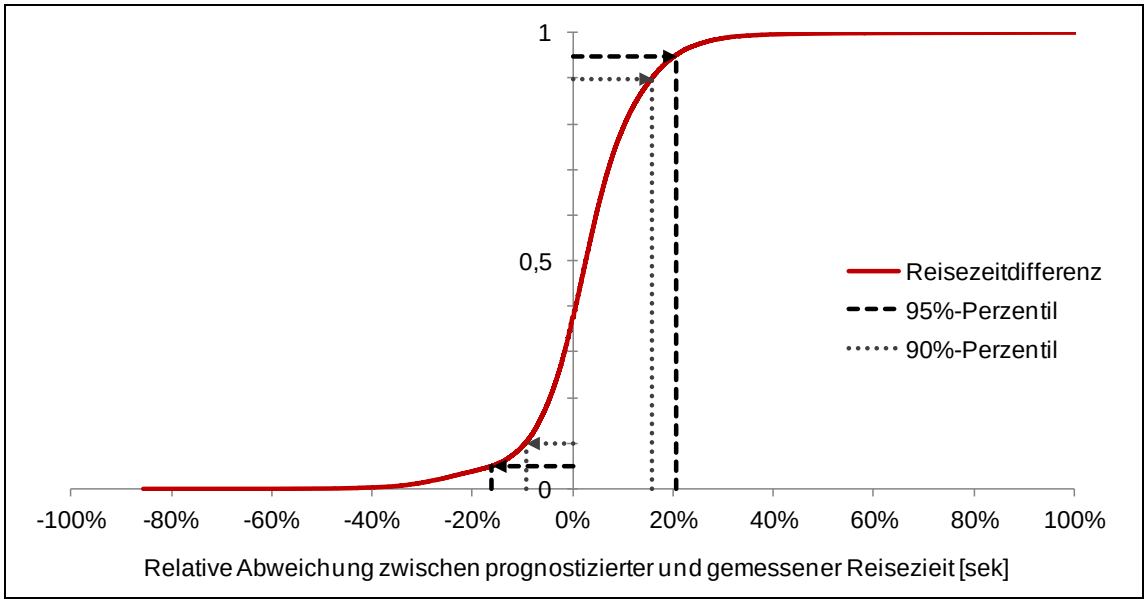


Bild 3: Verteilung der Differenz aus prognostizierter (ASDA/FOTO) und gemessener (ANPR) Reisezeit

Die analysierten Daten beinhalten Reisezeiten für einen Zeitraum von 41 Wochen von Februar bis November 2009 entlang einer Route mit 9,1 Kilometern Länge. Die untersuchte Stichprobe enthält Reisezeiten für insgesamt 52.000 5-Minuten-Intervalle.

Aufbauend auf der Qualitätsanalyse der zur Verfügung stehenden Reisezeitprognosen, lässt sich der theoretische Nutzen von Verkehrsinformation als die Reisezeitersparnis interpretieren, die sich im Vergleich zum heutigen Zustand erreichen liese, wenn alle Autofahrer auf allen ihrer Fahrten der empfohlenen Routen gefolgt wären.

Untersucht werden im Folgenden die Routenempfehlungen der *wiki*-Navigation während des gesamten Erhebungszeitraums. Die Reiseersparniszeit entlang der empfohlenen Route wird dabei als Differenz zu den entsprechenden Reisezeiten entlang folgender Alternativrouten betrachtet:

- Reisezeit entlang der aktuell schnellsten Route (ASR),
- aktuelle Reisezeit entlang der historisch schnellsten Route (HSR),
- Reisezeit entlang der vom Probanden für diese Fahrt gewählten Route (GR).

Tabelle 1 zeigt die Reisezeit, die die Fahrer gespart hätten, wenn sie der von der Navigation empfohlenen Route gefolgt wären, jeweils im Vergleich zur Reisezeit entlang der aktuell schnellsten Route (Zeile 1), der historisch schnellsten Route (Zeile 2), der tatsächlich gewählten Route (Zeile 3). Eine Reisezeitersparnis bei Fahrt entlang der von der Navigation empfohlenen Route wird dabei mit einem positiven Wert angeben. Eine Erhöhung der Reisezeit bei Fahrt entlang der empfohlenen Route im Vergleich zur jeweiligen Alternativroute wird mit negativem Wert ausgedrückt.

Tabelle 1: Reisezeitersparnis im Falle von Befolgung der Routenempfehlung per Navigation im Vergleich zu der aktuell schnellsten, der historisch schnellsten und der gewählten Route

	Reisezeitersparnis durch Routenempfehlung per Navigation						
im Vergleich zu	**Gesamt**	**Mittelwert**		**Max. Ersparnis**		**Max. Erhöhung**	
	[h]	**[min]**	**[%]**	**[min]**	**[%]**	**[min]**	**[%]**
ASR	-27,4	-2,2	-6,8	-	-	-26,1	-59,2
HSR	-13,8	-1,1	-3,2	81,6	58,9	-26,1	-59,2
GR	9,1	0,7	2,1	40,9	46,5	-26,1	-59,2

Das Routing der *wiki*-Navigation basiert auf historischen Reisezeiten und beinhaltet keine Routenempfehlungen auf aktuellen Reisezeiten. Daraus resultiert, dass die empfohlenen Routen im Mittel 2,2 Minuten langsamer sind als die jeweils aktuell schnellste Route von Quelle zum Ziel. Verglichen mit den aktuellen Reisezeiten der historisch schnellsten Routen sind die von der Navigation empfohlenen Routen im Mittel um 1,1 Minuten langsamer. Dennoch hätten die Fahrer im Mittel eine Reisezeitersparnis von 0,7 Minuten erlebt, wären sie den Routenempfehlungen gefolgt anstatt ihre gefahrene Route zu wählen.

Der objektive Nutzen, den Fahrer durch Nutzung von Navigation erzielen könnten, hängt weiterhin sowohl stark von der Einschätzung der Verlässlichkeit der heutigen Informationsmedien als auch der Verständlichkeit der Informationsinhalte an sich ab. Bild 4 zeigt die Einschätzung der Verlässlichkeit unterschiedlicher Informationsmedien, Quelle Online-Befragung. Die Mehrheit der Probanden schätzte die Verlässlichkeit von Verkehrsinformation als mittelmäßig ein. Eine deutliche Differenzierung zeigt sich dennoch zwischen einzelnen Informationsmedien. Verkehrsinformation über Onlineportale, über Verkehrsfunk als auch durch Navigationssysteme schätzten die Probanden deutlich verlässlicher ein als straßenseitige Information über Wechselwegweisung.

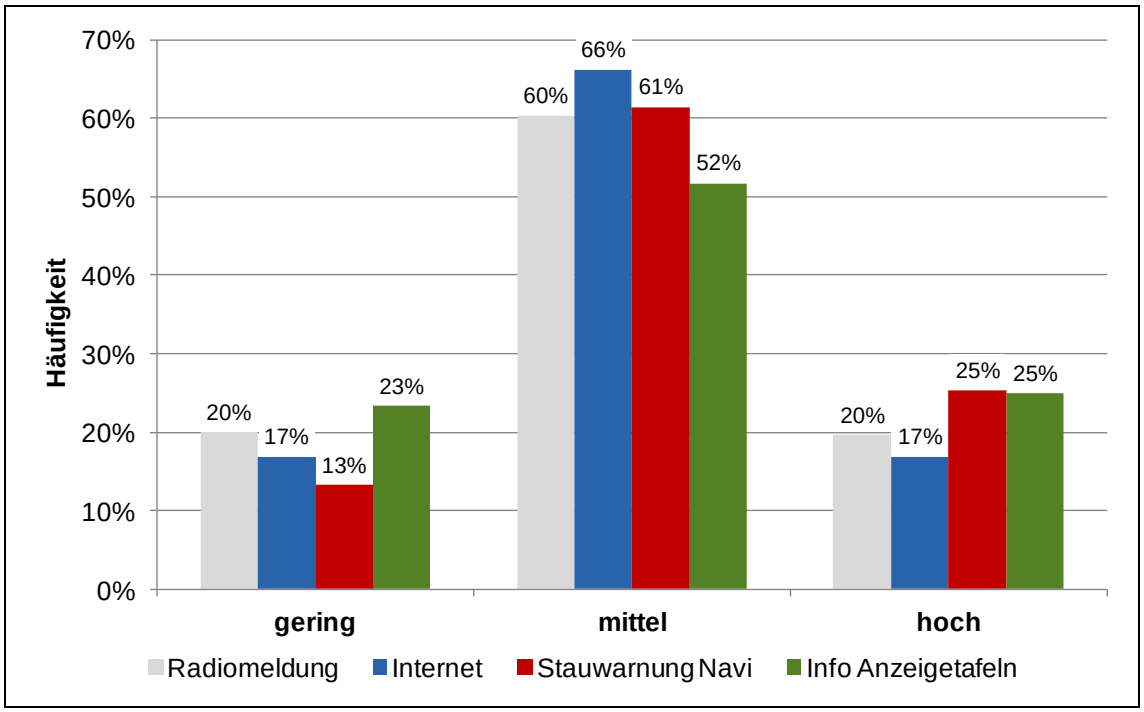


Bild 4: Einschätzung der Verlässlichkeit von Verkehrsinformationsmedien

Verkehrsinformation ist nutzlos, wenn die Inhalte der Information schwer zu interpretieren sind und somit zu Fehlentscheidungen des Autofahrers führen. Im Rahmen des im Projekt *wiki* durchgeführten Stated Preference Experiments, siehe Kapitel 3.2.2.3, wählten Probanden eine von vier vorgegebenen Alternativrouten auf ihrem morgendlichen Weg zur Arbeit. Dabei wurde die aktuelle Verkehrslage durch vier verschiedene Informationsmedien übermittelt (Radio, Level-of-Service-Karte (LOS), Wechselwegweisung (dWiSta), dynamische straßenseitige Reisezeittafel(dIRA)). In diesen hypothetischen Entscheidungssituationen war die Verkehrsinformation stets korrekt und gab eine direkte Routenempfehlung entlang der aktuell schnellsten Route (Wechselwegweisung) bzw. lieferte die aktuellen Reisezeiten und Staulängen auf allen Alternativrouten (Level-of-Service-Karte, Radio, Reisezeittafel). Somit kann aus den getroffenen Routenwahlentscheidungen neben den eigentlichen Einflussgrößen, wie Reisezeit und Routenlänge, auch die Verständlichkeit der einzelnen Informationsmedien abgeleitet werden. Bild 5 zeigt in wie vielen der jeweils 12 getroffenen Entscheidungssituationen die schnellste, die langsamste oder eine der anderen beiden Routen durch die Probanden gewählt wurde. Offensichtlich ist die Information über den aktuellen Verkehrszustand und damit die Reisezeit entlang der einzelnen Routen am leichtesten durch die Darstellung auf einer Level-of-Service-Karte verständlich. Bei Darstellung über dieses Medium wählten die Probanden in 58% der 12 Entscheidungssituationen die schnellste Route. Obwohl der Verkehrsfunk lediglich Informationen über die aktuelle Länge von Stau oder stockendem Verkehr bereitstellt, wählen die Probanden bei Information über dieses Medium in 48% der Fälle die schnellste Route. Die gute Verständlichkeit des Verkehrsfunks ist vermutlich mit dem großen Erfahrungswert der Probanden gegenüber diesem Medium zu begründen.

Verkehrsinformation über straßenseitige Beschilderung, wie Wechselwegweisung oder Reisezeittafeln, scheint hingegen deutlich schwerer verständlich.

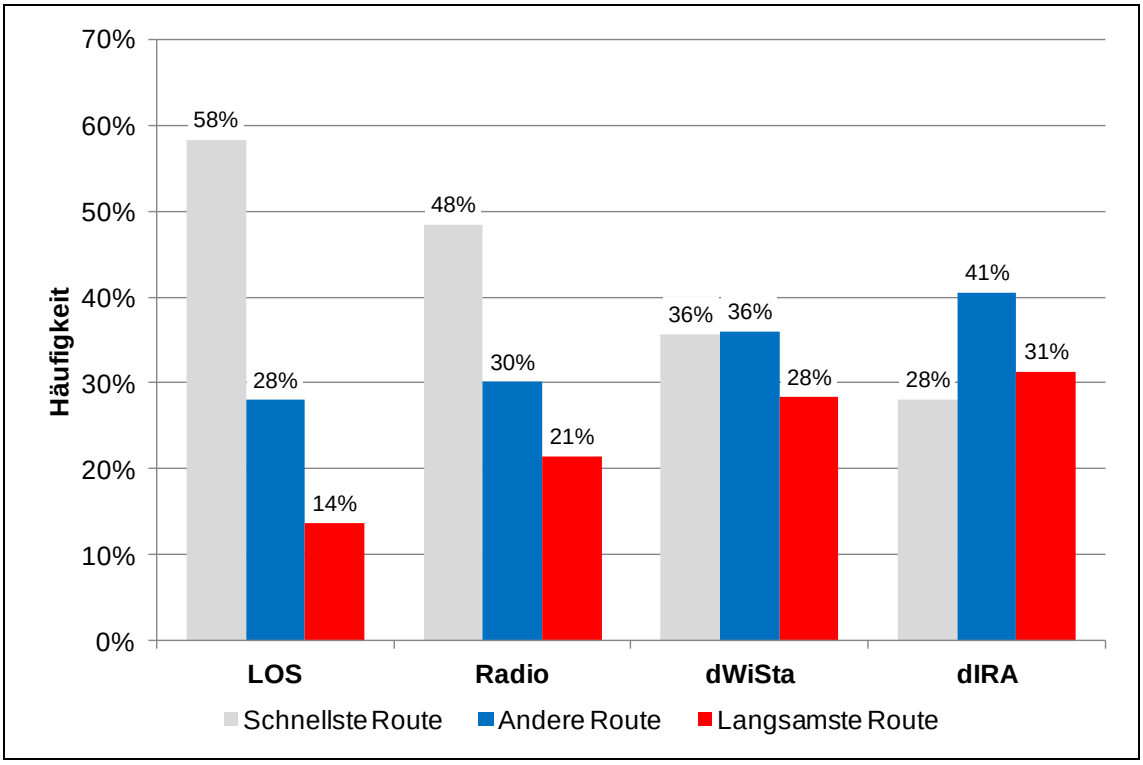


Bild 5: Routenwahl für unterschiedliche Informationsmedien aus 3.228 Entscheidungssituationen des Stated Preference Experiments

Es zeigt sich, dass einzelne Informationsmedien unterschiedlich gut geeignet sind um routenbezogene Verkehrsinformation verständlich an den Fahrer zu übermitteln. Befragungsergebnisse deuten an, dass Information durch mobile Endgeräte und Verkehrsfunk einen deutlich höheren Stellenwert haben als straßenseitige Vario-Tafeln.

3.2 Erfassung von Ortsveränderungen zur Analyse des Routen- und Abfahrtszeitwahlverhaltens

Um das Routenwahlverhalten der Verkehrsteilnehmer im Straßennetz analysieren zu können, sind idealerweise folgende Informationen für eine Ortsveränderung bekannt:

- Start- und Zielort mit Abfahrts- und Ankunftszeitpunkt,
- räumlicher Verlauf der Route als Folge von Knoten oder Strecken in einer digitalen Karte,
- zeitlicher Verlauf einer Route als Zeit-Weg-Diagramm,

- alternative Routen mit erwarteten Reisezeiten im Netz im Zeitraum der Fahrt, ggf. auch Routen mit anderen Verkehrsmitteln,
- netzweite Verkehrszustände im Zeitraum der Fahrt,
- netzweite Verkehrsmeldungen und Schaltzustände von kollektiven Verkehrsbeeinflussungsanlagen im Zeitraum der Fahrt,
- Kenntnis, ob der Verkehrsteilnehmer ein Navigationssystem mit aktuellen Verkehrsmeldungen benutzt hat,
- erlebte Erkennungsrate und Fehlalarmrate der Verkehrsmeldungen gegenüber tatsächlichen Störungen,
- Eigenschaften des Verkehrsteilnehmers (Ortskenntnis, fährt Relation regelmäßig).

Um Verfälschungen in der Routenanalyse zu vermeiden, ist es wünschenswert, die Verkehrsteilnehmer „verdeckt“ beobachten zu können, d. h. es ist anzustreben, dass die Verkehrsteilnehmer nicht über den genauen Untersuchungszweck informiert sind.

Diesen Anforderungen einer Routenanalyse stehen die realisierbaren Erhebungsmöglichkeiten gegenüber. Ziel dieses AP ist es, die für eine Routenanalyse erforderlichen Daten möglichst umfassend zu erheben und eine möglichst große Zahl von Beobachtungen zu erzielen. Daher werden verschiedene Erhebungsmethoden kombiniert:

- Beobachtung von Fahrzeugen mittels lokaler Kennzeichenerfassung
- Beobachtung von Routenwahl im gesamten Straßennetz mit GPS Loggern
- Befragung von Verkehrsteilnehmern über ihre Routenkenntnis und -wahl
- Untersuchungen mittels eines Fahrsimulators

Durch strategisch sinnvolle Platzierung der Erfassungseinrichtungen bzw. durch eine statistisch abgesicherte Auswahl an Probanden lässt sich für die zu untersuchenden Eigenschaften des Fahrerverhaltens mit vertretbarem Aufwand ein ausreichender Stichprobenumfang sicherstellen. Damit wird eine umfassende Datenbasis zur Analyse und Bewertung der Routenwahl ermittelt, die sowohl die objektiv messbaren Verkehrsverhältnisse umfasst, als auch die subjektiven Entscheidungsgründe der Routenwahl beinhaltet.

Um dieses Ziel zu erreichen, werden Daten aus verschiedenen Erhebungen zusammengeführt. Jede Erhebungsmethode hat Vor- und Nachteile, die durch die spätere Datenzusammenführung optimiert werden.

Die Universität Stuttgart war an folgenden Aufgaben beteiligt:

- Rekrutierung von Probanden (Unterstützung PTV)

- Erstellung des ersten Fragebogens zur Erhebung soziodemographischer und mobilitätsrelevanter Merkmale (verantwortlich)
- Erstellung des Stated Preference Experiments zur Routenwahl (verantwortlich)
- Erstellung des Fragebogens zur Routenkenntnis und des Stated Preference Experiments zur Abfahrtszeitwahl (Unterstützung PTV)
- Durchführung eines Pretest (Unterstützung PTV)
- Betreuung der Probanden während der Erhebungsphase (Auslesen der aufgezeichneten Daten aus den Geräten, Fragen der Handhabung, etc.)
- Organisation der Befragung

3.2.1 Erhebungsdesign für die Erfassung des Routenwahl- und Abfahrtszeitwahlverhaltens

Zur Erhebung des Routenwahl- und Abfahrtszeitwahlverhaltens wird eine kombinierte Erhebungsmethode aus Beobachtungen der tatsächlichen Routen- und Abfahrtszeitwahl (Revealed Preference (RP)) und Befragungen zu hypothetischen Entscheidungssituationen (Stated Preference (SP)) durchgeführt (vgl. Axhausen et al. [1]). Beide Ansätze weisen methodisch bedingte Vor- und Nachteile auf und können durch eine Kombination optimiert verwendet werden. Die RP-Methode liefert eine unbeeinflusste Beobachtung des Verkehrsteilnehmers. Jedoch besteht zum einen das Problem, dass nur Informationen über tatsächlich gewählte Alternativen erhoben werden. Informationen über nicht gewählte Alternativen fehlen später bei der Betrachtung aller möglicher Alternativen (gewählt und nicht gewählt) für die Schätzung des Routenwahlmodells. Zum anderen korrelieren einzelne Variablen (z. B. Reisezeit, Länge etc.) häufig in realen Entscheidungssituationen, so dass der Einfluss der Variablen nicht isoliert werden kann. Dahingegen bietet die SP-Methode die Möglichkeit, innerhalb einer hypothetischen Entscheidungssituation einen definierten Alternativensatz (Choice Set) mit unterschiedlichen Ausprägungen der einzelnen Variablen vorzugeben. Die Wahlentscheidung des Teilnehmers ist jedoch stark von der Wahl der Ausprägungen der Variablen und gegebenen Alternativen abhängig. Um den Befragten die Abstraktion auf die hypothetische Entscheidungssituation zu erleichtern, sollte sie sich daher nah an der erlebten Realität des Probanden orientieren (vgl. Axhausen [3]).

Um zusätzliche personenspezifische Informationen von den Probanden zu erhalten, werden darüber hinaus eine Online-Befragung und ein persönliches Interview zur Routenkenntnis durchgeführt.

Bei der RP-Erhebung wird ein ausgewähltes Kollektiv von 300 Probanden mit speziellen Erhebungsgeräten (Smartphone mit GPS) ausgestattet, die ihre

Ortsveränderungen von Start bis Ziel mit Hilfe von GPS protokollierten. Um die Zahl der erforderlichen Erhebungsgeräte zu reduzieren, erfolgt die Erhebung in drei Wellen mit je 100 Probanden. Die Dauer einer Erhebungswelle beträgt inklusive Befragung, Schulung und Feldphase ca. 10 Wochen (vgl. Bild 6).

Ein Pretest mit zehn Personen, in dem Einführungsveranstaltung, Gerätehandling, Datenübermittlung (über ein bis zwei Wochen) und SP-Interviews auf Funktionsfähigkeit geprüft wurden, erfolgte im Oktober 2008. Die drei Haupterhebungswellen begannen Mitte Februar 2009 und wurden Mitte November 2009 beendet. Aufgrund der Erfahrungen im Pretest erstellte die Universität Stuttgart einen Online-Fragebogen zur Erfassung der personenbezogenen Daten, um die Dauer der Einführungsveranstaltung von ca. 60 auf 30 Minuten zu reduzieren. Darüber hinaus erfolgten letzte Anpassungen des SP-Experiments zur Routenwahl um im Pretest beobachtete Verständnisschwierigkeiten zu vermeiden.

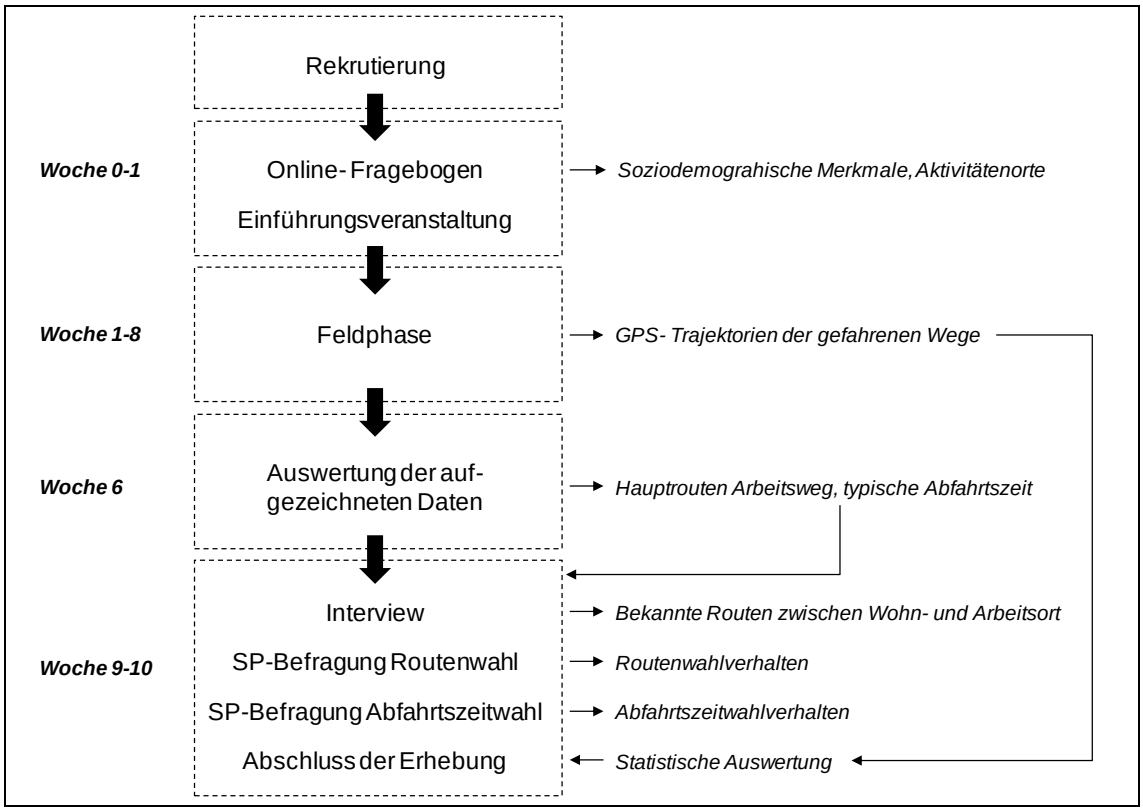


Bild 6: Ablauf einer Erhebungswelle

Als Probanden wurden Berufspendler rekrutiert, die im nördlichen Münchner Umland wohnen und ihren Arbeitssitz im Norden der Stadt München haben, den sie mindestens dreimal wöchentlich mit dem Pkw anfahren (vgl. Koller-Matschke et al. [26]). Damit konnte sichergestellt werden, dass jeder Proband ähnlichen und vertrauten Bedingungen ausgesetzt war und mehrere Routenalternativen auf dem Autobahnnetz (A9, A92), auf Bundesstraßen (B13) und auf weiteren Routen im untergeordneten Netz zur Verfügung hatte. Die Kontaktaufnahme zu den Probanden erfolgte nach Prüfung

der Eignung per Email mit einer kurzen Erklärung des Projektes. Nach Zusage wurden die Login-Daten für das Online-Portal zum Ausfüllen des Online-Fragebogens sowie die Einladung zur Einführungsveranstaltung versendet.

Die 30 minütige Einführungsveranstaltung beinhaltete zum einen grundsätzliche Informationen zum Hintergrund der Studie mit einer Motivationsphase („Wir brauchen SIE als Qualitätsscout im Verkehr!“). Des Weiteren wurden alle Anwesenden im Umgang mit den Geräten unterwiesen sowie Formalia wie Verteilung von Teilnahmevereinbarung, Datenschutzerklärung und Checklisten abgewickelt. Die Veranstaltung wurde jeweils von einem Mitarbeiter der PTV AG und abwechselnd von einem Mitarbeiter von BMW AG bzw. der Universität Stuttgart durchgeführt.

Für die sich anschließende achtwöchige Feldphase wurden die Probanden mit einem Smartphone und einem externen GPS-Empfänger ausgestattet, die im Pkw mitzuführen waren. Auf diese Weise konnten die mit dem Pkw durchgeführten Wege erfasst und dem Probanden individuelle Verkehrsinformationen durch eine strategiekonforme Navigation, Verkehrslagedaten (Level-of-Service-Karte) und Verkehrsmeldungen bereit gestellt werden. Die aufgezeichneten Trajektorien wurden im Fünf-Minuten-Zyklus über GSM/GPRS als Floating Car Daten (FCD) zunächst an eine Zentrale übertragen und anschließend per Email an die PTV AG gesendet. Der Abruf aktueller Verkehrsinformation (Navigation oder Level-of-Service-Karte) durch den Fahrer wurde ebenfalls protokolliert. Während der Erhebungsphase wurde bei der PTV AG täglich die Lieferung der Tracking-Daten überprüft. Bei technischen Störungen standen den Probanden eine kostenlose Hotline und eine Emailadresse zur Verfügung (vgl. Snethlage et al. [41]).

Im Anschluss an die Aufzeichnungsphase erfolgten das etwa halbstündige Interview zur Routenkenntnis und die SP-Befragungen zur Routen- und Abfahrtszeitwahl am Arbeitsplatz des Probanden oder in bereitgestellten Schulungsräumen. Zum Abschluss der Erhebung bekam jeder Proband einen persönlichen Datenbericht seiner GPS-Daten als Dankeschön für die Teilnahme, der von der Universität Stuttgart erstellt wurde. Die Datenberichte enthalten eine statistische Übersicht der erfassten Daten, eine detaillierte Aufbereitung der Arbeitswege und einen Vergleich der Verkehrsqualität der persönlichen Wege mit der Verkehrsqualität des Probandenkollektivs. Ein kompletter Datenbericht für einen ausgewählten Probanden findet sich im Anhang Kapitel 11.3. Zusätzlich konnte jeder Teilnehmer im Vorfeld an einer Verlosung von 65 BMW Fahrertrainings teilnehmen. Den Gewinnern wurden die Gutscheine im Anschluss an die Befragung überreicht.

Insgesamt konnten 278 Teilnehmer für die Erhebung gewonnen werden. Während der Feldphase konnten die Pkw-Wege der Probanden als GPS-Trajektorien (vgl. Tabelle 2) und die Nutzung bereitgestellter individueller Verkehrsinformation (vgl. Bild 7) erhoben werden. Bild 7 zeigt hierbei die Anzahl der Routenanfragen über den bereitgestellten Navigationsdienst pro Tag auf der linken horizontalen Achse und die Anzahl der LOS-

Karten-Abrufe auf der rechten horizontalen Achse im Diagramm. Die Anzahl der LOS-Kartenabrufe ist hierbei als Aktivitätsindex zu interpretieren, da bei Nutzung der LOS-Karten-Darstellung während einer Fahrt jede Aktualisierung des Bild- bzw. Kartenausschnitts als Abruf gezählt wurde. Über alle Teilnehmer wurden darüber hinaus zusätzliche Informationen innerhalb der im Folgenden beschriebenen Befragungen ermittelt.

Tabelle 2: Erfasstes GPS-Datenvolumen

Statistik der erfassten GPS-Tracks (nach Map-Matching)						
Welle	**Anzahl Trajektorien**	**Anzahl Dateien leer**	**Anzahl GPS-Punkte**	**erfasste Zeit [h]**	**Erfasste Länge [km]**	**Anzahl Probanden**
1	7.088	158	10.791.563	3.790	261.170	94
2	5.906	176	8.651.745	3.218	226.602	95
3	6.578	120	10.348.261	3.755	262.148	89
Gesamt	19.572	454	29.791.569	10.764	749.920.825	278

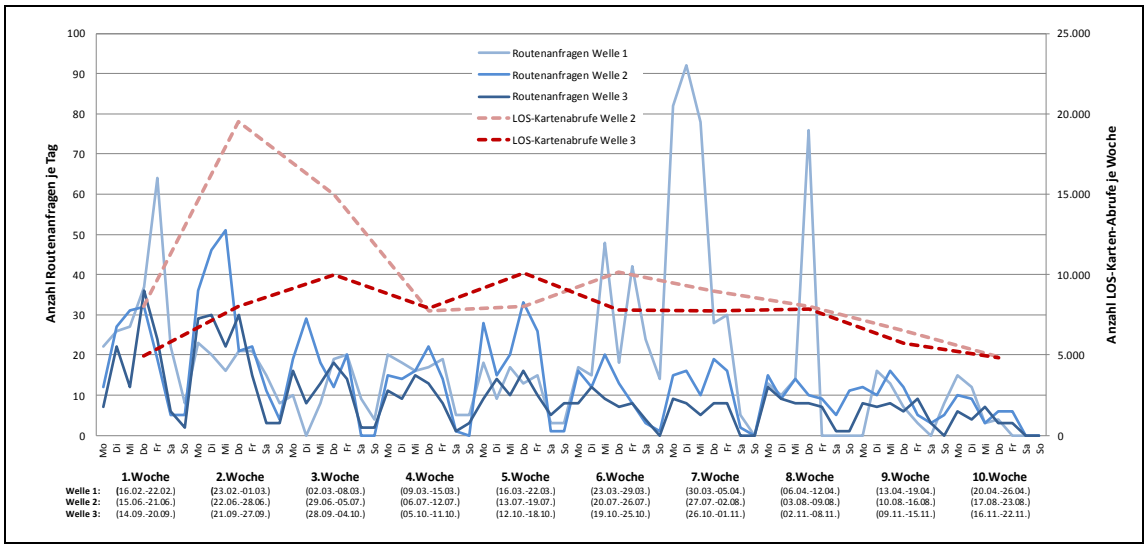


Bild 7: Routenanfragen und Abrufe der LOS-Karte während der Feldphase

3.2.2 Befragung der Teilnehmer

3.2.2.1 Online-Befragung

Im Vorfeld der Feldphase der Erhebung wurde eine Befragung der Probanden zu sozio-demographischen, -ökonomischen und mobilitätsrelevanten Merkmalen als auch dem normativen Umfeld durchgeführt. Die sozio-demographischen und -ökonomischen Merkmale geben Aufschluss über die teilnehmenden Personengruppen. Mobilitätsrelevante Merkmale geben Aufschluss über die Art der erfassten

Wegemenge. Das normative Umfeld liefert wichtige Variablen für eine spätere Schätzung der Routenwahl, da persönliche Präferenzen vor allem in Bezug auf die Nutzung und Bewertung von Verkehrsinformation zu erwarten sind. Zur späteren Aufbereitung der beobachteten GPS-Trajektorien wurden zudem regelmäßig aufgesuchte Aktivitätenorte abgefragt. Tabelle 3 zeigt einen Überblick über die erfragten Attribute.

Um die Probanden zeitlich möglichst wenig zu beanspruchen, wurde ein Fragebogen entwickelt, der online ausgefüllt werden kann. Mit einem anonymisierten Benutzernamen und Passwort war es den Probanden somit möglich, sich am eigenen Computer nach jeweiliger zeitlicher Verfügbarkeit einzuloggen und den Fragebogen auszufüllen. Falls der Proband den Fragebogen nicht am Stück bis zu Ende ausfüllen wollte, war ein Speichern der eingegebenen Daten und erneutes Einloggen zu einem späteren Zeitpunkt möglich.

Aus Gründen des Datenschutzes enthalten die online erhobenen Daten keinerlei persönliche Informationen (wie Name, Wohnort etc.). Die Zuordnung der jeweiligen Person zu dem entsprechenden Fragebogen und Smartphone erfolgte über eine anonyme Personen-ID. Die zur technischen Betreuung und zur Vereinbarung eines Abschlusstermins zur Geräterückgabe und SP- Befragung benötigten Kontaktdaten der Probanden, wurden gesondert vor Ort in einer Einführungsveranstaltung erfragt. Alle persönlichen Daten wurden nach Ablauf der achtwöchigen Feldphase gelöscht.

Tabelle 3: Erfragte Attribute

Sozio-demographische und -ökonomische Merkmale	
Anzahl fahrbereiter Fahrzeuge im Haushalt:	• Pkw • Fahrräder • Motorräder, Mofas, Mopeds
Personen im Haushalt:	• Geschlecht • Geburtsjahr • Führerschein • Zeitkarte für den öffentlichen Verkehr
Art der Berufstätigkeit:	• vollzeitbeschäftigt • teilzeitbeschäftigt • geringfügig beschäftigt
Arbeitszeiten:	• feste Arbeitszeiten • Wechselschicht • flexible Arbeitszeiten
Stellung im Beruf:	• Arbeiter/in • Angestellter/in • Leitende/r Angestellte/r • Beamte/r • Selbstständige/r

Mobilitätsrelevante Merkmale	
Pkw-Verfügbarkeit:	• Ja, zur alleinigen Verfügung • Ja, nach Absprache • Nein
Besitz von ÖV-Zeitkarte:	• immer • eingeschränkt • nie
Pkw-Fahrleistung:	• < 5.000 km • < 10.000 km • < 15.000 km • < 20.000 km • < 25.000 km • > 25.000 km
Übliches Verkehrsmittel zur Arbeit:	• eigener Pkw • Pkw-Fahrgemeinschaft • Park & Ride • Bike & Ride • Öffentliche Verkehrsmittel • Motorrad • Fahrrad • Zu Fuß • Sonstiges, und zwar
Navigationsgerät im Pkw:	• keines • mobiles • festeingebaut
Nutzung der Navigation für Fahrten zur Arbeit:	• Zielführung • Verkehrsinformation • Sonstiges, und zwar • keine Nutzung
Nutzung der Navigation für Fahrten zum Einkauf:	• Zielführung • Verkehrsinformation • Sonstiges, und zwar • keine Nutzung
Nutzung der Navigation für Fahrten der alltäglichen Freizeit:	• Zielführung • Verkehrsinformation • Sonstiges, und zwar • keine Nutzung
Nutzung der Navigation für Fahrten im Urlaub:	• Zielführung • Verkehrsinformation • Sonstiges, und zwar • keine Nutzung
Dauer des Arbeitswegs morgens:	• Angabe minimal • Angabe maximal • Angabe durchschnittlich
Dauer des Arbeitswegs abends:	• Angabe minimal • Angabe maximal • Angabe durchschnittlich
Anzahl Tage pro Woche mit längerer Dauer Arbeitsweg	• Angabe zur Arbeit • Angabe von der Arbeit • Angabe durchschnittlicher Zeitverlust

Normatives Umfeld	
Verhalten bei Stau auf zweistreifiger Autobahn	• Verbleiben auf Fahrstreifen auf dem man angekommen ist • Wechseln auf den linken Fahrstreifen • Wechseln auf den rechten Fahrstreifen • Mehrmaliges Wechseln
Wichtigkeit einzelner Störungen auf Arbeitsweg:	• Unkenntnis über Ankunftszeit • Unkenntnis über beste Route • Parkplatzsuche am Ziel • Halten an roten Ampeln • Zeitverlust durch Stau • Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer
Weitere persönliche Präferenzen:	• Informationen über die Stauursache • Wissen, über Staudauer • kein Vordrängeln anderer • Information über Alternativrouten
Nutzung von Verkehrsinformation auf dem Arbeitsweg	• keine Nutzung • Verkehrsfunk • Navigationsgeräts • Internet
Beurteilung Verlässlichkeit von Radiomeldungen	• gering • mittel • hoch
Beurteilung Verlässlichkeit von Internetinformation	• gering • mittel • hoch
Beurteilung Verlässlichkeit von Stauwarnung per Navigation	• gering • mittel • hoch
Beurteilung Verlässlichkeit von straßenseitiger Information	• gering • mittel • hoch
Anzahl Freizeitveranstaltungen mit fester Uhrzeit	• morgens • mittags • abends
Anzahl Freizeitveranstaltungen mit flexibler Uhrzeit	• morgens • mittags • abends
Tage pro Woche mit Aktivität Kinder bringen/holen	• morgens • abends
Regelmäßige Aktivitätenorte	
Maximal Angabe von acht Zielen	• Ortsname • Postleitzahl • Straße • Hausnummer • Bezeichnung • Häufigkeit • Fahrtzweck • typische Uhrzeit • typische Dauer • häufigstes Verkehrsmittel

Einen besseren Einblick in die Gestaltung des Online-Fragebogens liefern Screenshots der eigens gemieteten Domain http://wiki-verkehrsstudie.de im Anhang Kapitel 11.1. Die Mietdauer der Web-Datenbank lief von 20.1.2009 bis 20.1.2010 und ermöglichte die Nutzung einer werbefreien Domain für Datenhaltung im Webspace bis 50 MB. Das Angebot, den Fragebogen online auszufüllen; wurde von 99 % der Probanden angenommen, so dass der Zeitaufwand für die Einführungsveranstaltung im Vergleich zum Pretest von 60 Minuten auf 30 Minuten halbiert werden konnte.

3.2.2.2 Interview zur Routenkenntnis

Im Anschluss an die achtwöchige Feldphase wurde durch die PTV AG eine SP-Befragung zu Routenkenntnis und -wahl und Abfahrtszeitwahl durchgeführt. Das Zielfder ergänzenden Befragungen zur Routenkenntnis war es, Informationen über die Anzahl der bekannten alternativen Routen für den morgendlichen Arbeitsweg zu erfragen, um für die spätere Generierung des Alternativensatzes einen Anhaltspunkt für eine realistische Größe des Choice Sets zugrunde legen zu können. Um die Routenverläufe der bekannten Routen zu erfassen, wurde eine interaktive digitale Karte verwendet, in der der Proband einzelne Strecken der Route mit der Maus markieren konnte (vgl. Snethlage et al. [41]).

Zusätzlich wurde vom Probanden die Kenntnis von diversen Attributen der genannten Routen (Häufigkeit der Befahrung, Länge, Fahrtdauer, Anzahl LSA), der Grund für die Hauptroutenwahl und mögliche Gründen für den Wechsel auf eine Alternativroute abgefragt. Hierfür lieferte die Universität Stuttgart das inhaltliche Konzept.

3.2.2.3 Stated Preference Befragung zur Routenwahl

Die SP-Befragung zur Routenwahl verfolgte vor allem das Ziel, den Einfluss von Verkehrsinformation auf das Routenwahlverhalten zu ermitteln. Dieser lässt sich für die beobachteten Wege der GPS-Erhebung zwar aus dem umfangreichen Datenarchiv individueller und kollektiver Verkehrsinformation ableiten, der Einfluss der einzelnen Informationsmedien (z. B. Verkehrsfunk, dWiSta-Tafel, Navigation etc.) lässt sich aber nicht isoliert schätzen. Aus diesem Grund wurde eine SP-Befragung entwickelt, die den Probanden mit einer Entscheidungssituation konfrontiert, in der er bei gegebenem Verkehrszustand durch ein bestimmtes Informationsmedium informiert wird und zwischen einer vorgegebenen Auswahl an Routen wählen kann. Ähnliche Untersuchungen, wie zum Beispiel von Wardman et al. [46], bestätigen die Annahme, dass der Einfluss von Verkehrsinformation stark von der Art der Anzeige abhängt. Jedoch beschäftigt sich Wardman in seiner SP-Befragung lediglich mit dem Informationsmedium dWiSta-Tafel. Eine dem Projekt *wiki* ähnliche Untersuchung von Tsavachidis [44] beschäftigt sich ebenfalls mit der Analyse des Routenwahlverhaltens

von Berufspendlern am Beispiel des Autobahnkreuzes Neufahrn im Münchner Norden. Tsavachidis vergleicht dabei im Rahmen des BMBF Projekts MOBINET erhobene Fahrtenbücher (vgl. Tsavachidis et al. [45]) und ergänzende SP-Befragungen und zeigt, dass der Einfluss der von ihr untersuchten Informationsmedien Wechselwegweisung, Verkehrsfunk und Streckenbeeinflussungsanlage auf die Wahl einer der beiden Alternativen A9 und A92 stark vom aktuellen Verkehrszustand abhängt.

Aufbauend auf diesen Untersuchungen wurde im Projekt *wiki* im Besonderen darauf geachtet, dass die in der SP-Befragung zur Wahl stehenden Routen und Verkehrszustände einer täglich erlebten Situation entsprechen und dass die Darstellung der Verkehrsinformation sowohl die vom Fahrer derzeit genutzten als auch zukünftig denkbaren Informationsmedien umfasst. Der Aufbau und die Ausprägungen der einzelnen Entscheidungssituationen werden im Folgenden näher erläutert.

Tabelle 4: Entscheidungssituationen für Routenwahl

Situation	**Verkehrszustand**		**Informationsmedium**	
	Nr.	**Beschreibung**	**Nr.**	**Beschreibung**
1	1	Leichte Störung auf Hauptroute	1	Verkehrslagedarstellung
2	2	Störung auf Hauptroute und erster Alternativroute	2	Verkehrsfunk
3	3	Störung auf Hauptroute und zweiter Alternativroute	3	dWiSta-Tafel
4	1	Leichte Störung auf Hauptroute	4	Reisezeit-Tafel
5	2	Störung auf Hauptroute und erster Alternativroute	1	Verkehrslagedarstellung
6	3	Störung auf Hauptroute und zweiter Alternativroute	2	Verkehrsfunk
7	1	Leichte Störung auf Hauptroute	3	dWiSta-Tafel
8	2	Störung auf Hauptroute und erster Alternativroute	4	Reisezeit-Tafel
9	3	Störung auf Hauptroute und zweiter Alternativroute	1	Verkehrslagedarstellung
10	1	Leichte Störung auf Hauptroute	2	Verkehrsfunk
11	2	Störung auf Hauptroute und erster Alternativroute	3	dWiSta-Tafel
12	3	Störung auf Hauptroute und zweiter Alternativroute	4	Reisezeit-Tafel

Die SP-Befragung zur Routenwahl umfasst zwölf Entscheidungssituationen, siehe Tabelle 4. Eine Entscheidungssituation ist definiert durch einen Verkehrszustand und ein Informationsmedium. Es werden drei verschiedene Verkehrszustände durch jeweils vier verschiedene Medien dargestellt. Der Proband hat stets die Wahl zwischen denselben vier Routen. Die Reihenfolge der Entscheidungssituationen wird dabei zufällig variiert.

Die Befragung fand als computergestütztes Einzelinterview statt. Der Proband wurde dabei vom Interviewer zunächst in die grundlegende Situation eingewiesen. Anhand einer graphischen Übersicht wurde der Proband gebeten, sich vorzustellen, er befände sich auf seinem morgendlichen Weg zur Arbeit und fahre gerade auf das Autobahnkreuz Neufahrn zu (siehe Bild 8). Bei den einzelnen Entscheidungssituationen wurde der Proband allerdings nicht unterstützt, um die

Entscheidung nicht zu beeinflussen. Bild 9 zeigt die graphische Darstellung beispielhaft für eine der zwölf Entscheidungssituationen des Interviews. Der Proband musste dabei eine der vier gegebenen Routen wählen, in dem er mit der Maus auf das entsprechende Feld klickte. Im Anhang Kapitel 11.2 finden sich alle zwölf Entscheidungssituationen des Interviews.

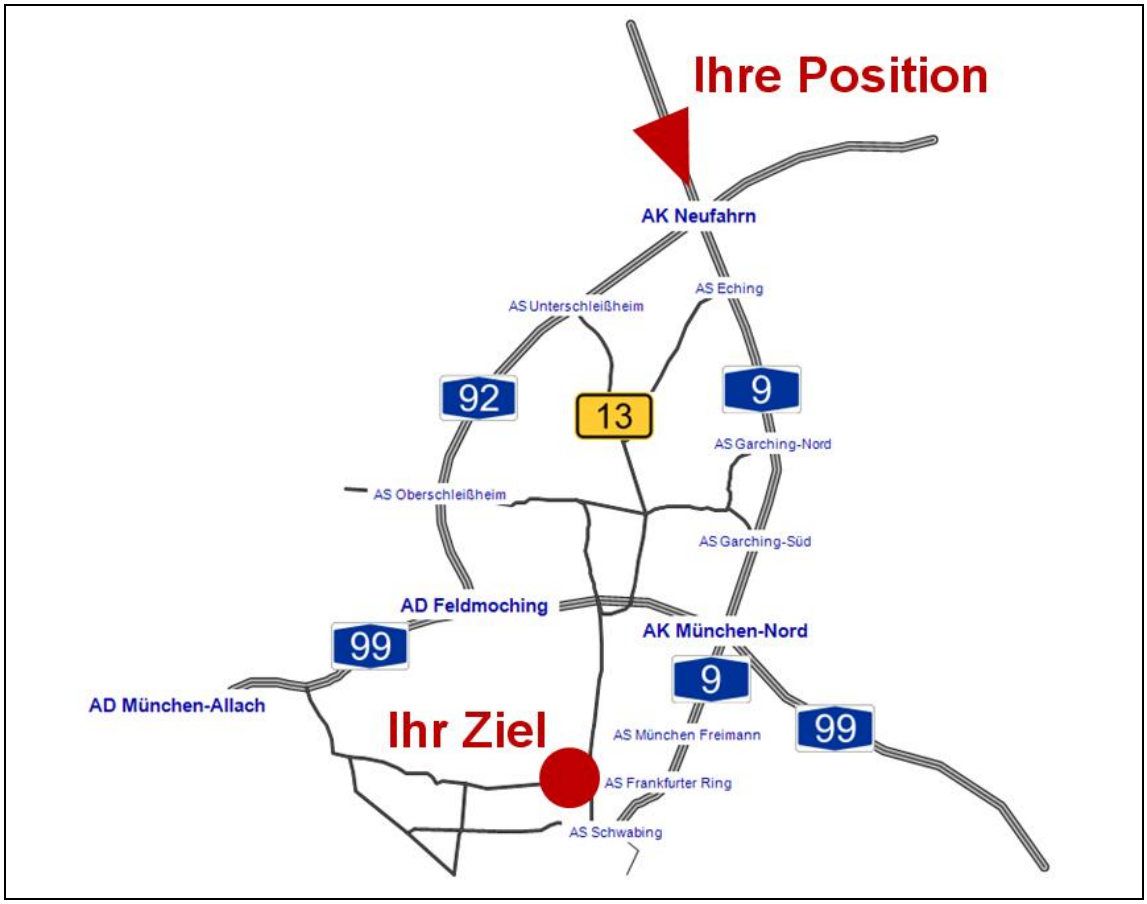


Bild 8: Übersicht über Entscheidungssituation Routenwahl

Auswahl der Routen

Die Auswahl dieser Routen erfolgt anhand einer Auswertung der in Summe von allen Probanden am häufigsten gewählten Routen während des Pretests. Weitere Kriterien für die Auswahl des Choice Sets, neben der absoluten Häufigkeit der Routen, sind

- eine überschaubare Anzahl an Routen,
- großräumig Unterschiede der Routen (geringe Ähnlichkeit),
- weitestgehend unabhängiger Verlauf (so dass die Verkehrszustände auf den Routen sich nicht gegenseitig bedingen),

- möglichst vollständige Abdeckung der wichtigen Alternativen im übergeordneten Straßennetz (um unrealistische Entscheidungen aufgrund einer fehlenden Alternative zu vermeiden).

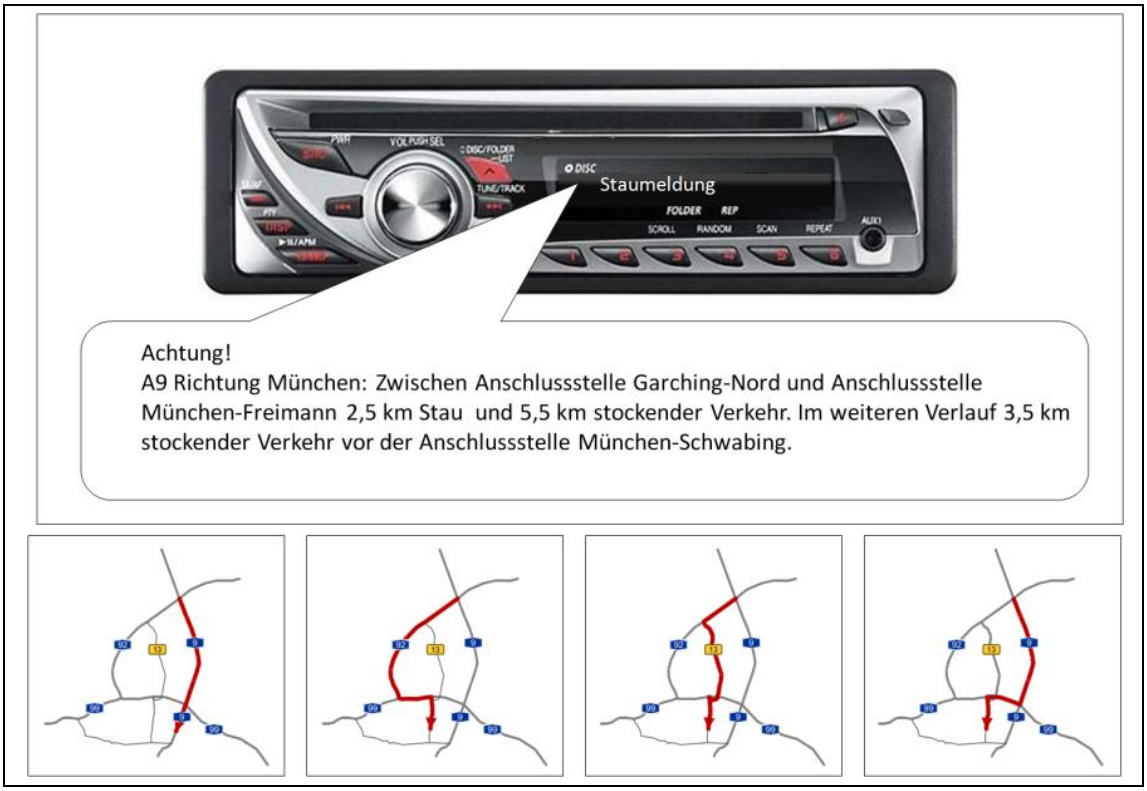


Bild 9: Entscheidungssituation für Verkehrszustand 1, Informationsmedium 2

Aufgrund dieser Kriterien werden die folgenden Routen ausgewählt (in Bild 9 von links nach rechts dargestellt):

- Route 1: A9
- Route 2: A92/A99/B13
- Route 3: A92/B13
- Route 4: A9/A99/B13

Die Route 4 entspricht dabei weitestgehend dem Verlauf von Route 1, so dass die Reisezeit der Route 1 und 4 nicht unabhängig voneinander verändert werden können. Route 4 wird dennoch ins Choice Set aufgenommen, um unrealistische Entscheidungen aufgrund einer fehlenden Alternative zu vermeiden. Die Abhängigkeit der Routen wird später in der Schätzung des Routenwahlverhaltens berücksichtigt.

Auswahl der Informationsmedien

Die Auswahl der vier Informationsmedien erfolgt aufgrund der Annahme, dass sowohl die Art als auch der Inhalt der dargestellten Information Einfluss auf die Routenwahl hat. Die Auswahlkriterien für die Informationsmedien sind:

- der Bekanntheitsgrad (sowohl vom Fahrer derzeit genutzte als auch zukünftig denkbaren Informationsmedien),
- der Inhalt von Verkehrsinformation als Längenangabe, Zeitangabe oder visuelle Verkehrslage,
- die Art der Darstellung als reine Information oder Information mit Empfehlung
- eine möglichst vollständige Abdeckung der im Feldversuch zur Verfügung stehenden Informationsmedien.

Aufgrund dieser Kriterien werden die folgenden Informationsmedien ausgewählt:

- Medium 1: Kartographische Verkehrslagedarstellung (siehe Bild 10)
- Medium 2: Verkehrsfunk im Radio (siehe Bild 11)
- Medium 3: Wechselwegweisung als substitutive dWiSta-Tafel (siehe Bild 12)
- Medium 4: Reisezeit-Tafel (siehe Bild 13)

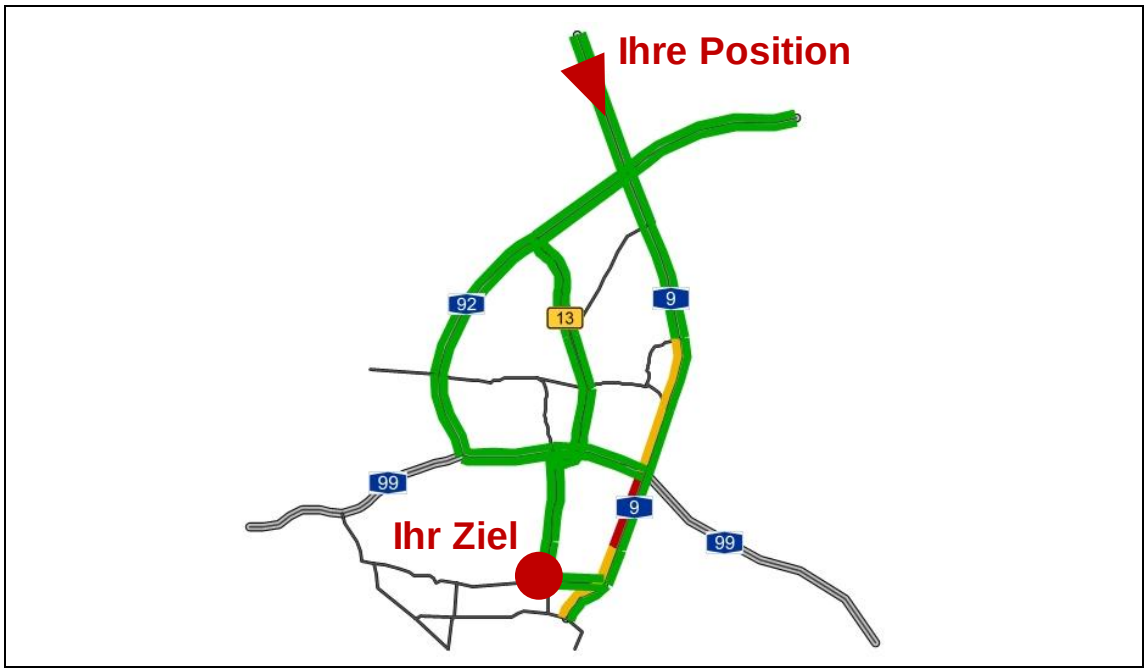


Bild 10: Kartographische Verkehrslagedarstellung mit farblicher Darstellung des Level of Service (LOS)

Bild 11: Verkehrsfunk im Radio mit Angabe der Kilometer Stau und stockender Verkehr

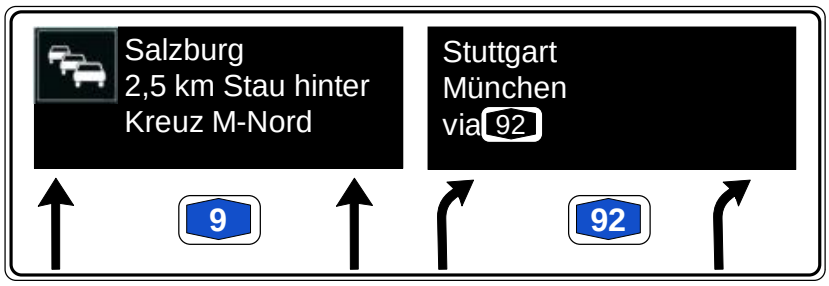


Bild 12: Substitutive dWiSta-Tafel mit Angabe der Kilometer Stau und stockender Verkehr und Empfehlung einer Route

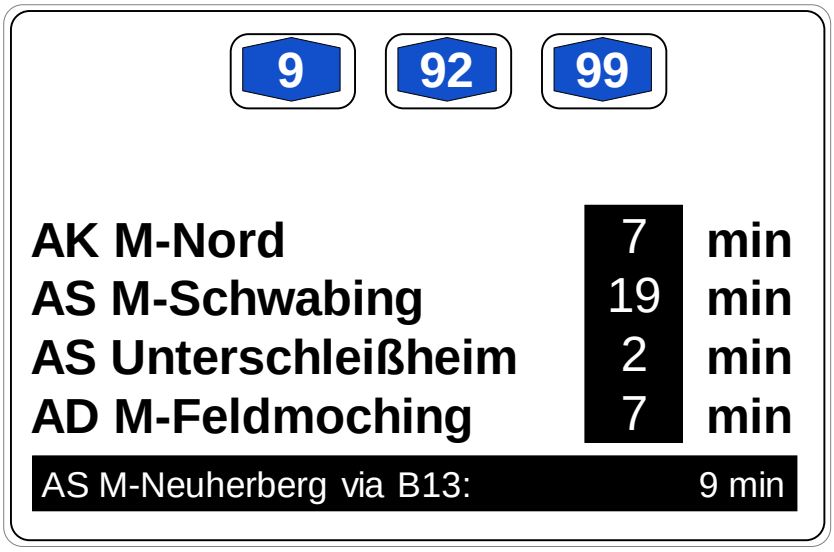


Bild 13: Reisezeit-Tafel mit Angabe der Reisezeiten in Minuten für bekannte Routenabschnitte

Auswahl der Verkehrszustände

Die dargestellten Verkehrszustände entlang der einzelnen Routen werden so gewählt, dass

- die Hauptroute des Probanden in keiner Entscheidungssituation die beste Alternative darstellt (da in diesem Fall kein Handlungsbedarf besteht),
- keine der vier Routen in jeder Entscheidungssituation die beste Alternative ist (so dass sich der Proband im Laufe der Befragung theoretisch umentscheiden müsste).

Aufgrund dieser Kriterien werden die folgenden Verkehrszustände ausgewählt:

- Verkehrszustand 1: Leichte Störung auf Hauptroute (H) des Probanden
- Verkehrszustand 2: Starke Störung auf Hauptroute und leichte Störung auf erster Alternativroute (A1) des Probanden
- Verkehrszustand 3: Starke Störung auf Hauptroute und leichte Störung auf zweiter Alternativroute (A2) des Probanden

Um möglichst realistische Verkehrszustände zu generieren, werden für jeden Probanden aus seinen GPS-Daten die Hauptroute und die am häufigsten gefahrenen Alternativrouten ermittelt.

Tabelle 5: Routengruppen für Kombination von Haupt- und Alternativrouten

RG	H1	H2	H3	A1	A 2
1	Route1/4			Route 2	Route 3
2	Route 2			Route1/4	Route 3
3	Route 3			Route1/4	Route 2
4	Route1/4	Route 2		Route 3	
5	Route1/4	Route 3		Route 2	
6	Route 2	Route 3		Route1/4	
7	Route1/4	Route 2	Route 3		

Ein Vergleich der gematchten GPS-Trajektorien mit den Routenverläufen der Route1/Route4, Route2 und Route3 liefert die absoluten Fahrthäufigkeiten über den Erhebungszeitraum für jeden Probanden. Jeder Proband kann somit einer Routengruppe (RG) zugeordnet werden. Insgesamt werden sieben Routengruppen definiert, die alle möglichen Kombinationen (H, A1, A2) von Hauptroute und Alternativrouten abbilden, siehe Tabelle 5. Ein Proband wird einer der Routengruppen 1 - 3 zugeordnet, wenn für ihn eine klare Hauptroute ermittelt werden kann. Routengruppen 5 und 6 gelten für Probanden, denen zwei Hauptrouten zugeordnet werden können. Routengruppe 7 umfasst Probanden ohne erkennbare Hauptroute. Für alle Probanden, denen keine dieser Gruppen eindeutig zugeordnet werden kann, wird die Routengruppe 1 gewählt. Bei der Schätzung der Routenwahl wird später überprüft,

ob diese Probanden gesondert behandelt werden müssen, da die Entscheidungssituation nicht täglich erlebt wird und daher zu abstrakt ist.

Für jede Routengruppe wird im Folgenden eine konkrete Ausgestaltung der Verkehrszustände 1, 2, 3 ermittelt. Für die Reisezeiten im unbelasteten Netz werden Zeiten aus *Google Maps* zugrunde gelegt. Ein Vergleich mit den tageszeitabhängigen Reisezeiten der VIB liefert realistische Erhöhungen der Reisezeiten für die betrachteten Störungsfälle der Verkehrszustände, siehe Tabelle 6.

Tabelle 6: Erhöhung der Reisezeiten für betrachtete Störungsfälle

	Verkehrszustand 1			**Verkehrszustand 2**			**Verkehrszustand 3**		
RG	**Route1/4**	**Route 2**	**Route 3**	**Route1/4**	**Route 2**	**Route 3**	**Route1/4**	**Route 2**	**Route 3**
1	+ 5 min	+ 0 min	+ 0 min	+ 10 min	+ 5 min	+ 0 min	+ 10 min	+ 0 min	+ 5 min
2	+ 0 min	+ 5 min	+ 0 min	+ 0 min	+ 10 min	+ 5 min	+ 5 min	+ 10 min	+ 0 min
3	+ 0 min	+ 0 min	+ 5 min	+ 0 min	+ 5 min	+ 10 min	+ 5 min	+ 0 min	+ 10 min
4	+ 10 min	+ 5 min	+ 0 min	+ 5 min	+ 10 min	+ 0 min	+ 5 min	+ 5 min	+ 10 min
5	+ 10 min	+ 0 min	+ 5 min	+ 5 min	+ 0 min	+ 10 min	+ 5 min	+ 10 min	+ 5 min
6	+ 0 min	+ 10 min	+ 5 min	+ 0 min	+ 5 min	+ 10 min	+ 10 min	+ 5 min	+ 5 min
7	+ 10 min	+ 5 min	+ 0 min	+ 0 min	+ 10 min	+ 5 min	+ 5 min	+ 0 min	+ 10 min

Da die eingesetzten Informationsmedien die Störungsfälle nicht nur als Reisezeiterhöhung in Minuten, sondern ebenso als Länge von Stau und stockendem Verkehr in Kilometer und kartographische Verkehrslagedarstellung in den Farben grün, gelb, rot darstellen, werden die Reisezeiterhöhungen entsprechend umgerechnet.

Für die Ermittlung der Staulängen werden Ergebnisse von Schlaich et al. [36] zugrundegelegt, die aus einer Analyse von Staumeldungen auf Autobahnen Richtwerte für Geschwindigkeiten der Verkehrszustände Stau (16,4 km/h) und Stockender Verkehr (50 - 60 km/h) ermitteln. Mit diesen Angaben werden die Reisezeiterhöhungen aus Tabelle 6 in Kilometer Stau und Stockender Verkehr umgerechnet.

Für die Ermittlung der Verkehrslagedarstellung (frei → grün, stockend → gelb und Stau → rot) wird auf die Berechnung des Level of Service der VIB zurückgegriffen. Die Ermittlung der Zustände frei, stockend, Stau basiert auf Grenzwerten der Auslastung einer Strecke. Die verwendeten Kapazitäten der Strecken basieren auf Werten aus dem Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen [19] für Straßenklassen und Anzahl Fahrbahnen. Die aktuellen Verkehrsstärken werden über die Capacity-Restraint Funktionen des Verkehrsmodells aus den gemessenen Reisezeiterhöhungen bestimmt.

3.2.2.4 Stated Preference Befragung zur Abfahrtszeitwahl

Die SP-Befragung zur Abfahrtszeitwahl verfolgte vor allem das Ziel, die zeitliche Flexibilität von Verkehrsteilnehmern zu ermitteln, um das Potential von Verkehrsinformation auf die zeitliche Verlagerung von Verkehr zu bestimmen.

Ein gewisses routiniertes Verhalten unterstellend, wurde eine SP-Befragung entwickelt, die den Probanden mit einer Entscheidungssituation konfrontiert, in der er für seine typischen Pendlerwege darüber informiert wird, welche Reisezeitersparnis zu erwarten wäre, wenn er seine Abfahrtszeit künftig ändern würde. Eine Entscheidungssituation ist definiert durch eine vorgeschlagene Änderung der üblichen Abfahrtszeit, eine prognostizierte Reisezeitersparnis, eine Zuverlässigkeit der Prognose und einen Startpunkt des Weges. Daraufhin entscheidet der Proband, ob er seine übliche Abfahrtszeit ändert oder beibehält (vgl. Bild 14).

Die jeweiligen Ausprägungen der Variablen für eine Entscheidungssituation werden dabei innerhalb definierter Grenzen (vgl. Tabelle 7) zufällig variiert. Die Anzahl der Variablen und ihrer Ausprägungen liefert insgesamt 108 mögliche Entscheidungssituationen. Davon werden 36 so ausgewählt, dass die Genauigkeit bei der späteren Wahlmodellschätzung nicht beeinflusst wird. Die 36 Entscheidungssituationen werden zufällig in sechs Sechsergruppen aufgeteilt und diese dann zufällig dem Probanden zugeordnet, der dann mit sechs Entscheidungssituationen konfrontiert ist.

Bild 14: Konkrete Entscheidungssituation Abfahrtszeitwahl

Tabelle 7: Ausprägungen der Variablen für Abfahrtszeitwahl

Variable	Ausprägungen					
Reisezeitersparnis [%]	10	30	50			
Änderung der Abfahrtszeit [min]	60	40	20	- 20	- 40	- 60
Startpunkt	Arbeit	Wohnung				
Zuverlässigkeit Information [%]	50	70	90			

Die Entscheidungssituationen werden zudem an die individuellen Wege des jeweiligen Probanden angepasst, indem der aus den GPS-Trajektorien ermittelte tatsächliche Arbeitsweg, die übliche Dauer und die übliche Abfahrtszeit als Grundlage für die Befragung dienen. So wird in der Befragung der Startpunkt und das Ziel der Fahrt mit dem tatsächlichen Wohnort und Arbeitsort des Probanden belegt und die übliche Fahrtdauer des Probanden verwendet, um die absolute Reisezeitersparnis aus der prozentualen Änderung der durchschnittlich erlebten Reisezeit des Probanden zu berechnen (vgl. Bild 14). Die detaillierte Beschreibung des Experiments ist im Schlussbericht der PTV AG enthalten (vgl. Snethlage et al. [41]).

Die Universität Stuttgart unterstützte die PTV AG bei der inhaltlichen Konzeption des Experimentes (Art und Ausprägung der Variablen). Zudem wurden als Input für das Experiment die durchschnittliche Abfahrtszeit und übliche Dauer der Wege zur Arbeit berechnet und an die PTV übergeben. Hierfür wurden jeweils probandenfein die GPS-Daten für die ersten sechs Wochen der jeweiligen Erhebungswelle ausgewertet, so dass bei Abgabe der Geräte für jeden Probanden ein individuelles Experiment zur Verfügung stand.

3.2.3 Zusammenfassung

Im AP 2 des Projekts *wiki* wurden die für die Routenanalyse erforderlichen Daten erhoben. Im Untersuchungsgebiet wurde dazu das bereits auf städtischem Gebiet und auf Autobahnen bestehende Detektionsnetz aus Kennzeichenerfassungssystemen (ANPR) erweitert und Trajektorien durch zusätzliche Befahrungen gewonnen (vgl. Busch et al. [13]).

Zur Erhebung des Routenwahl- und Abfahrtszeitwahlverhalten wurde eine kombinierte Erhebungsmethode aus Beobachtungen der tatsächlichen Routen- und Abfahrtszeitwahl (Revealed Preference) und Befragungen zu hypothetischen Entscheidungssituationen (Stated Preference) durchgeführt. Bei der Revealed Preference Erhebung wurde ein ausgewähltes Kollektiv von 300 Probanden, aufgeteilt in drei Wellen à 100 Personen, mit speziellen Erhebungsgeräten (Smartphone mit GPS) ausgestattet, die ihre Ortsveränderungen von Start bis Ziel mit Hilfe von GPS über einen Zeitraum von ca. acht Wochen protokollierten. Bei der Auswahl der Probanden wurden Personen ausgewählt, die regelmäßig mit dem Pkw längere

Strecken im Großraum München zurücklegen (z. B. Berufspendler mit Wohnort im Umland). Im Anschluss an die Feldphase der Erhebung wurde eine Stated Preference Befragung zu Routenkenntnis und -wahl und Abfahrtszeitwahl durchgeführt.

Ergänzend zu den zuvor erläuterten Erhebungen wurden 40 Probanden einem Test im Fahrsimulator unterzogen, um Aussagen über die subjektive Bewertung von Verkehrsqualität unter Berücksichtigung der Erwartungshaltung der Verkehrsteilnehmer zu erhalten (vgl. Koller-Matschke et al. [26]).

3.3 Aufbereitung der Verkehrslagedaten

Das Routenwahlverhalten wird maßgeblich von den Verkehrszuständen und den Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen, die der Verkehrsteilnehmer während der Fahrt wahrnimmt, beeinflusst. Es ist deshalb erforderlich, die Kenngrößen aus den Routenwahlerhebungen den verkehrlichen und systemtechnischen Randbedingungen gegenüberzustellen.

In AP 2 wurden umfangreiche Erhebungen durchgeführt, um das Routenwahlverhalten empirisch zu belegen. Die dabei erfassten Rohdaten und die in AP 1 identifizierten Bestandsdaten, die sich in einer georeferenzierten Datenbank wieder finden, sind in AP 3 aufzubereiten, um die in AP 4 durchzuführende Interpretation der Daten zu ermöglichen. AP 3 bereitet die Erhebungsdaten auf und ordnet sie sämtlichen untersuchten Entscheidungssituationen in räumlich-zeitlichem Zusammenhang zu.

Dazu werden zunächst die Rohdaten der Erhebungen bezüglich ihrer Aussagekraft im Hinblick auf die Zielsetzung des Gesamtprojekts analysiert. Es muss sichergestellt werden, dass die Daten den erforderlichen Qualitätsansprüchen genügen und sinnvoll weiterverwendet werden können. Ist die Anwendbarkeit gesichert, werden sämtliche Datenquellen zunächst separat ausgewertet. Überschneiden sich die erhobenen Daten in ihrer räumlichen oder zeitlichen Aussagekraft, so sind sie zusätzlich kombiniert zu analysieren.

Die Universität Stuttgart war an folgenden Aufgaben beteiligt:

- Aufbereitung der Befragungsdaten (verantwortlich): Übernahme der Befragungsdaten in die Datenbank und Verknüpfung der verschiedenen Datenquellen
- Aufbereitung der GPS-Log Befahrungen (Unterstützung PTV): Ermittlung von Störungen und Verkehrszuständen aus den Zeit-Weg-Trajektorien, Erstellung von personenbezogenen Zeit-Weg Trajektorien

- Aufbau Verkehrsmodell (verantwortlich): Anpassung und Erweiterung des Validate Verkehrsmodells der VIB, Erstellung von Stundenmatrizen der Verkehrsnachfrage durch eine Schätzung der Quelle-Ziel-Beziehungen mit Hilfe von Matrixkorrekturverfahren, Kalibrierung der Netzwiderstände anhand der Reisezeitmessungen
- Zusammenführung der Erhebungsdaten mit den Daten der Referenzverkehrslage und den Verkehrsbeeinflussungssystemen (Unterstützung TUM-VT): Zusammenführung der Daten aus den einzelnen Erhebungen, Ermittlung der Referenzverkehrslage aus den verfügbaren Datenquellen

3.3.1 Aufbereitung der Befragungsdaten

Online Befragung

Aus der Online Befragung der 278 Probanden können personenbezogene Daten bezüglich der sozio-demografischen und mobilitätsrelevanten Merkmale, ihres normativen Umfelds und der regelmäßig aufgesuchten Aktivitätenorte gewonnen werden. Die sozio-demographischen und -ökonomischen Merkmale geben Aufschluss über die teilnehmenden Personengruppen und Eigenheiten der untersuchten Stichprobe. Mobilitätsrelevante Merkmale geben Aufschluss über die Art der erfassten Wegemenge, wie z. B. Fahrzwecke. Das normative Umfeld liefert wichtige Variablen für die Schätzung der Routenwahl, da persönliche Präferenzen in Bezug auf die Nutzung und Bewertung von Verkehrsinformation zu betrachten sind. Die personenbezogenen Daten wurden für weitere Analysezwecke in die *wiki*-Datenbank eingepflegt.

Bild 15 zeigt die erhobenen Angaben zum Haushalt. Die Anzahl fahrbereiter Fahrzeuge im Haushalt ist mit 2,1 Pkw ein hoher Wert für den ländlichen Raum, vergleiche Mobilität in Deutschland (MiD) mit 1,8 Pkw pro Haushalt (siehe Infas [24]). Der Führerscheinbesitz von nahezu 100% ist das Ergebnis der Kriterien für die Probandenrekrutierung. Der geringe Anteil an weiblichen Probanden ist auf die Wahl der Arbeitgeber, die die Rekrutierung ihrer Mitarbeiter unterstützen, zurückzuführen. Der Großteil der Probanden ist bei der BMW AG beschäftigt, siehe Bild 15 auf Seite 41. Die Geschlechterverteilung entspricht in etwa der Belegschaft der BMW AG. Der Besitz einer Zeitkarte für den öffentlichen Verkehr liegt in Summe bei 8%, ein geringer aber nicht überraschender Wert für Pkw-Pendler. Die Altersstruktur der Probanden zeigt eine Häufung zwischen 40 und 50 Jahren. Passend zur Altersstruktur und damit Lebensphase ergibt sich eine Haushaltsgröße von im Mittel 2,8 Personen pro Haushalt. Diese liegt deutlich über dem typischen Wert vom 2,2 Personen pro Haushalt für den ländlichen Raum nach MiD 2008 [24] und lässt sich mit der überdurchschnittlich hohen Anzahl von 26% an Haushalten mit vier Personen im Gegensatz zu 21,6% nach MiD begründen.

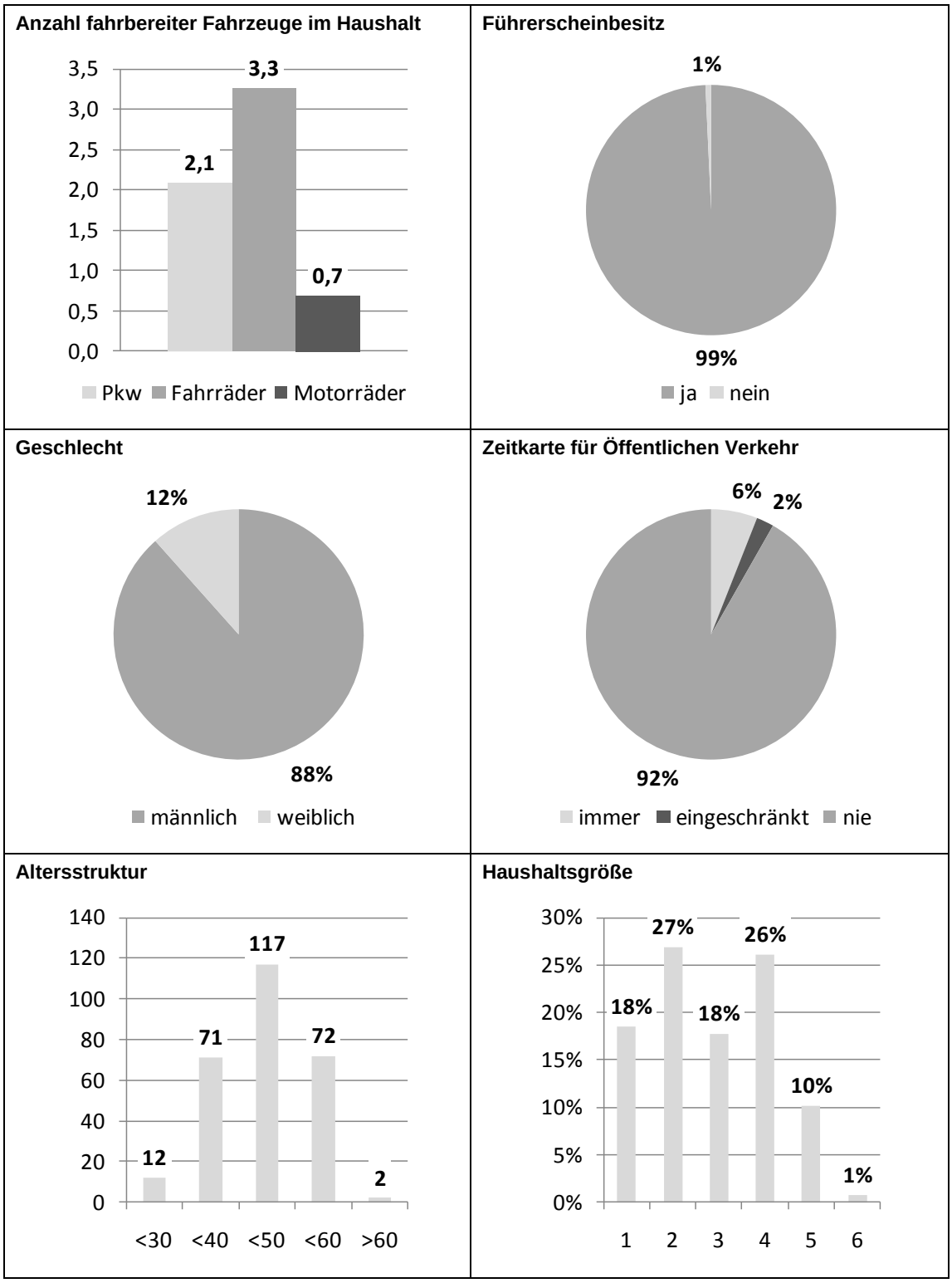


Bild 15: Angaben zum Haushalt

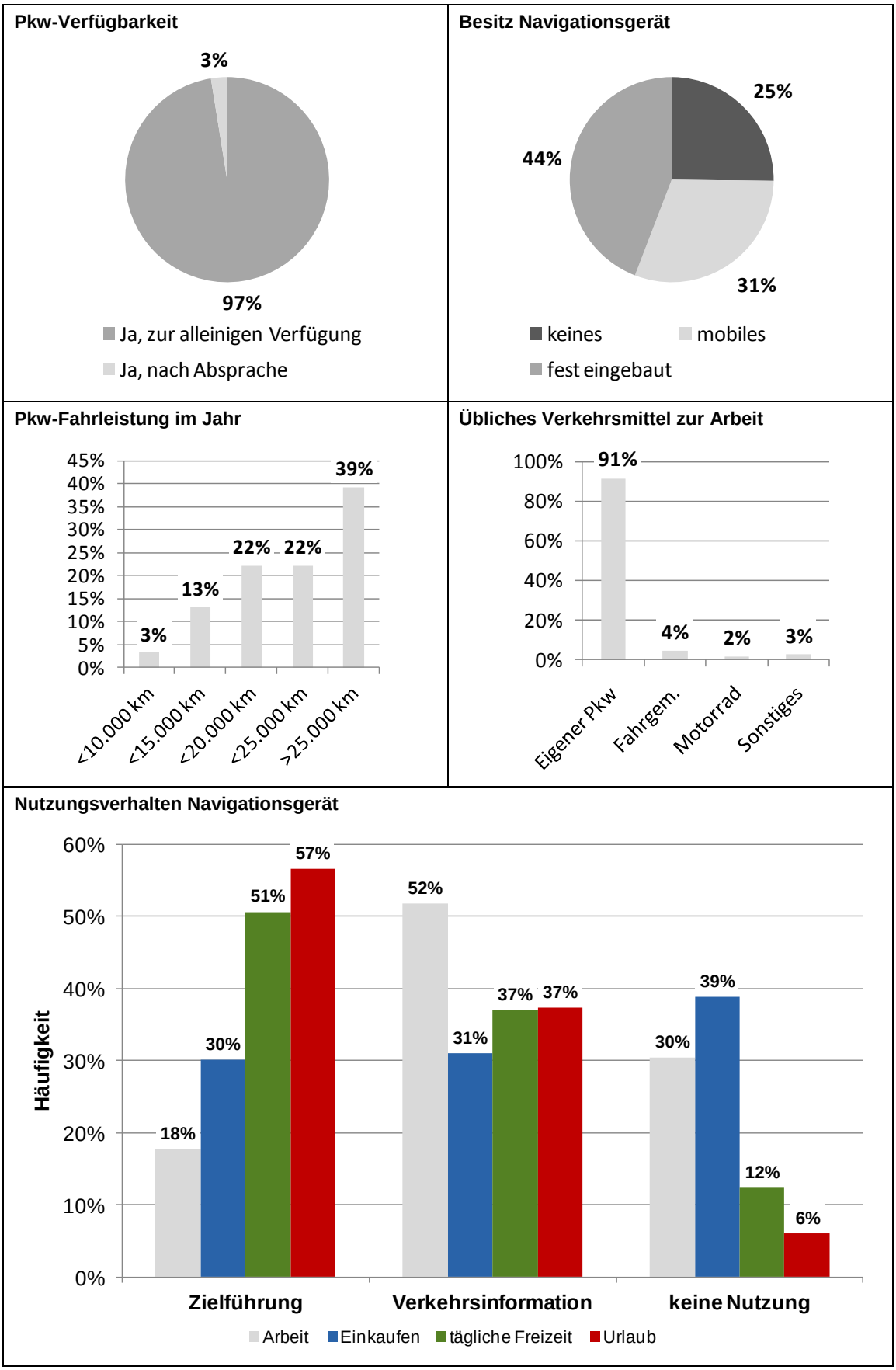


Bild 16: Angaben zum Fahrzeug

Bild 16 zeigt die erhobenen Angaben zum Fahrzeug. Die Pkw-Verfügbarkeit von 97% ist das Ergebnis der Kriterien für die Probandenrekrutierung. 75% Prozent der Probanden besitzen ein Navigationsgerät im Fahrzeug, so dass ein Grundinteresse an Verkehrsinformation und gewisse Erfahrungswerte im Umgang mit solchen Geräten angenommen werden können. Die Häufung von 61% der Fahrer mit einer durchschnittlichen jährlichen Pkw-Fahrleistung von über 20.000 Kilometern und die Wahl des Pkw als übliches Verkehrsmittel zur Arbeit in 91% der Fälle sind das Ergebnis der Kriterien für die Probandenrekrutierung. Die Pkw-Fahrleistung liegt deutlich über dem Vergleichswert der Gesamtbevölkerung von 18% der Fahrer mit mehr als 20.000 Kilometern jährlicher Pkw-Fahrleistung [42]. Das angegebene Nutzungsverhalten des Navigationsgeräts zeigt einen Zusammenhang zwischen der Nutzung von Verkehrsinformation und Fahrzweck. Die Funktion der Zielführung eines Navigationsgeräts gewinnt an Bedeutung für Fahrten zu unbekannten Zielen. Während nur 18% das Navigationsgerät zur Zielführung bei Fahrten zur Arbeit nutzen, sind es 57% bei Fahrten in den Urlaub. Bei der Nutzung des Navigationsgeräts zur Verkehrsinformation zeigt sich ein anderes Verhalten. Verkehrsinformation ist besonders bei Fahrten zur Arbeit von Interesse, da diese meist zu den Spitzenstunden stattfinden und eine hohe Staugefahr besteht. Auch für ein Drittel der Fahrten zu Einkauf, Freizeit oder Urlaub wird Verkehrsinformation über das Navigationsgerät genutzt.

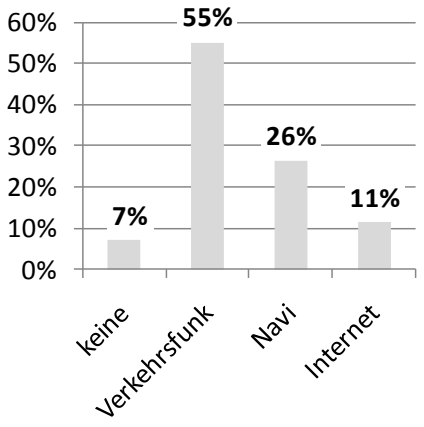
Der Großteil der mit GPS-Loggern detektierten Trajektorien stammt von Fahrten auf dem morgendlichen oder abendlichen Arbeitsweg. Daher sind Angaben zum Arbeitsweg wichtig, um einen Erfahrungswert als Referenz den Reisezeiten der beobachteten Ortsveränderungen gegenüberstellen zu können. Tabelle 8 zeigt die erhobenen Angaben zum täglichen Arbeitsweg über alle Probanden. Die durchschnittlichen Reisezeiten liegen bei ca. 40 Minuten und resultieren aus dem Kriterium von mindestens 20 Kilometer täglichem Arbeitsweg bei der Probandenrekrutierung. Die erlebten Reisezeiten schwanken um bis zu 62% auf dem morgendlichen Weg zur Arbeit und um bis zu 65% auf dem abendlichen Weg von der Arbeit. Dabei erleben die Probanden im Mittel an jedem dritten Werktag einen Zeitverlust durch Stau, der durchschnittlich 20 Minuten beträgt.

Tabelle 8: Angaben zum täglichen Arbeitsweg

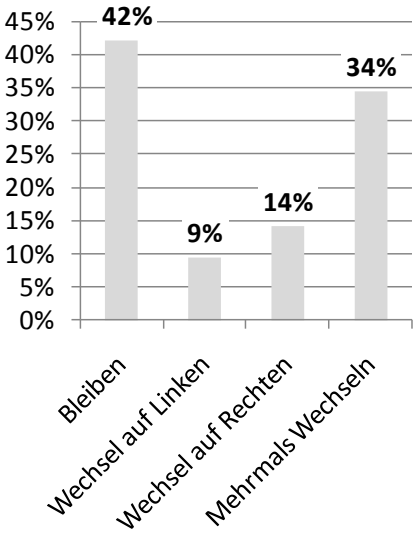
Angaben zum täglichen Arbeitsweg			
	minimal	maximal	durchschnittlich
Tägliche Reisezeit am Morgen	31	63	39
Tägliche Reisezeit am Abend	31	69	42
Verlustzeit bei Stau			20
Anzahl Tage pro Woche mit Verlustzeiten am Morgen			1,4
Anzahl Tage pro Woche mit Verlustzeiten am Abend			1,5

Zusätzlich zu den Reisezeitangaben wurden Angaben zum üblichen Verhalten auf dem täglichen Arbeitsweg, stellvertretend für das generelle Verkehrsverhalten, der Probanden erfragt, siehe Bild 17. Dort ist unter anderem die Nutzung von Verkehrsinformation auf dem täglichen Arbeitsweg dargestellt. Nur 7% der Probanden gaben an, dass sie keine Verkehrsinformation nutzen. Der Verkehrsfunk über Radio ist mit 55% das am häufigsten genutzte Informationsmedium. Diese Präferenz spiegelt sich auch in der Auswertung der Befolgungsgrade der Routenwahldaten wieder, (siehe Kapitel 3.4.1.3).

Nutzung von Verkehrsinformation auf dem täglichen Arbeitsweg



Fahrstreifenwahlverhalten bei Stau auf zweistreifiger Autobahn



Störfaktoren auf dem täglichen Arbeitsweg

Ranking gesamt	
1	Zeitverlust durch Stau
2	Halten an roten Ampeln
3	Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer
4	Bei Abfahrt nicht genau zu wissen, wann man ankommt
5	Bei Abfahrt nicht genau zu wissen, was die beste Route ist
6	Die Parkplatzsuche am Ziel

Priorisierung von Verbesserungsmaßnahmen

Ranking gesamt	
1	Mir ist es wichtig zu wissen, wie lange der Stau dauert
2	Ich fände es gut, über Alternativrouten informiert zu werden
3	Mir sind Informationen über die Stauursache wichtig
4	Ich fände es gut, wenn sichergestellt wäre, dass sich kein Fahrzeug vordrängeln kann, wie z. B. durch häufigen Spurwechsel

Bild 17: Angaben zum Verhalten auf Arbeitsweg

Die Fahrstreifenwahl bei Stau auf einer zweistreifigen Autobahn ist ein Indiz für die Reaktionsfreudigkeit des Probanden auf das erlebte Verkehrsgeschehen. 42% der Probanden gaben an, auf dem Fahrstreifen zu bleiben, auf dem sie angekommen sind. 34% der Probanden waren dazu bereit, mehrmals den Fahrstreifen zu wechseln. Weiterhin wurden die Probanden nach wichtigen Störfaktoren auf dem täglichen Arbeitsweg und einer Priorisierung von Verbesserungsmaßnahmen befragt, um für die

Schätzung der Routenwahl erste Anhaltspunkte zu wichtigen Attributen neben harten Kenngrößen, wie Reisezeit, zu bekommen.

Die berufliche Tätigkeit beeinflusst viele Entscheidungen wie die Wahl und Anzahl der Aktivitäten und Ziele sowie persönliche Bewertungen der Zeit und Kosten, die dann direkt oder indirekt Einfluss auf die Routen- und Abfahrtszeitwahl haben. Bild 18 zeigt die erhobenen Angaben zur beruflichen Tätigkeit der Probanden. Der Großteil der Probanden ist vollzeitbeschäftigter Angestellter mit flexiblen Arbeitszeiten.

Für die Aufbereitung der detektierten GPS-Trajektorien spielen die regelmäßigen Ziele der Probanden eine wichtige Rolle. Tabelle 9 zeigt die regelmäßigen Ziele der Probanden, die sie mindestens einmal im Monat anfahren nach Häufigkeit absteigend sortiert. Zudem wurde die Anzahl der wöchentlichen Termine jedes Probanden erhoben, siehe Bild 19. Dabei wurde sowohl zwischen Terminen am Morgen, Nachmittag, Abend unterschieden, als auch zwischen Terminen mit fester Uhrzeit (wie zum Beispiel Kurs an der Volkshochschule) und Terminen mit flexibler Uhrzeit (wie zum Beispiel ein Besuch im Fitnessstudio).

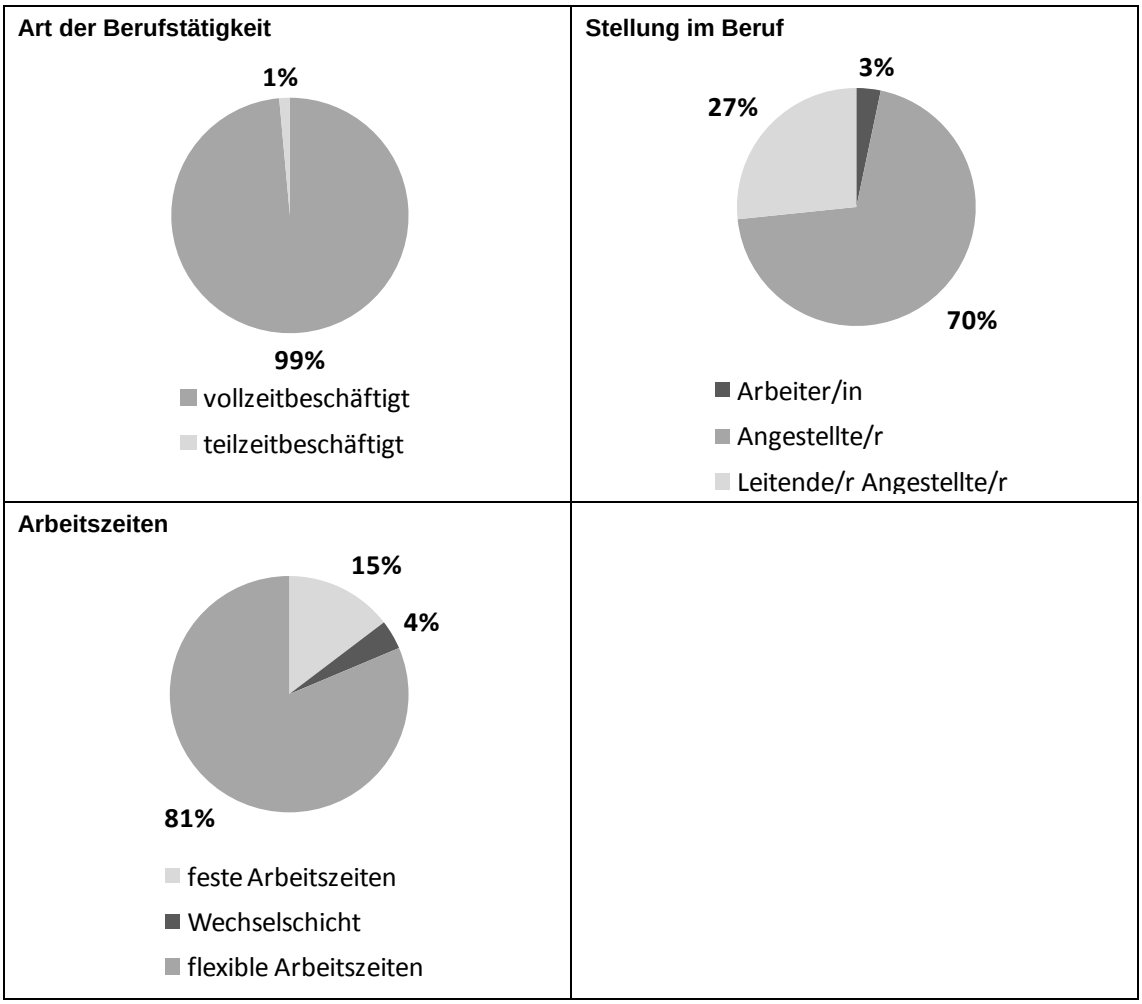


Bild 18: Angaben zur beruflichen Tätigkeit

Tabelle 9: Angaben zu regelmäßigen Zielen

Fahrtzweck	Anzahl gesamt	Prozentual
Sonstiger Einkauf	165	23%
Freizeit	148	21%
Einkauf täglicher Bedarf	98	14%
Besuch bei Freunden	95	13%
Sonstige Ziele	80	11%
Kind bringen oder abholen	71	10%
Private Erledigung	47	7%
Summe	704	100%

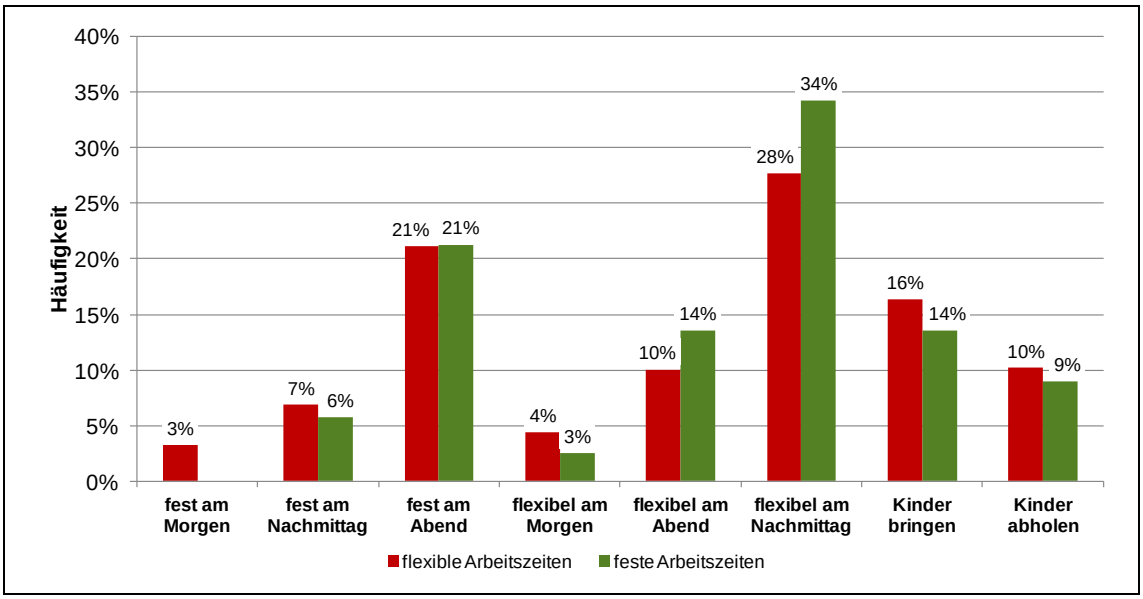


Bild 19: Angabe wöchentlicher Aktivitäten

Die ausgewerteten Charakteristika der Probanden zeigen auf, dass die Struktur des Probandenkollektivs von der Struktur der Gesamtmenge aller Verkehrsteilnehmer abweicht. Gleichzeitig zeigt sich die Eignung der Probanden für die Untersuchung, da diese mit regelmäßigen Störungen auf dem Arbeitsweg konfrontiert und mit der Nutzung von Verkehrsinformation bereits vertraut sind.

Befragung zur Routenkenntnis

Die Befragung zur Routenkenntnis liefert Informationen über die Anzahl und die Verläufe der bekannten alternativen Routen für den morgendlichen Arbeitsweg. Die mit dem Trip-Tracer-Tool erfassten Routenverläufe werden zunächst auf das Lokalisierungsnetz übertragen. So entsteht ein lückenloser und routingfähiger Verlauf, der in die *wiki*-Datenbank eingespeist wird. Insgesamt konnten für 265 Probanden 713 plausible Routen erfasst werden, was einer mittleren Routenanzahl von 2,69

entspricht. Für die anderen Probanden liegen keine plausiblen Routen vor. Darüber hinaus wurden die Probanden zu den von ihnen angegebenen ersten vier Routen intensiv befragt. Tabelle 10 zeigt eine Zusammenfassung der abgefragten Attribute.

Tabelle 10: Attribute der angegebenen Routen

	1. Route	2. Route	3. Route	4. Route
Median der Länge [km]	38	40	37	33
Median der Fahrtdauer [min]	35	40	40	40
Median der Anzahl überfahrener Ampeln	6	8	8	7

Um andere wichtige Faktoren, neben Länge, Fahrtdauer und Anzahl Ampeln, bei der Wahl der Hauptroute zu ermitteln, wurden die Probanden gebeten, ihre Gründe für die Wahl ihrer Hauptroute zu nennen. Dabei wurden den Probanden keine Vorgaben gemacht, sondern die gegebenen Antworten wurden vom Interviewer acht möglichen Antwortkategorien zu geordnet. Erwartungsgemäß ist die Fahrtdauer das wichtigste Kriterium bei der Wahl der Hauptroute.

Stated Preference Befragung zur Routenwahl

Die SP-Befragung zur Routenwahl liefert als Ergebnis die Routenwahl für zwölf Entscheidungssituationen aller 278 Probanden. Jede Entscheidungssituation ist eine Kombination aus einem vom drei möglichen Verkehrszuständen und einem von vier möglichen Medien für die Darstellung der Verkehrsinformation. Zur Wahl stehen jeweils vier Routen. Als Ergebnis sind alle vier Routen mit statischen Attributen und für jede Kombination von Verkehrszustand und Informationsmedium mit dynamischen Attributen versehen (vgl. analoges Vorgehen in Kapitel 3.4.2.2) und inklusive der Wahlentscheidung der Probanden in einer Datenbank hinterlegt. Für jede Entscheidungssituation kann nun die Routenwahl bezüglich der aufgelisteten Attribute analysiert werden.

Um zu überprüfen, ob das SP-Experiment für die Probanden prinzipiell gut verständlich war, wird die Qualität der bekundeten Routenwahl untersucht. Unter dem Kriterium der Reisezeit ergeben sich zunächst eine objektiv schnellste Route, eine objektiv langsamste Route und zwei andere Routen (weder schnellste noch langsamste). Da nur in 24 % der Fälle die objektiv langsamste Route gewählt wird, ist davon auszugehen, dass die Probanden mit der Komplexität der Entscheidungssituation nicht überfordert sind (vgl. auch Tabelle 11).

Bild 20 zeigt die absolute Wahlhäufigkeit der vier Routen der 278 Probanden über alle 12 Entscheidungssituationen. Da aus den beobachteten absoluten Fahrthäufigkeiten für die Routen 1 bis 4 die präferierte Hauptroute der Probanden bekannt ist (71% Hauptroute A9 bzw. A9/A99, 15% Hauptroute A92, 14% Hauptroute B13), zeigt sich,

dass eine Vielzahl der Probanden ihre Hauptroute im Verlauf des Experiments verlassen.

Wertet man die Qualität der Routenwahl in Abhängigkeit der Verkehrszustände aus, zeigt sich, dass je größer die Reisezeitunterschiede zwischen den Alternativrouten sind (Vergleich Zustandsdefinition in Tabelle 4), desto besser werden die Unterschiede wahrgenommen.

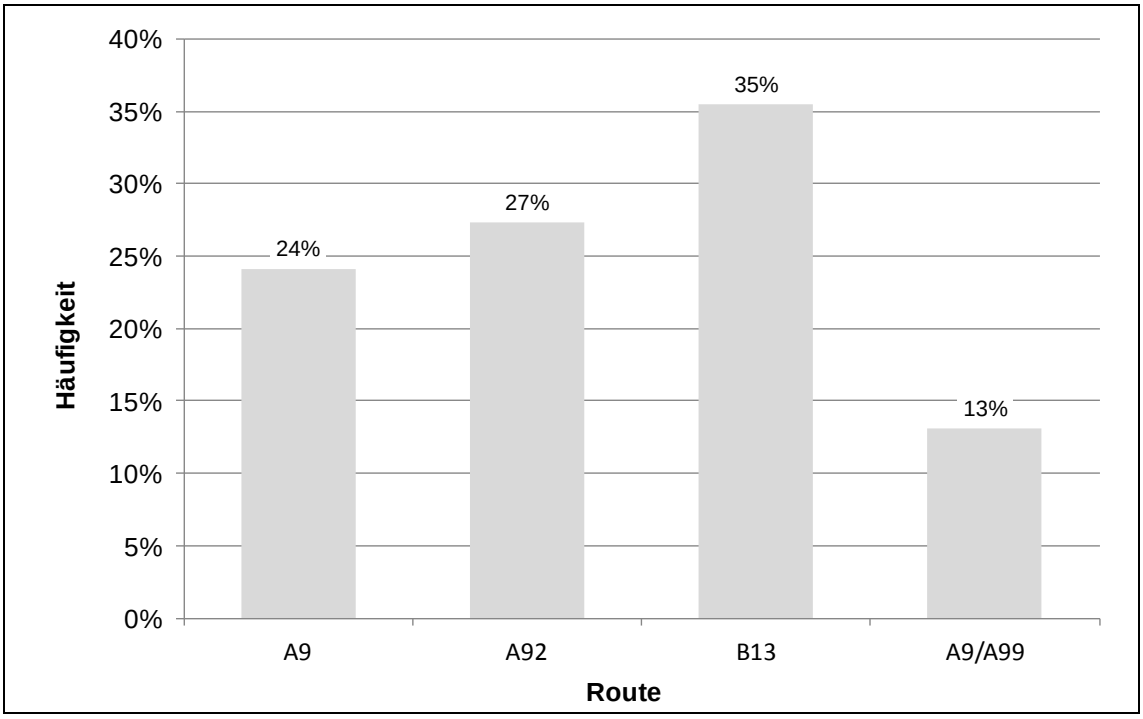


Bild 20: Gesamte Wahlhäufigkeit der einzelnen Routen

Tabelle 11: Qualität der Routenwahl in Abhängigkeit vom Verkehrszustand

Zustand	Anteil schnellste Route	Anteil andere Route	Anteil langsamste Route
alle	43%	34%	24%
Zustand 1	33%	39%	28%
Zustand 2	48%	30%	22%
Zustand 3	47%	32%	21%

In Abhängigkeit der beobachteten absoluten Fahrthäufigkeiten für die Routen 1 bis 4 und der Lage des Wohnorts der Probanden werden verschiedene SP-Experimente definiert. Die einzelnen Experimente unterscheiden sich nach präferierter Hauptroute, Wohnort des Probanden (Einfahrt über A9 bzw. A92 ins Untersuchungsgebiet) und Reihenfolge der Entscheidungssituationen, siehe Kapitel 3.2.2.3. Die Experimente 1 bis 7 beschreiben dabei sieben Routengruppen (siehe Tabelle 5) mit Einfahrt über A9, die Experimente 8 bis 14 dieselben sieben Routengruppen mit Einfahrt über die A92. Nach Zuordnung der Probanden finden 10 Experimente Verwendung. Bild 21 zeigt die Qualität der Routenwahl in Abhängigkeit des dem Probanden vorgelegten

Experiments. Dabei entspricht Experiment 1 mit Einfahrt über A9 dem Experiment 8 mit Einfahrt über A92 und so weiter. Alle Experimente weisen die zu erwartenden Wahlhäufigkeiten (am häufigsten schnellste Route, am zweithäufigsten andere Route, am seltensten langsamste Route) in unterschiedlichen Ausprägungen auf. Eine Ausnahme bildet Experiment 3 (B13 Hauptroute, Einfahrt über A9), das insgesamt 34 Probanden vorgelegt wurde, und Experiment 10 (B13 Hauptroute, Einfahrt über A92), das insgesamt 4 Probanden vorgelegt wurde. Hierfür gibt es auf Grundlage der rein statistischen Auswertung keine Begründung. Ein Interpretationsversuch ist die aus den GPS-Trajektorien beobachtete Präferenz der Bundesstraßen gegenüber den Alternativrouten auf Autobahnen, so dass der Einfluss der Reisezeit auf den Alternativrouten eine untergeordnete Rolle spielt.

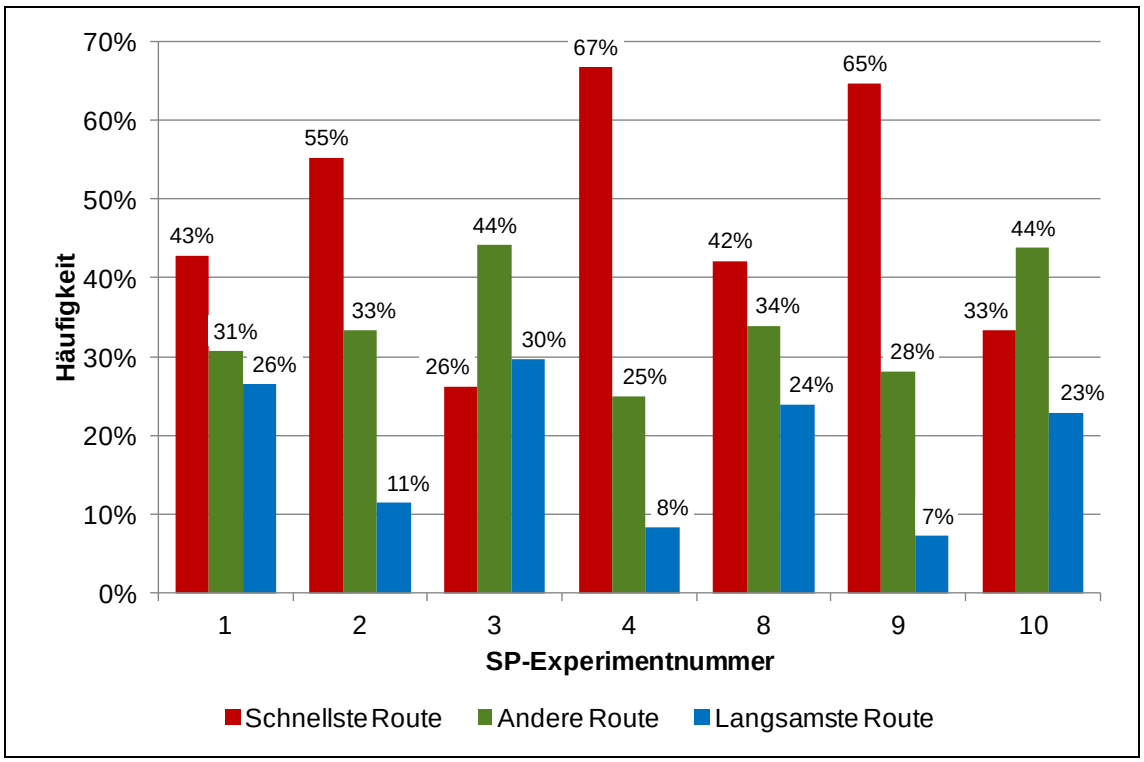


Bild 21: SP-Experimentabhängige Qualität der Routenwahl

Das Schwanken der Wahlqualität bei Darstellung der Verkehrsinformation durch unterschiedliche Medien (58 % Anteil schnellste Route bei LOS gegenüber 28 % schnellste Route bei der dIRA-Tafel) lässt außerdem darauf schließen, dass die Probanden die bestehenden Routenattribute mediumsabhängig interpretieren und gibt ein erstes Indiz für unterschiedliche Befolgungsgrade und Akzeptanz verschiedener Informationsmedien.

Abschließend zeigt Bild 22 die Qualität der Routenwahl als Punktescore für die einzelnen Probanden. Der Punktescore ist ein Maß für die objektive Richtigkeit der Routenwahl und wird aus den 12 Entscheidungssituationen für jeden Probanden bestimmt. Dabei gibt die Wahl der schnellsten Route fünf Punkte, die Wahl der

langsamsten Route einen Punkt, die Wahl einer der beiden anderen Routen zwei Punkte. Ein Proband, der drei Mal die schnellste, und neun Mal die langsamste Route gewählt hat, hätte somit 24 Punkte. Die resultierende Verteilung ergibt eine Häufung von Probanden mit 40 von maximal 60 Punkten. Bild 22 ist aber nicht nur ein Indiz für ein unterschiedlich ausgeprägtes Abstraktionsvermögen der Probanden, sondern könnte auch auf persönliche Präferenzen in der Routenwahl hindeuten.

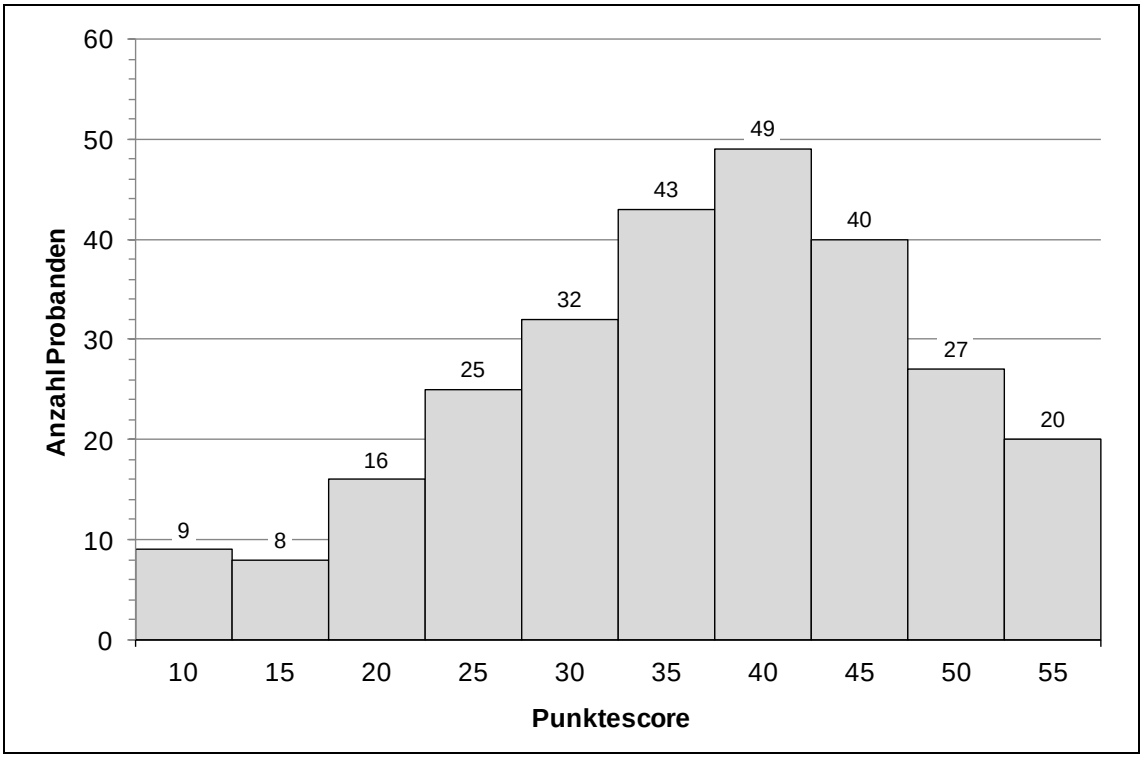


Bild 22: Probandenabhängige Qualität der Routenwahl

Stated Preference Befragung zur Abfahrtszeitwahl

Die Stated Preference Befragung zur Abfahrtszeitwahl liefert als Ergebnis die Bereitschaft zum Wechsel der Abfahrtszeitwahl in sechs Entscheidungssituationen aller 278 Probanden. Die Ausprägung der Attribute (Veränderung der Abfahrtszeit, Reisezeitersparnis, Zuverlässigkeit der Prognose und Startpunkt des Weges) für jede Entscheidungssituation (vgl. Tabelle 7 in Kapitel 3.2.2.4) inklusive der Wahlentscheidung der Probanden werden in eine Datenbank übertragen. Die zeitliche Flexibilität kann bezüglich der aufgelisteten Attribute, im speziellen der Verkehrsinformation als Prognose der Zeitersparnis, analysiert werden.

Um die Ausprägung der Attribute flexibler zu gestalten und die Anzahl der Entscheidungssituationen möglichst klein zu halten, werden die Probanden sechs Experimentengruppen zugeordnet. Für alle Experimentengruppen zeigt sich dabei eine

ähnliche Größenordnung der Abfahrtszeitwechsel, so dass der Einfluss der zufälligen Experimentgruppe wie gewünscht vernachlässigbar ist (vgl. Tabelle 12).

Tabelle 12: Qualität der Routenwahl in Abhängigkeit von der Experimentengruppe

Entscheidung	Prozentualer Anteil der Entscheidung nach Gruppenzugehörigkeit					
	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3	Gruppe 4	Gruppe 5	Gruppe 6
Abfahrtszeit beibehalten	62%	56%	60%	52%	64%	56%
Abfahrtszeit wechseln	38%	44%	40%	48%	36%	44%

3.3.2 Aufbereitung der GPS-Log Befahrungen

Die Aufbereitung der GPS-Log Befahrungen hatte zum Ziel, aus den getrackten GPS-Logs vollständige, personenbezogene Ortsveränderungen mit zugeordneten Fahrzwecken zu genieren und die zusätzlich erhobenen Routenanfragen zur Navigation und LOS-Kartenabrufe zeitlich und räumlich zuzuordnen.

Die mit den GPS-Logs durchgeführten Bearbeitungsschritte und das dabei resultierende Mengengerüst sind in Bild 23 dargestellt.

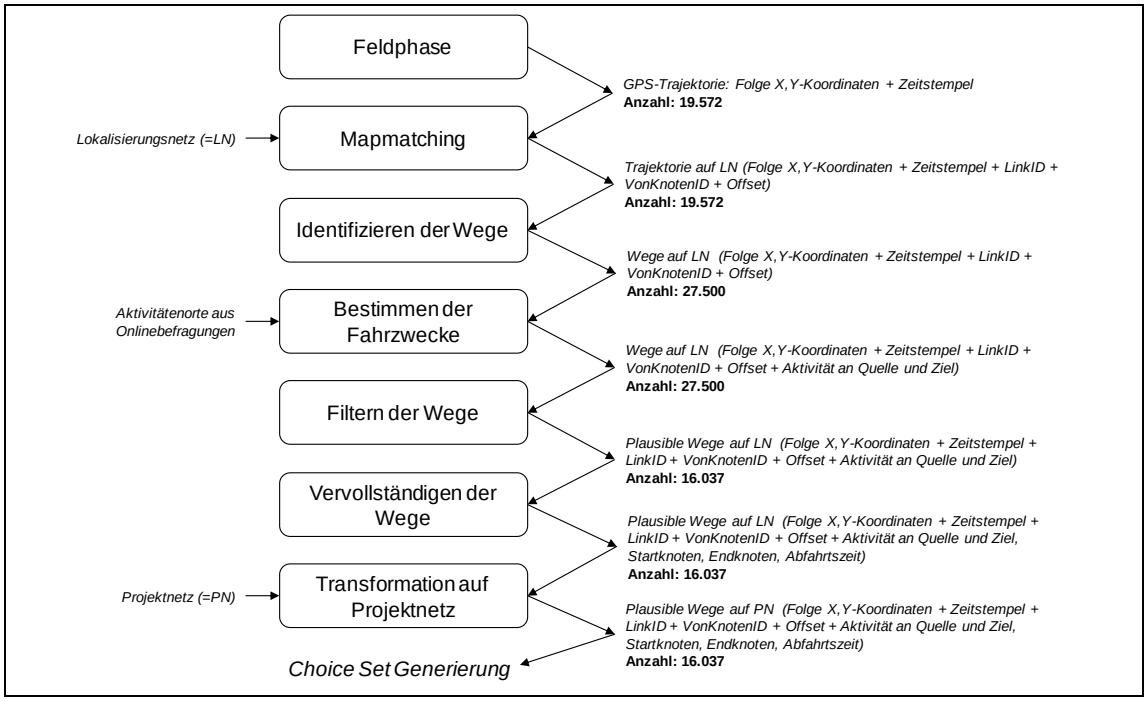


Bild 23: Aufbereitung der GPS-Trajektorien

Im ersten Schritt erfolgt ein Map-Matching der aufgezeichneten GPS-Positionen auf das Lokalisierungsnetz durch die PTV AG. Dafür wird trajektorienweise jeder GPS-Log einer Strecke zugeordnet. Für jede Zuordnung zu einer Strecke wird der vordefinierte Widerstand dieser Strecke verringert. Auf dem so modifizierten Netz wird vom

identifizierten Startpunkt zum Endpunkt der Trajektorie eine Kurzwegsuche durchgeführt, in der Strecken mit zugeordneten GPS-Logs entsprechend bevorzugt werden. Durch angewandte Prüfalgorithmen werden durchfahrene Schleifen (doppeltes Befahren einer Strecke) identifiziert und entfernt. Das Ergebnis ist eine geordnete Folge von GPS-Datenpunkten mit plausiblen Geschwindigkeiten, die jeweils richtungsbezogen einer Strecke auf dem Lokalisierungsnetz so zugeordnet sind, dass sich ein lückenloser und routingfähiger Streckenzug ergibt (vgl. Snethlage et al. [41]). Für die weiteren Bearbeitungsschritte ist die Universität Stuttgart verantwortlich. Diese sind in den folgenden Unterkapiteln beschrieben.

3.3.2.1.1 Identifizieren der Wege

Beim Detektieren der Trajektorien treten hinsichtlich der Identifikation von Wegen zwei wesentliche Probleme auf. Beim Aufzeichnen der Trajektorien bzw. Übertragen der GPS-Logs an den Server kommt es zum einen zum Verlust einzelner GPS-Logs bzw. vollständiger Datenpakete, der zu Weg und Zeitlücken innerhalb der Trajektorien führt. Zum anderen werden die GPS-Geräte beim Durchführen einer Aktivität nicht in jedem Fall ausgeschaltet, so dass eine Trajektorie eventuell mehrere Wege beinhaltet.

In einem ersten Kriterium wird nun geprüft, ob vorliegende Zeit- bzw. Weglücken tatsächlich aus Datenverlust oder einer eventuell durchgeführten Zwischenaktivität resultieren. Die aufgetretenen Weg- bzw. Zeitlücken werden beim Map-Matching-Prozess zunächst nachgeroutet und markiert. Aufgrund der Markierung ist für jede Lücke die Dauer t_{gap} und Länge x_{gap} aus den Koordinaten und den Unixzeitstempeln der fehlerfreien GPS-Logs bestimmbar. Ist die beobachtete Zeitlücke größer als der Grenzwert t_{acc}, wird das nachgeroutete Teilstück verworfen und die Trajektorie an dieser Stelle geteilt. Ist t_{gap} kleiner als bzw. gleich t_{acc}, wird das nachgeroutete Teilstück hingegen beibehalten. Der Grenzwert t_{acc} berechnet sich dabei folgendermaßen:

$$t_{acc} = \begin{cases} t_{crit.low}, & \textit{für } t_{gap} \leq t_{crit.low} = 300s \\ x_{gap} \cdot \frac{1}{1{,}6}, & \textit{für } t_{gap} \leq t_{crit.high} \\ t_{crit.high}, & \textit{für } t_{gap} > t_{crit.high} = 1200s \end{cases} \quad (1)$$

mit:

t_{acc}	[s]	Akzeptierte Zeitlücke
x_{gap}	[m]	Räumliche Lücke zwischen zwei GPS-Logs
$t_{crit,low}$	[s]	Unterer Grenzwert für Dauer einer Aktivität
$t_{crit,high}$	[s]	Oberer Grenzwert für akzeptierte Zeitlücke

Entsprechend wird jede Zeitlücke, die kleiner ist als $t_{crit,low}$ = 300s zunächst nachgeroutet, und für jede Zeitlücke, die größer ist als $t_{crit,high}$ = 1200s das nachgeroutete Teilstück verworfen. Liegt die beobachtete Zeitlücke zwischen diesen

beiden Werten, ergibt sich t_{acc} in Abhängigkeit von der dazugehörigen beobachteten räumlichen Lücke x_{gap}. Der in der Formel auftauchende Wert 1,6 kann als minimal akzeptierte Geschwindigkeit in [m/s] interpretiert werden. Ist die beobachtete Zeitlücke kleiner als t_{acc}, liegt die mittlere Geschwindigkeit während der beobachteten Zeitlücke entsprechend unter 1,6 m/s.

Um Zwischenaktivitäten zu identifizieren, die durchgeführt werden ohne die Aufzeichnung der GPS-Daten zu unterbrechen, ist es sinnvoll, die momentane Geschwindigkeit näher zu untersuchen. Grundsätzlich kann die Geschwindigkeit aus zwei aufeinanderfolgenden GPS-Logs bestimmt werden. Da die GPS-Logs sekundenfein gesendet werden und die Koordinaten von ihrer tatsächlichen Lage bis zu 15 m abweichen, erfolgt eine Berechnung der aktuellen Geschwindigkeit aus den Werten der Vorgänger- und Nachfolgerposition. Dadurch wird eine Glättung der Geschwindigkeitswerte erreicht:

$$v_{i,\,glatt} = \frac{x_{i-1 \rightarrow i+1}}{t_{i+1} - t_{i-1}} \qquad (2)$$

mit:

$x_{i-1 \rightarrow i+1}$ [m]	Luftlinie zwischen den Vorgänger- und Nachfolger GPS-Logs des Punktes i, resultierend aus den Koordinaten
t_i [s]	Unixzeitstempel des i. GPS-Logs einer Trajektorie
$v_{i,glatt}$ [m/s]	Geglättete Geschwindigkeit des i. GPS-Logs einer Trajektorie

Für jede Trajektorie wird nun die Dauer der Zeitintervalle bestimmt, für welche die geglättete Geschwindigkeit weniger als 0,7 m/s beträgt. Ist das über eine Dauer von mehr als 300s der Fall, wird die Trajektorie an dieser Stelle geteilt und die GPS-Logs mit den niedrigen Geschwindigkeiten verworfen. Auf diese Weise können Zwischenaktivitäten identifiziert werden, deren Dauer mehr als 5 Minuten beträgt. Für das Erkennen von Zwischenaktivitäten mit einer kürzeren Dauer (z.B. Absetzen oder Abholen von Mitfahrern) wird als weitere Kenngröße der Umwegfaktor hinzugezogen. Für jeden GPS-Log werden dabei die Umwegfaktoren u_{750}, $u_{2.500}$ und $u_{5.000}$ zwischen denjenigen GPS-Logs berechnet, die jeweils 750 m, 2.500 m und 5.000 m vor bzw. nach dem betrachteten GPS-Log liegen. Die Entfernungsangaben beziehen sich in diesem Fall auf die Weglänge zwischen Vorgänger bzw. Nachfolger und dem aktuellen GPS-Log. Übersteigt der Umwegfaktor in einer der drei Kategorien für eine Dauer von 90 s einen kritischen Wert, wird auf diesem Teil der Trajektorie ein weiteres Mal die geglättete Geschwindigkeit v_{glatt} abgeprüft.

Liegt diese für mindestens 60 s unter 4 m/s, wird die Trajektorie an der Stelle mit der niedrigsten Geschwindigkeit geteilt. Bild 24 verdeutlicht das Vorgehen beispielhaft an einer Trajektorie. Das linke Diagramm zeigt den Verlauf des aktuellen Umwegs bezogen auf die Entfernung von 1.500 m in grau und den Verlauf der Geschwindigkeit in grün. Auf der rechten Seite ist der tatsächliche Verlauf der Trajektorie im

Lokalisierungsnetz visualisiert. Rot markiert sind jeweils diejenigen Bereiche, an denen die Umwegfaktoren über und die Geschwindigkeit unter den maßgebenden Grenzwerten liegen. Auf der rechten Seite ist die entsprechende Position im räumlichen Verlauf der Trajektorie gekennzeichnet.

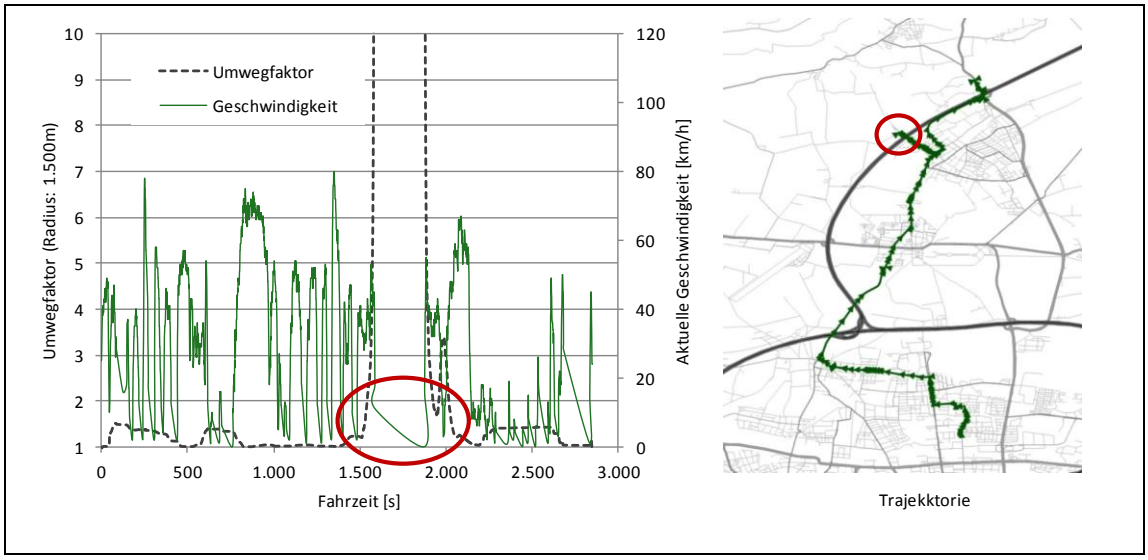


Bild 24: Verlauf der Umwegigkeit und der Geschwindigkeiten einer Trajektorie

Um die Wirksamkeit der angewandten Kriterien zu prüfen, wird für jede Zwischenaktivität protokolliert, welches Kriterium an entsprechender Stelle maßgebend ist. Tabelle 13 gibt einen Überblick wie oft jedes angewandte Kriterium wirksam ist.

Tabelle 13: Wirksamkeit der Kriterien

Maßgebendes Kriterium	**Anzahl identifizierter Zwischenaktivitäten**
Geschwindigkeitskriterium	6.385
Lückenkriterium	1.612
Umwegkriterium Gesamt	1.360
Umwegkriterium kurz (700 m Entfernung)	936
Umwegkriterium mittel (2.500 m Entfernung)	189
Umwegkriterium lang (5.000 m Entfernung)	235
Summe	9.357

Das Geschwindigkeitskriterium führt am häufigsten zum Auffinden von zusätzlichen Aktivitäten innerhalb einer Trajektorie. Hingegen werden mit dem Umwegkriterium am wenigsten Zwischenaktivitäten identifiziert. Darüber hinaus zeigt Tabelle 13, dass mit dem berechneten Umweg aller drei Entfernungen zusätzliche Wege gefunden werden. Unter Anwendung aller Kriterien werden insgesamt 9.357 Zwischenaktivitäten bestimmt. Die Zahl der Wege erhöht sich entsprechend gegenüber den detektierten Trajektorien. Tabelle 14 gibt einen Überblick über die identifizierten Wege. Insgesamt

werden etwa 27.500 Wege für 278 Probanden erhoben. Das entspricht einer durchschnittlichen Wegeanzahl von 1,8 Wegen pro Proband.

Tabelle 14: Identifizierte Wege

Datenvolumen		
	Summe aller Probanden	Pro Proband
Anzahl detektierter Trajektorien	20.000	72
Anzahl identifizierter Wege	27.500	98

Aus der Haushaltsbefragung MiD 2008 (vgl. [24]) ergibt sich ein Wert von 2,5 Wegen pro Tag mit dem Pkw für Personen aus ländlichen Regionen mit regelmäßiger Pkw-Nutzung. Geht man davon aus, dass die Probanden diesem Verhaltensmuster folgen, lässt sich schlussfolgern, dass ca. ein Drittel der Wege nicht erfasst wird. In Bild 25 sind die erfassten Wege pro Proband (GPS-Daten) und die durchschnittlichen Verkehrsaufkommen differenziert nach Wochentagen (MiD) gegenübergestellt. Es ist zu erkennen, dass die erhobenen Werte grundsätzlich unter den Werten aus MiD 2008 liegen. Dies ist zum einen mit dem Verlust von Daten bzw. technischen Störungen zu erklären und zum anderen ist davon auszugehen, dass nicht für jeden Weg mit dem Pkw das GPS-Gerät angeschaltet wird. Außerdem werden ausschließlich Trajektorien erfasst, die länger als fünf Minuten sind, da der Datenübertragungszyklus fünf Minuten beträgt. Darüber hinaus zeigt das Diagramm, dass sowohl die absolute Anzahl an erfassten Wegen als auch die Erfassungsrate an Wochentagen deutlich höher ist, als an den Wochenenden, da hier die aus den GPS-Daten resultierenden Werte deutlich näher an den Werten aus MiD 2008 liegen.

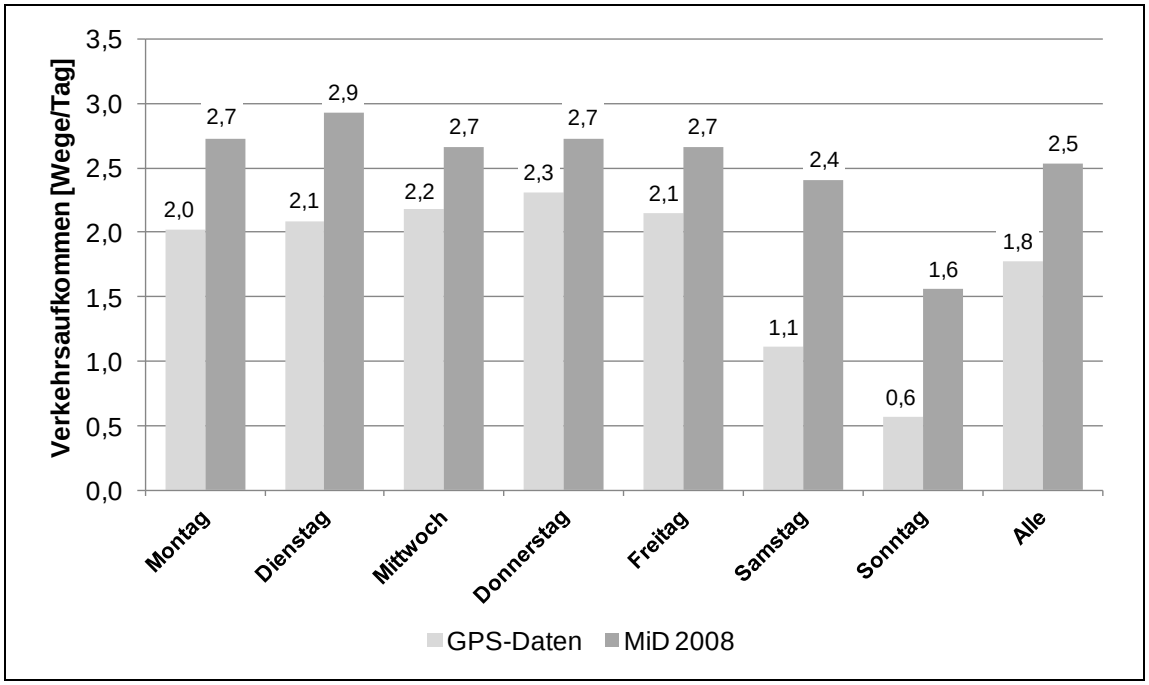


Bild 25: Verkehrsaufkommen differenziert nach Wochentag

3.3.2.1.2 Bestimmen der Fahrtzwecke

Für die Schätzung des Routenwahlverhaltens ist die Bestimmung der Aktivitäten zu Beginn und am Ende eines Weges von Bedeutung. In diesem Zusammenhang werden von den Probanden regelmäßig aufgesuchte Aktivitätenorte abgefragt und verortet (vgl. Kapitel 3.2.2.1). Zunächst werden personenspezifisch jedem Wegende alle aus der Online-Befragung verorteten Aktivitäten in einem Umkreis von 2.500 m zugeordnet. Dieser Wert wird unter dem Aspekt gewählt, dass die Versendung der Datenpakete in festen 5-Minuten Intervallen erfolgt. Das jeweils letzte angebrochene, unvollständige Datenpaket wird also nicht mehr versendet. Im schlechtesten Fall fehlen somit 299 s am Ende der aufgezeichneten Trajektorie. Mit einer angenommenen Luftliniengeschwindigkeit von 30 km/h würden in diesem Fall 2.500 m der Trajektorie verloren gehen. Zu Beginn des Weges gehen ebenfalls Daten verloren, da das GPS-Gerät nicht in jedem Fall einige Minuten vor dem Fahrtbeginn eingeschaltet wird. Um Datenverlust zu verhindern, wäre dies allerdings nötig, da der GPS-Empfänger einige Minuten für die korrekte Positionsbestimmung benötigt. Der Radius von 2.500 m ist somit sowohl für die Ziel- als auch für die Quellzuordnung sinnvoll.

Werden einem Wegende mehrere Aktivitätenorte zugewiesen, wird in Abhängigkeit von der Tageszeit, der Dauer der Quell- bzw. Zielaktivität und der bisher an diesem Tag aufgesuchten Aktivitätenorte eine Auswahl getroffen. Die Tageszeit bestimmt sich aus dem Unixzeitstempel, die Aktivitätendauer aus der Zeitspanne zwischen dem letzten und dem ersten gesendeten Unixzeitstempel zweier aufeinanderfolgender Wege. Kann keine Aktivität innerhalb des Radius zugordnet werden, wird die Quelle bzw. das Ziel als unbekannter Aktivitätenort markiert. In einem weiteren Schritt werden daraufhin alle als unbekannt eingestuften Aktivitätenorte eines Probanden, die innerhalb eines Radius von 2.500 m liegen zu einer unbekannten Aktivität zusammengefasst. Die Koordinaten dieser Aktivität werden als arithmetisches Mittel der Koordinaten der zugeordneten Wegeenden neu berechnet. Auf diese Weise werden zusätzlich 3.641 Aktivitätenorte identifiziert.

Eine Übersicht der zugeordneten Aktivitätenorte differenziert nach Art der Aktivität ist in Bild 26 enthalten. Die Kategorie "unbekannt" enthält ausschließlich zusätzlich identifizierte Orte. Da sich diese aus den Trajektorien ergeben ist jede dieser Orte mindestens einmal aufgesucht worden, d.h. war mindestens einmal Quelle bzw. Ziel einer erfassten Ortsveränderung. Es zeigt sich, dass für nahezu alle Probanden mindestens ein Wegende dem Arbeitsplatz bzw. dem Wohnort zugeordnet werden kann. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass Orte mit Aktivitäten, die nahezu täglich ausgeführt werden (täglicher Einkauf, Kinder bringen) zu einem höheren Anteil mindestens einmal aufgesucht worden sind, als Aktivitätenorte die tendenziell seltener durchgeführt werden. Eine Erklärung hierfür ist, dass etwa ein Drittel der Wege nicht erfasst wurde. Demzufolge sinkt im Falle von seltener aufgesuchten Aktivitätenorten, die Wahrscheinlichkeit der Erfassung mindestens einer der Wege, welche an diesem Ort enden bzw. beginnen.

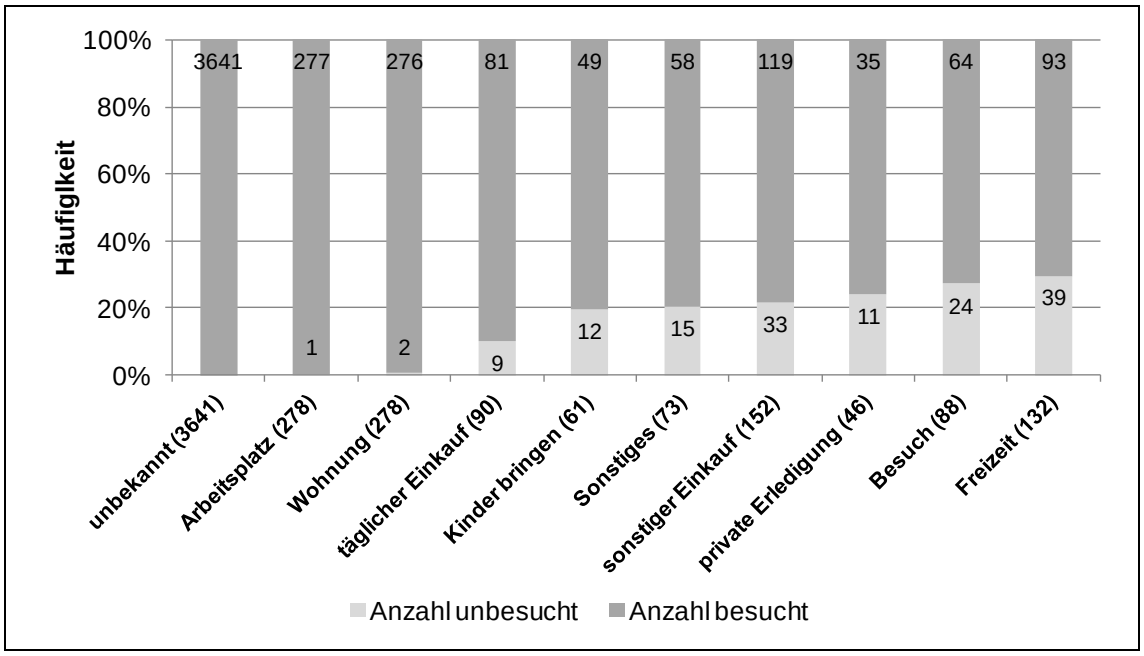


Bild 26: Benannte und zusätzlich identifizierte Aktivitätenorte

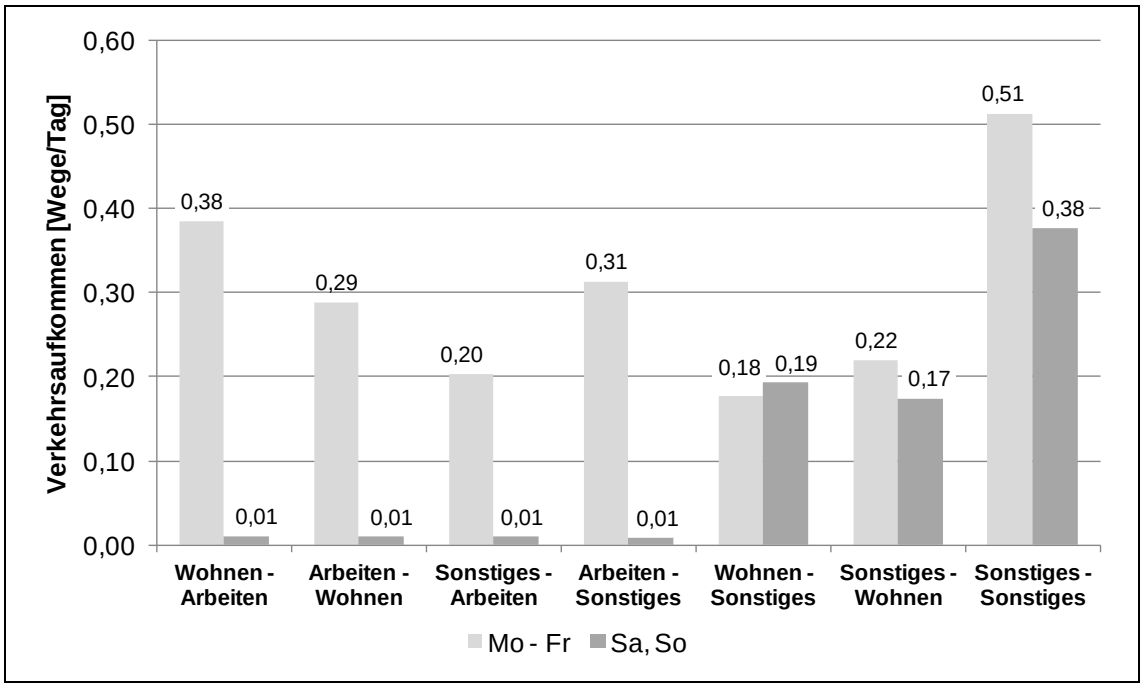


Bild 27: Verkehrsaufkommen nach Aktivitätenpaaren (Wege pro Tag und Proband)

Durch die Zuordnung der Quell- und Zielaktivitäten ergeben sich Wege mit unterschiedlichen Aktivitätenpaarungen. Das Diagramm in Bild 27 zeigt die durchschnittliche Häufigkeit der Wege am Tag differenziert nach Aktivitätenpaar und Wochentag bzw. Wochenende. Wie zu erwarten ist, werden arbeitsgebundene Wege fast ausschließlich an Wochentagen erfasst. Außerdem ist das typische

Verhaltensmuster erkennbar, dass Wege zur Arbeit tendenziell vom Wohnort starten, während Wege vom Arbeitsplatz startend eher zu einer sonstigen Aktivität führen.

Bild 28 zeigt die Tagesganglinien als den prozentualen Anteil der Wegeanzahl einer Stunde bezogen auf das Tagesaufkommen, differenziert nach Aktivitätenpaaren. Alle Aktivitätenpaare weisen hierbei in etwa den zu erwartenden typischen Verlauf auf: Wege mit dem Wohnort als Quelle finden mehrheitlich in den Morgenstunden statt, Wege mit dem Arbeitsplatz als Ausgangspunkt hingegen am Abend. Da die Probanden ausschließlich berufstätig sind, mit einem geringen Anteil Wechselschichtdienst (vgl. Bild 18, S. 45) und die Anzahl der Wege am Wochentag die Anzahl der Wege am Wochenende dominieren, ergeben sich typische Morgen- und Abendspitzen, während das Verkehrsaufkommen zwischen 9 und 15 Uhr wesentlich geringer ist.

Einen Vergleich der erhobenen Tagesganglinien mit den Daten aus Mobilität in Deutschland aus dem Jahre 2002 für die Aktivitätenpaare Wohnen - Arbeiten und Arbeiten - Wohnen ist in Bild 29 dargestellt. Es zeigt sich eine weitestgehend gute Übereinstimmung sowohl für den Abfahrtszeitpunkt (linke Seite) als auch für den Ankunftszeitpunkt (rechte Seite) beider Aktivitätenpaare. Für die Wege zwischen Arbeit und Wohnort ist gegenüber den MiD-Daten eine etwas spätere durchschnittliche Abfahrt und Ankunft zu erkennen.

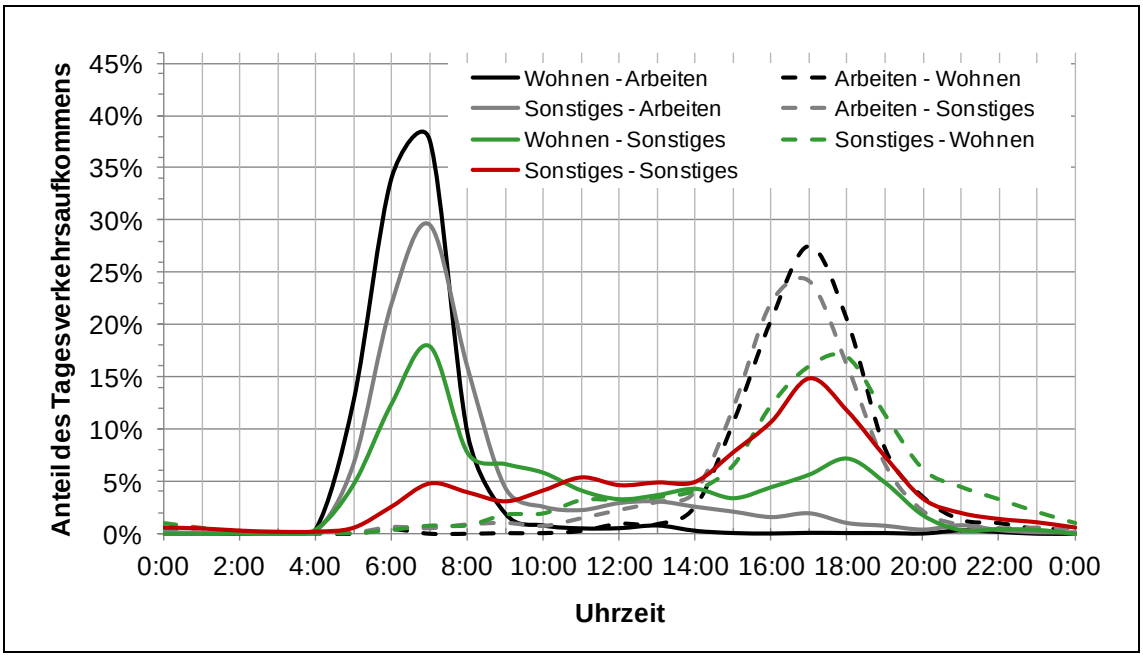


Bild 28: Tagesganglinien differenziert nach Aktivitätenpaaren

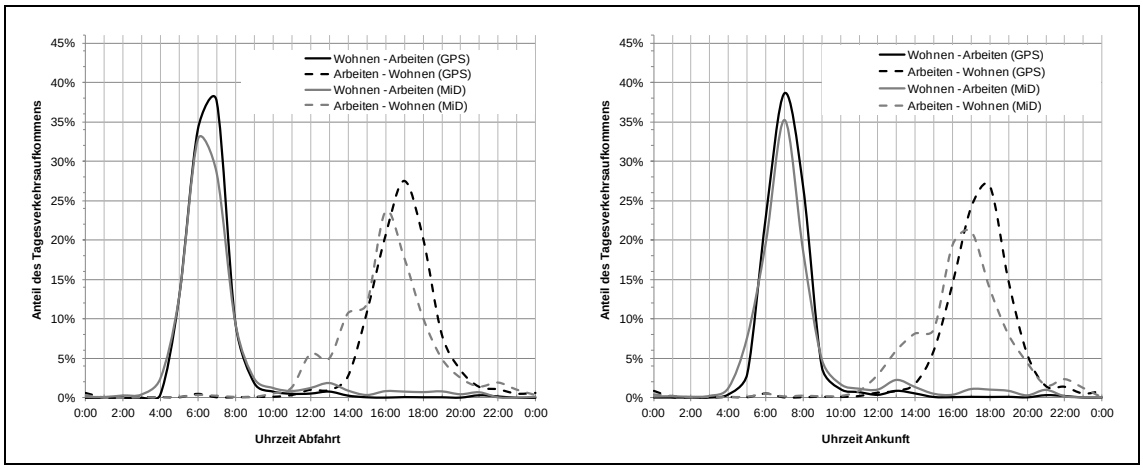


Bild 29: Tagesganglinien zwischen den Aktivitäten Wohnen und Arbeiten

Ein weiteres Indiz um sowohl die Vollständigkeit der Daten als auch die Richtigkeit der zugeordneten Aktivitätenorte zu überprüfen, ist die Untersuchung der erfassten Wegemengen. Insgesamt wurden 10.163 Probandentage, d. h. jeder Tag bezogen auf die einzelnen Probanden an dem mindestens ein Weg detektiert wurde, erfasst. Für etwa ein Viertel der Wege kann eine lückenlose Wegekette identifiziert werden, die sowohl am Wohnort beginnt als auch endet (vgl. Tabelle 15). Eine Wegekette gilt in diesem Zusammenhang als lückenlos, wenn für alle Wege eines Tages gilt, dass der Aktivitätenort am Ziel mit dem Aktivitätenort an der Quelle des nachfolgenden Weges übereinstimmt.

Tabelle 15: Vollständigkeit der Wegeketten

	Anzahl	**Anteil**
Probandentage gesamt	10.163	100 %
Probandentage mit einem detektierten Weg	1.772	17 %
Probandentage mit mehr als einem detektierten Weg	8.391	83 %
Probandentage mit erster Quelle und letztem Ziel am Wohnort	3.805	37 %
Probandentage mit lückenloser Wegekette	5.565	55 %
Probandentage mit lückenloser Wegekette mit Quelle und Ziel am Wohnort	2.611	26 %

In Bild 30 sind die Anzahl aller Überfahrungen resultierend aus den erhobenen Wegen und die Aktivitätenorte dargestellt. Es ist gut erkennbar, dass der Anteil der überfahrenen Strecken sowohl auf dem Hautstraßennetz als auch im untergeordneten Netz sehr hoch ist. Wie zu erwarten, zeigen sich hohe Befahrungszahlen auf den Autobahnabschnitten nördlich von München. Der Abschnitt der A9 zwischen den Autobahnkreuzen Neufahrn und München-Nord ist hierbei mit zum Teil 4.200 Überfahrungen der am häufigsten durch die Probanden befahrene Streckenzug.

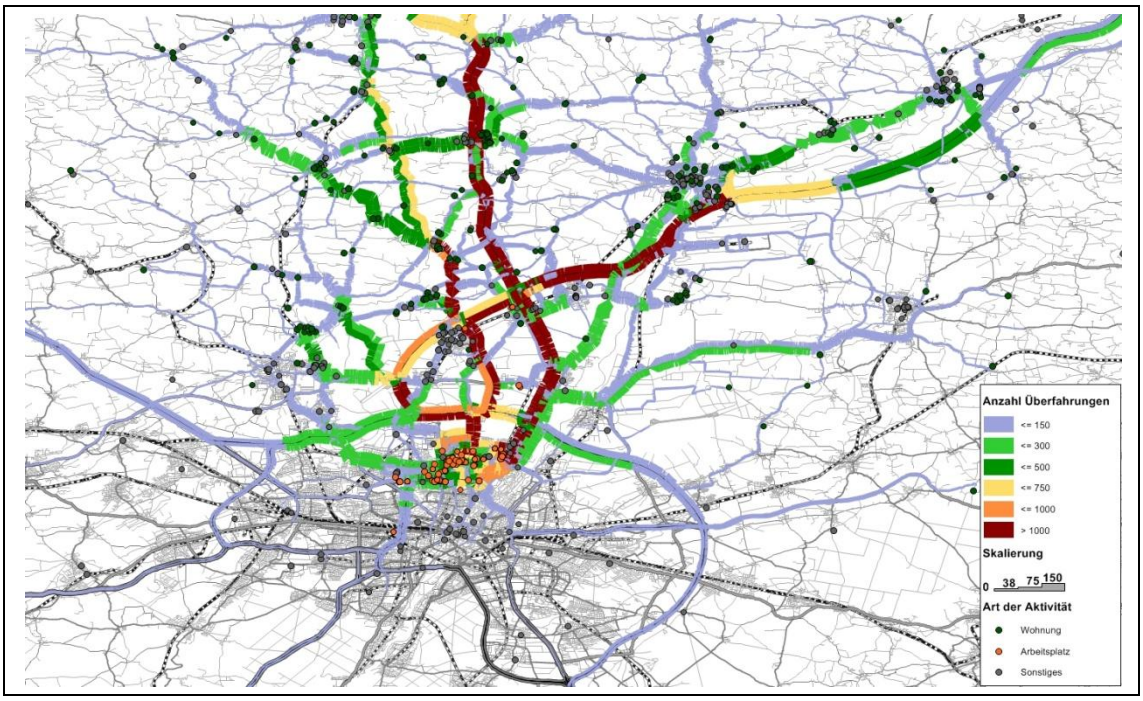


Bild 30: Untersuchungsgebiet mit GPS-Trajektorien und Aktivitätenorten

3.3.2.1.3 Filtern der Wege

Um sicherzustellen, dass für die Schätzung des Routenwahlmodells ausschließlich plausible und hinsichtlich der zu untersuchenden Einflussfaktoren tatsächlich verwertbare Wege verwendet werden, ist die Anwendung verschiedener Filterkriterien notwendig.

Im ersten Schritt werden Wege verworfen, deren Länge innerhalb des Projekt- bzw. Lokalisierungsnetzes weniger als 5 km beträgt. Dies erfolgt vor dem Hintergrund, dass die Zuordnung der Quellen und Ziele nur mit einer Ungenauigkeit von 2.500 m erfolgen kann. Für Wege, die kürzer sind als 5 km, können sich demzufolge tatsächlich erfasste Wegeverläufe ergeben, die in Relation zur Luftlinienentfernung der zugeordneten Aktivitäten extrem kurz sind. Der Anteil des Weges, über den keine sichere Aussage zu treffen ist, weil er nicht erfasst wurde, wäre in diesem Fall sehr hoch. Um eine Verfälschung der Routenwahlschätzung zu vermeiden, werden diese kurzen Wege daher verworfen. Da eine Vielzahl der kurzen Wege größtenteils im Nebennetz stattfindet und nicht auf dem Hauptstraßennetz, welches im Fokus des Forschungsprojektes steht, ist der erwartete Einfluss dieser kurzen Wege auf die relevanten Forschungsergebnisse ohnehin gering.

Zwei weitere Kriterien betreffen die zugeordneten Aktivitätenorte. Zum einen werden alle Wege verworfen, deren Aktivitätenort an Quelle und Ziel identisch ist, um Rundwege auszuschließen. Zum anderen werden als Quelle und Ziel nur solche Aktivitätenorte zugelassen, die entweder im Fragebogen benannt wurden oder die

mindestens einmal einem Wegende zugeordnet wurden, das nicht auf einer Autobahn liegt. Damit wird verhindert, dass Trajektorien, die aufgrund von technischen Störungen bzw. Übertragungsfehlern, auf Autobahnen beginnen oder enden, als Weg mit unbekanntem Aktivitätenort an diesem entsprechenden Start bzw. Endpunkt in die Schätzung eingehen.

Zudem sollen ausschließlich Wege in Betracht gezogen werden, bei denen das Map-Matching einen plausiblen Routenverlauf hinsichtlich der daraus resultierenden Geschwindigkeiten ergibt. Hierfür werden für alle Wege die mitgelieferten Comment-Dateien geprüft und diejenigen Wege verworfen, deren Comment-Datei einen Hinweis auf unplausibel hohe Geschwindigkeiten (> 250 km/h) enthält.

Darüber hinaus werden nur solche Wege beibehalten, deren Zuordnung der Aktivitätenorte einen Umwegfaktor bezogen auf die Luftlinienentfernung der Aktivitätenorte von kleiner als 2 aufweisen und die an mindestens zwei Stellen Knoten des Projektnetzes überfahren. Für Wege die ausschließlich auf dem Lokalisierungsnetz liegen, sind ausschließlich statische Daten verfügbar. Somit sind diese für die anstehende Routenwahlschätzung vernachlässigbar.

Tabelle 16: Filterkriterien für Wege

Filterkriterium	Anzahl verworfener Wege	Anzahl Wege nach Anwendung des Filterkriteriums
Wege gesamt		27.500
Länge < 5 km	6.915	20.585
Weniger als 2 Knoten sind Teil des Projektnetzes	51	20.534
Zugeordnete Quelle und Ziel sind identisch	83	20.451
Zugeordnete Quelle und Ziel liegen auf Autobahn	3.606	16.845
Routenverlauf führt zu unplausiblen Geschwindigkeiten	70	16.775
Weitere Kriterien	737	16.037

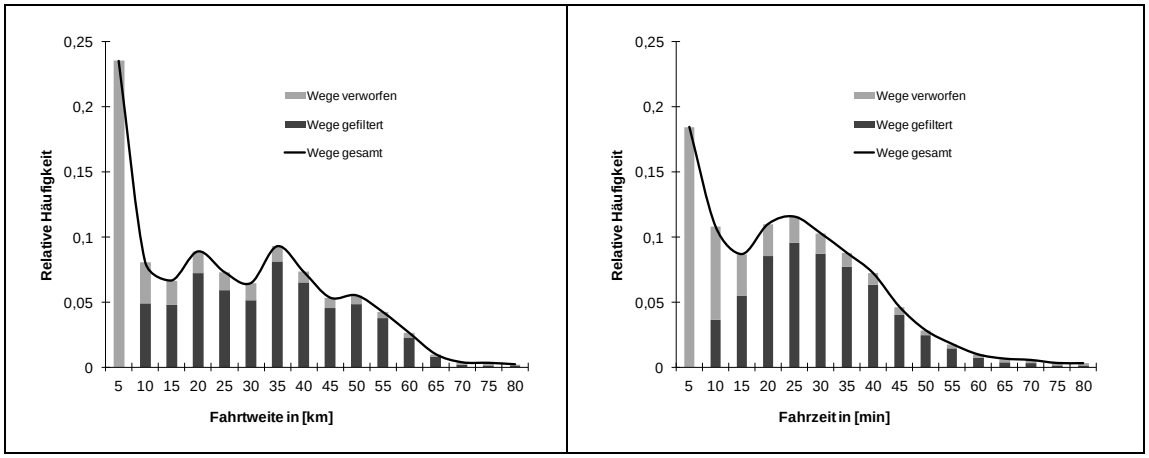


Bild 31: Fahrtweiten- und Fahrtzeitenverteilung vor und nach dem Filtern

Tabelle 16 fasst nochmals alle angewandten Filterkriterien und die daraus resultierende Anzahl verworfener Wege zusammen. Das wirksamste Kriterium ist hierbei das Längenkriterium. Dies spiegelt sich entsprechend in der resultierenden Verteilung der Fahrtweiten und Fahrtzeiten, dargestellt in Bild 31, wieder. Die Darstellung der Verteilung zeigt ebenfalls, dass der Anteil der wegfallenden Wege mit zunehmender Weite und Dauer abnimmt.

Nach Anwendung der Filterkriterien verbleiben 16.037 Wege auf 4.100 Relationen (siehe Tabelle 17). Somit verbleiben etwa 60 % der Wege und 45 % der Relationen. Es fallen tendenziell Relationen weg, auf denen wenige Ortsveränderungen durchgeführt werden, was vor allem mit dem auf die Aktivitätenorte angewandten Filterkriterium zu begründen ist (vgl. Tabelle 16). Die durchschnittliche Anzahl der Befahrungen pro Relation steigt entsprechend von 2,9 auf 3,8 nach dem Filtern.

Tabelle 17: Resultierendes Mengengerüst

	Erhoben bzw. ermittelt	Verbleibend nach Filtern
Anzahl Wege	27.500	16.037
Anzahl Aktivitätenorte	4.829	2.491
Anzahl befahrene Relationen	9.420	4.100

3.3.2.1.4 Vervollständigen der Wege

Die bisherigen Aufbereitungsschritte beziehen sich hauptsächlich auf das Mengengerüst und die Zuordnung der Aktivitätenorte. Die entstehenden Wege beginnen/enden somit bisher auf dem Anfangs- bzw. Endknoten der ersten/letzten Strecke für die ein GPS-Log zugeordnet wurde. Es wurde bereits erläutert, dass der tatsächliche Startpunkt und Endpunkt entsprechend vor dem ersten bzw. nach dem letzten GPS-Logs liegt. Vor diesem Hintergrund ist es sinnvoll, für jeden Aktivitätenort günstige Zugangs- bzw. Anbindungsknoten zu definieren und alle Wege, die an diesem Aktivitätenort beginnen bzw. enden, dorthin zu verlängern.

Bestimmen der Zugangsknoten

Zunächst wird für den jeweiligen Aktivitätenort jeder erste bzw. letzte Knoten auf dem Projektnetz eines zugeordneten beginnenden bzw. endenden Weges als potentieller Zugangsknoten angesehen. Auf diese Weise entstehen 9.700 Zugangsknoten (vgl. Tabelle 18). Derjenige potentielle Zugangsknoten, der die geringste Luftlinienentfernung zum Aktivitätenort aufweist, wird als erster Zugangsknoten festgelegt. Nun wird für jeden weiteren potentiellen Zugangsknoten geprüft, ob der Aktivitätenort über einen bereits vorhandenen Zugangsknoten unter Berücksichtigung

eines akzeptablen Umwegfaktors erreichbar ist. Der Umwegfaktor berechnet sich dabei wie folgt:

$$u_{2\to 1} = \frac{x_{kurz,\,2\to 1} + l_1}{l_2} \qquad (3)$$

mit:
- $u_{2\to 1}$ Resultierender Umwegfaktor, wenn Aktivitätenort von Knoten 2 über Knoten 1 angefahren wird
- l_1 [m] Luftlinienentfernung zwischen Zugangsknoten 1 und Aktivitätenort
- l_2 [m] Luftlinienentfernung zwischen Zugangsknoten 2 und Aktivitätenort

Der Umwegfaktor wird für den aktuell untersuchten Zugangsknoten über jeden bereits vorhandenen Zugangsknoten bestimmt. Liegt der minimale resultierende Umwegfaktor über 1,6, wird der aktuell untersuchte Zugangsknoten zur Menge der vorhandenen Zugangsknoten hinzugefügt. Liegt der Umwegfaktor darunter, wird der aktuelle Zugangsknoten und somit alle entsprechenden Wegeenden dem bereits vorhandenen Zugangsknoten mit dem minimal resultierenden Umwegfaktor zugeordnet. Mit diesem Vorgehen kann die durchschnittliche Anzahl der Zugangsknoten pro Aktivitätenort von 3,9 auf 1,9 reduziert werden (vgl. Tabelle 18).

Tabelle 18: Anbindungen

	Vor Reduzierung	Nach Reduzierung	Differenz
Anzahl absolut	9.700	4.666	5.034
Durchschnittliche Anzahl je Aktivitätenort	3,9	1,9	2,0

Behandlung der Wegeenden

Im nächsten Schritt müssen die Enden des Weges so behandelt werden, dass jeder Weg an einem Zugangsknoten der Aktivitätenorte beginnt bzw. endet. Dazu wird für jedes Wegende geprüft, ob ein Zugangsknoten bereits Teil des Routenverlaufs ist. Werden mehrere Zugangsknoten überfahren, wird bei einem zielseitigen Wegende derjenige gewählt, der als letztes überfahren wird bzw. bei einem quellseitigen Ende derjenige, der als erstes überfahren wird (vgl. Beispiel in Bild 32). Das verbleibende Wegende vor bzw. nach dem zugeordneten Zugangsknoten wird entsprechend verworfen. Enthält der Routenverlauf hingegen keinen bereits definierten Zugangsknoten, wird der erste bzw. letzte Knoten auf dem Projektnetz bestimmt. Dieser Knoten hat als potentieller Zugangsknoten einen zugeordneten Zugangsknoten über den der Aktivitätenort günstig zu erreichen ist. Das verbleibende Wegende vor bzw. nach diesem Knoten wird wiederum verworfen und das Wegende vom potentiellen Zugangsknoten zum zugeordneten Zugangsknoten auf dem Kurzweg verlängert. Das Verwerfen von Wegeenden, die ausschließlich auf dem

Lokalisierungsnetz verlaufen, kann hinsichtlich der dynamischen Attributierung als unproblematisch eingestuft werden, da hierfür ausschließlich statische Attribute vergeben werden können, welche sich dann letztendlich in den Attributen der Anbindung zwischen Zugangsknoten und Aktivitätenort wiederfinden.

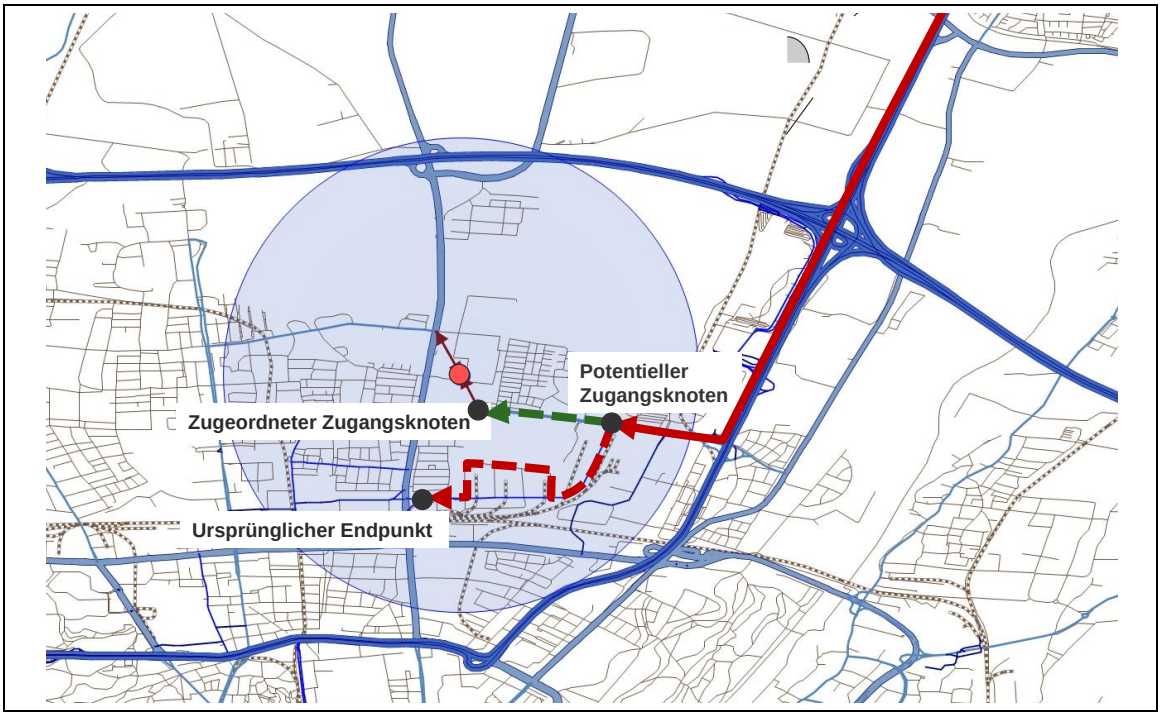


Bild 32: Vervollständigen der Wegeenden

Das beschriebene Vorgehen ist in Bild 32 nochmals an einem Beispiel verdeutlicht. Dargestellt ist der Verlauf einer Trajektorie in rot. Strecken die Teil des Projektnetzes sind, sind blau dargestellt. Der letzte Knoten auf dem Projektnetz ist nun der potentielle Zugangsknoten. Das heißt, das ausschließlich auf dem Lokalisierungsnetz verlaufene Trajektorienende, hier rot gestrichelt dargestellt, wird verworfen. Vom potentiellen Zugangsknoten wird das Wegende bis zum zugeordneten Zugangsknoten verlängert (grün dargestellt).

Das Reduzieren der Anzahl der Zugangsknoten und das Vervollständigen der Wegeenden kann anhand der Veränderungen der Überfahrungen der Strecken verdeutlicht werden. Bild 33 zeigt die Belastung (grün dargestellt) resultierend aus den zugeordneten Wegen eines Aktivitätenortes (orange dargestellt). Die Zahl der Anbindungen wird in diesem Fall auf drei Anbindungen reduziert. In näherer Umgebung des Aktivitätenortes entfallen einige Überfahrungen im Nebennetz (entspricht den Strecken, die ausschließlich im Lokalisierungsnetz enthalten sind), während die Anzahl der Überfahrungen im Hauptstraßennetz (Projektnetz) aufgrund der Verlängerung der Wegenden steigt. Die Zusammensetzung der so entstehenden Menge der Fahrzeugkilometer ist in Tabelle 19 zusammengefasst.

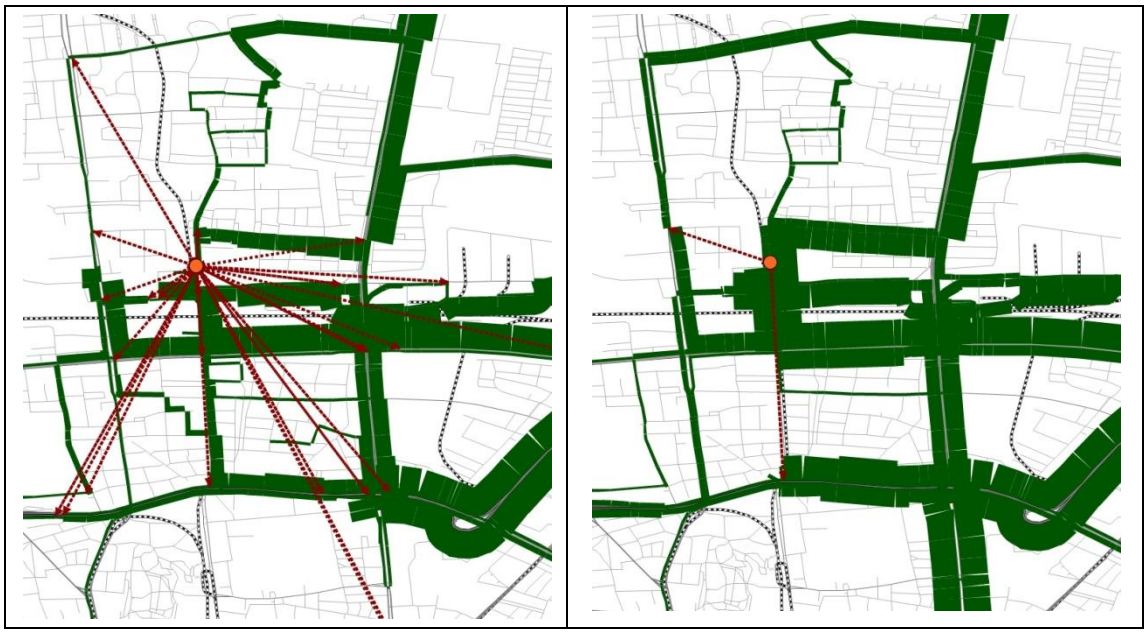


Bild 33: Zugangsknoten an Wegeenden

Tabelle 19: Fahrzeugkilometer nach Ergänzung der Wegeenden

Fahrzeugkilometer resultierend aus den erhobenen Routenverläufen		
Streckenmenge	**Absolut**	**Anteil**
Überfahrene Strecken	508.008	84 %
Ergänzte Strecken	58.843	10 %
Anbindung	40.393	6 %
Gesamt	607.244	100 %

Anbindungszeiten setzen

Um eine adäquate Attributierung der Routen für die spätere Schätzung des Routenwahlmodells sicherzustellen, sind die Anbindungszeiten, d. h. die Zeiten zwischen Zugangsknoten und Aktivitätenort, möglichst realistisch zu setzen. Dies ist vor allem vor dem Hintergrund zu betrachten, dass die Anbindungen den Zugangsweg vom Aktivitätenort über das Lokalisierungsnetz auf das Projektnetz repräsentieren. Dazu werden die Anbindungen zunächst in Abhängigkeit ihrer Lage in drei Kategorien eingeteilt. Bild 34 verdeutlicht diese Einteilung. Unterschieden wird nach Anbindungen außerhalb des Projektnetzes (blau dargestellt), innerhalb des Projektnetzes, jedoch außerhalb des Lokalisierungsnetzes (rot dargestellt) und innerhalb des Lokalisierungsnetzes (grün dargestellt).

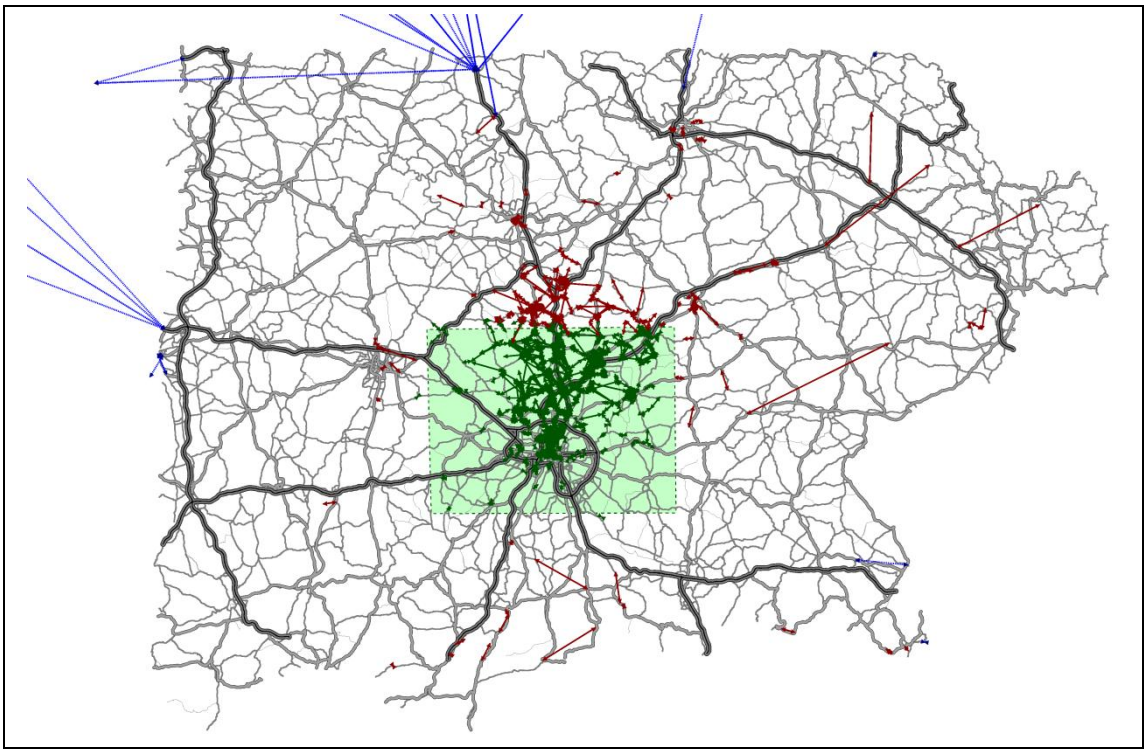


Bild 34: Kategorien der Anbindungen in Abhängigkeit der Lage

Für die Anbindungen außerhalb des Projektnetzes ergibt sich die Anbindungszeit direkt aus der Differenz des ersten/letzten Unixzeitstempels des Weges und dem Unixzeitstempel am Zugangsknoten aus dem Trajektorienverlauf. Ist die Anbindung mehr als einmal überfahren worden, wird entsprechend ein Mittelwert gebildet.

Für Anbindungen innerhalb des Projektnetzes aber außerhalb des Lokalisierungsnetztes werden die 10 nächstgelegenen Knoten auf dem Projektnetz für den jeweiligen Aktivitätenort bestimmt. Für jeden Zugangsknoten wird ein Kurzweg auf dem Projektnetz zu jedem dieser 10 Knoten gesucht und der entstehende Umwegfaktor bestimmt, wenn der Aktivitätenort über diesen Knoten aufgesucht wird (vgl. Formel auf Seite 63). Ist der minimale Umwegfaktor kleiner als 1,6, setzt sich die Anbindungszeit aus der t_0-Fahrzeit des Kurzweges zwischen Zugangsknoten und Knoten und der Fahrzeit resultierend aus der Luftlinienentfernung des zugeordneten Knotens zum Aktivitätenort zusammen. Ist der Umwegfaktor größer als 1,6 ergibt sich die Anbindungszeit direkt aus der Luftlinienentfernung zwischen betrachtetem Zugangsknoten und Aktivitätenort. Die Fahrzeit resultierend aus der Luftlinienentfernung wird wie folgt berechnet (vgl. Galster [22]):

$$t_b = 3{,}32 \cdot x_{Anb}^{\,0{,}82} \qquad (4)$$

mit: t_b [min] Fahrzeit im belasteten Netz

x_{Anb} [s] Anbindungslänge

Für die Anbindungen, welche innerhalb des Lokalisierungsnetzes liegen, ergibt sich ein analoges Vorgehen: Für jeden Aktivitätenort werden in diesem Fall die zehn nächsten Knoten auf dem Lokalisierungsnetz gesucht und die Kurzwegsuche findet entsprechend auf dem Lokalisierungsnetz statt. Die resultierende Anbindungszeit ergibt sich aus analogem Kriterium und Formel.

3.3.2.1.5 Abbilden der Wege auf dem Projektnetz

Die im Lokalisierungsnetz vorliegenden Wege werden in einem abschließenden Schritt in das Projektnetz übertragen. Dies geschieht vor dem Hintergrund, dass die später zu vergebenen dynamischen Attribute auf dem Projektnetz vorliegen und der Netzumgriff vom Projektnetz größer als der des Lokalisierungsnetzes ist. Eine direkte Übertragung vom hochaufgelösten Lokalisierungsnetz ins Projektnetz ist lediglich für denjenigen Teil der Trajektorien möglich, der vollständig auf der Menge der Strecken liegt, die sowohl im Lokalisierungsnetz als auch im Projektnetz enthalten sind.

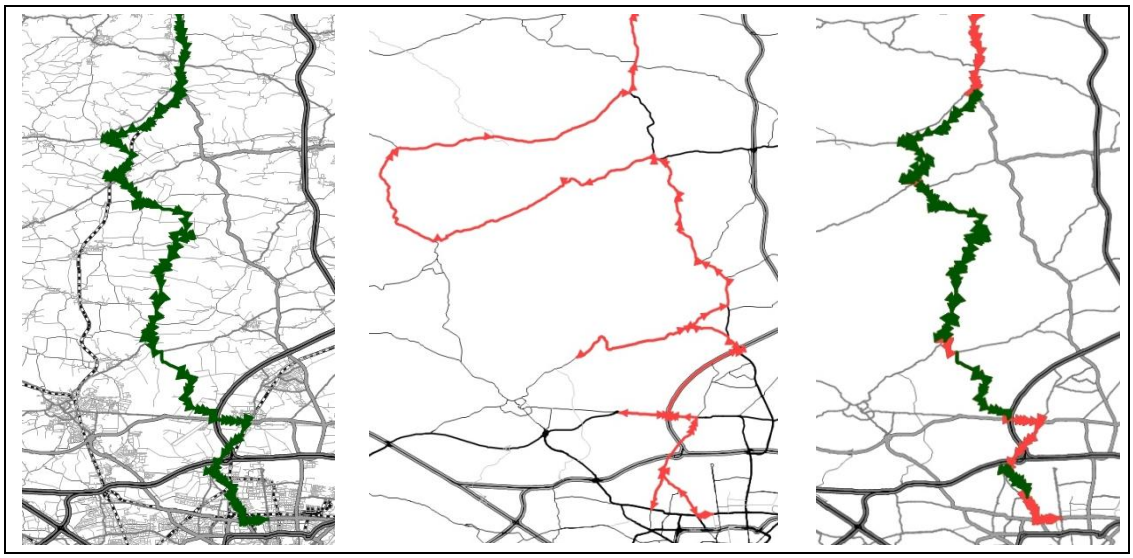


Bild 35: Transformation vom Lokalisierungsnetz ins Projektnetz

Ein komplettes Übertragen der Trajektorien in das Projektnetz mittels Kurzwegsuche würde für einen Teil der Trajektorien zu unplausiblen Wegeverläufen führen. In Bild 35 ist diese Problematik an einer beispielhaften Trajektorie verdeutlicht. Das linke Bild zeigt den Verlauf der Trajektorie in grün. Würde man bei einer Transformation in das Projektnetzt ausschließlich die auch im Projektnetz liegenden Wegelemente übertragen und zur Ergänzung eine Kurzwegsuche auf dem Projektnetz durchführen, ergäbe sich der in der Mitte dargestellte, rot eingefärbte Verlauf. Daher werden die sich ausschließlich im Lokalisierungsnetz befindlichen Teile der Trajektorien beibehalten (siehe rechtes Bild, grün eingefärbt) und im Wegeverlauf mit einem entsprechenden Attribut versehen. Die Streckenmenge des Projektnetzes wird dadurch prinzipiell vergrößert. Allerdings sind für diesen ergänzten Teil ausschließlich statische Attribute

vorhanden. Die transformierte Wegemenge enthält nach diesem Vorgehen etwa 10.000 verschiedene Strecken aus dem Lokalisierungsnetz. Tabelle 20 zeigt nochmals die Anteile der Fahrzeugkilometer differenziert nach der Streckenart, die dabei überfahren wird. Demnach wird ein Großteil der Fahrzeugkilometer auf dem Projektnetz zurückgelegt, was hinsichtlich der dynamischen Attributierung positiv zu bewerten ist.

Tabelle 20: Anteile der Fahrzeugkilometer auf Lokalisierungsnetz und Projektnetz

Streckenmenge	Absolut	Anteil
Projektnetz	545.422	90 %
Lokalisierungsnetz	21.429	4 %
Anbindung	40.393	6 %
Gesamt	607.244	100 %

3.3.3 Aufbau Verkehrsmodell

Im Rahmen des AP 3 erfolgt durch die Universität Stuttgart der Aufbau eines Verkehrsmodells für das Untersuchungsgebiet. Dies wird zum einen als Grundlage für ein vereinfachtes Projektnetz genutzt, um für die Schätzung des Routenwahlmodells im AP 4 die Alternativrouten der Choice Sets zu erstellen. Zum anderen dient es der Ermittlung verschiedener Verkehrszustände für typische beobachtete Nachfragesituationen in AP 5, sowie der Anwendung des Routenwahlmodells aus AP 4.

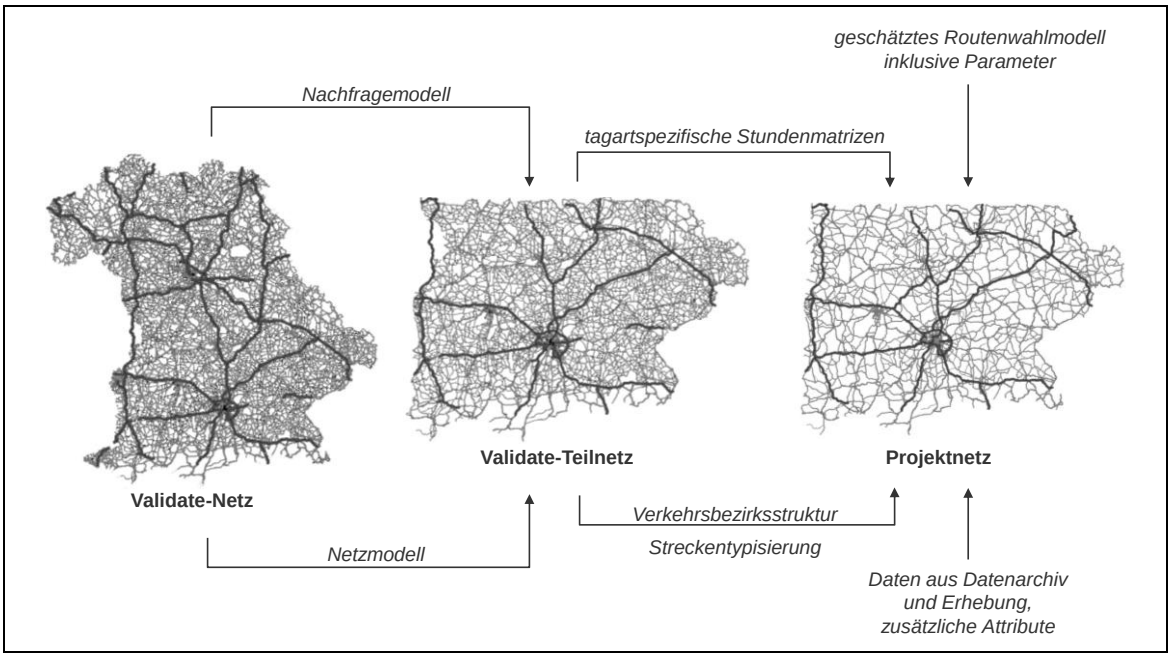


Bild 36: Methodik zum Aufbau des Verkehrsmodells

Grundlage für die Erstellung des Verkehrsmodells ist das von der PTV AG zur Verfügung gestellte Modell PTV-Validate. Aus diesem wird zunächst ein Teilnetz im Umfang des Projektnetzes herausgeschnitten. Die Nachfragedaten inklusive Verkehrszellenstruktur aus dem Validate-Teilnetz werden daraufhin auf das Projektnetz übertragen und anhand der erhobenen GPS- und Kameradaten und den Daten aus der VIB kalibriert und validiert (vgl. Bild 36).

3.3.3.1 Modellierung Verkehrsangebot

Die Basis des Verkehrsnetzmodells bildet das aus dem INREST-Netz der VIB entstandene Projektnetz (vgl. Snethlage et al. [41]). Dieses enthält zunächst wesentliche Attribute wie freie bzw. zulässige Höchstgeschwindigkeit, Anzahl der Fahrstreifen, überschlägige Kapazitäten und eine Einteilung der Strecken in fünf Straßenklassen. Anhand dieser Eckwerte kann die im Validate-Netz vorhandene, detailliertere Streckentypisierung auf das Projektnetz übertragen werden. Im Zusammenhang mit der Streckentypisierung erfolgt eine Übernahme der sogenannten Capacity-Restraint-Funktionen (CR-Funktionen), die im Validate-Netz streckentypspezifisch definiert sind. CR-Funktionen beschreiben den Zusammenhang zwischen freier Reisezeit (t_0), aktueller Reisezeit (t_{akt}) und Auslastung (q) und sind daher maßgebend für die Umlegungsrechnung. Für das Verkehrsmodell werden ausschließlich Funktionen vom Typ BPR-1 verwendet, die sich je nach Streckentyp in ihren Parameterwerten unterscheiden:

$$t_{akt} = t_0 \cdot \left(1 + a \cdot \left(\frac{q}{q_{\max} \cdot c} \right)^b \right) \tag{5}$$

mit:	t_{akt} [s]	Aktuelle Reisezeit im belasteten Netz
	t_0 [s]	Reisezeit im unbelasteten Netz
	q [Fzg/h]	aktuelle Belastung
	a, b, c	Streckentypspezifische Parameter der Funktion
	q_{max} [Fzg/h]	Kapazität der Strecke

Um eine möglichst hohe Modellqualität zu erreichen, wird durch die Technische Universität München (vgl. Busch et al. [13]) bzw. die Autobahndirektion Südbayern (vgl. Riess et al. [34]) für das Testfeld im Münchener Norden eine differenziertere Betrachtung der Streckenkapazitäten vorgenommen und in das Projektnetz übertragen. Für das Autobahnnetz werden diese auf Basis der vorhandenen Zählstellen mittels q-v-Diagramm neu bestimmt. Dies wird sowohl für die Bereiche der Autobahnkreuze und -Dreiecke, die Auf- und Ausfahrten als auch für den Bereich der freien Strecken durchgeführt. Dazu werden die erhobenen Werte der Zählstellen für

den Zeitraum vom 01.01.2009 bis zum 31.08.2009 in 30-Minuten-Intervalle aggregiert, in ein q-v-Diagramm eingetragen und die Werte für die Kapazität abgelesen. In Bild 37 sind die sich daraus ergebenen Änderungen bezogen auf die ursprünglich angenommene Kapazität für die betreffenden Streckenabschnitte dargestellt. Es lässt sich feststellen, dass die Kapazitäten an den Zufahrten durch die genauere Betrachtung eher abgenommen (rot eingefärbt) und auf der freien Strecke zugenommen (grün eingefärbt) haben.

Bild 37: Detaillierte Kapazitätsbetrachtung auf Autobahnen

Darüber hinaus werden für die innerstädtischen Knotenpunkte im Norden Münchens in Abhängigkeit von der Tagart (Mo, Di-Do, Fr, So, Sa) und der Tageszeit (stundenfein) die Kapazitäten nach HBS bestimmt. Die benötigten Verkehrsströme werden hierbei den Detektordaten entnommen, für die lichtsignalgesteuerten Knotenpunkte werden die entsprechenden Lichtsignalanlagenprogramme hinzugezogen. Bild 38 zeigt die Strecken, auf denen sich infolge dieser Betrachtung stundenfeine Kapazitäten ergeben. Diese sind im dargestellten Streckennetz grün markiert. Orange markiert sind die betrachteten Knotenpunkte. Die differenzierte Kapazitätsuntersuchung liefert als Ergebnis darüber hinaus zum Teil stundenfeine Kapazitäten für die einzelnen Ströme innerhalb eines Knotenpunktes. Diese werden als Attribute an den Abbiegerbeziehungen verwaltet und können so in die späteren Berechnungen mit einfließen. Hinsichtlich der Attributierung der Routen und der Anwendung des Routenwahlmodells auf dem Netz werden außerdem die im Raum München vorhandenen Wechselwegweisungen, die möglichen Standstreifenfreigaben und die dynamischen Geschwindigkeitsanzeigen als streckenbezogene Attribute im Netzmodell hinterlegt (vgl. Bild 39).

Bild 38: Detaillierte Kapazitätsbetrachtung im Norden Münchens

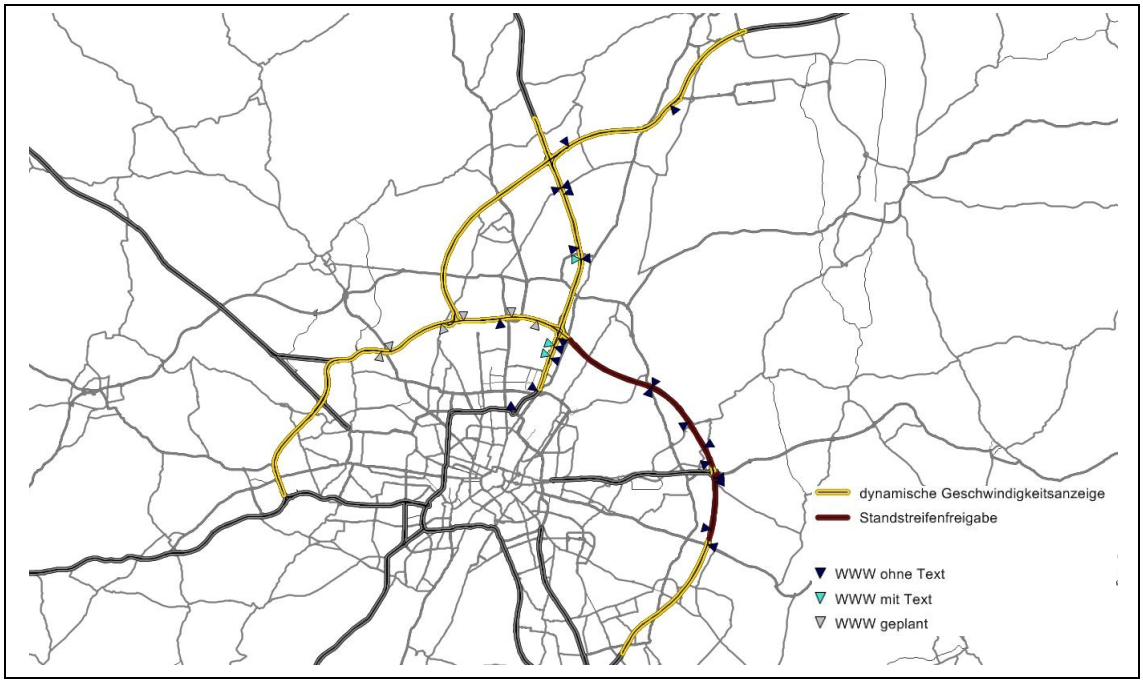


Bild 39: Standstreifenfreigabe und Wechselwegweisung

In einem weiteren Schritt werden die Verkehrsbezirke und die Anbindungen vom Validate-Netz in das Projektnetz übertragen. Da das Validate-Netz einen höheren Detaillierungsgrad als das Projektnetz aufweist, werden zu einem großen Teil die Zugangsknoten im Netz neu definiert. Bild 40 verdeutlicht die Unterschiede in der Auflösung beider Netze für den Ausschnitt im Raum München. Auf dem linken Bild sind im Validate-Netz diejenigen Strecken rot eingefärbt, die im Projektnetz nicht vorhanden

sind. Die im Validate-Netz angewandte Philosophie, Zugangsknoten möglichst im untergeordneten Netz zu definieren, wird im Projektnetz ebenfalls verfolgt. Aufgrund des teilweise fehlenden untergeordneten Netzes ist die Anzahl der Anbindungen allerdings zurückgegangen, da oft mehrere Knoten dem identischen nächstgelegenen Knoten auf der nächsthöheren Netzebene zugeordnet werden (vgl. Tabelle 14).

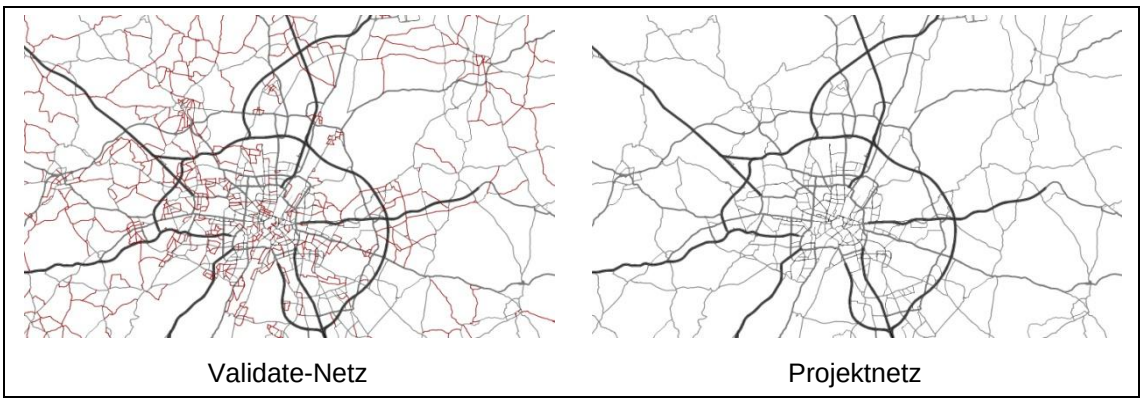


Bild 40: Netzauflösung Validate-Netz und Projektnetz

Tabelle 21: Enthaltene Bezirke und Anbindungen

Bezirke und Anbindungen		
	Validate-Netz	**Projektnetz**
Anzahl Bezirke (ohne Kordonbezirke)	629	629
Anzahl Anbindungen	3.867	2.086
Anzahl Anbindungen pro Bezirk	6,1	3,3

3.3.3.2 Modellierung Verkehrsnachfrage

Das Validate-Modell liefert grundsätzlich stundenfeine Nachfragematrizen differenziert für die Tagarten Montag, Dienstag bis Donnerstag, Freitag, Samstag und Sonntag. Für die Erstellung typischer Verkehrszustände werden nun je eine Matrix aus Früh- und Abendspitze und der Nebenverkehrszeit je Tagart auf das Projektnetz übertragen. Dazu wird aus dem Validate-Netz ein Teilnetz ausgeschnitten, welches vom Umfang exakt dem Projektnetz entspricht. An jedem Randknoten des Netzes, an dem Verkehr eingespeist wird, werden bei diesem Vorgang Kordonbezirke erzeugt, um den Quell-, Ziel- und Durchgangsverkehr bezüglich des Untersuchungsgebietes korrekt abzubilden. Die Verkehrsströme zwischen den so entstandenen Kordonbezirken und den bereits im Teilnetzt bestehenden Verkehrsbezirken resultieren aus der Querschnittbelastung auf der entsprechenden Eingangsstrecke und den Anteilen dieses Stromes zu bzw. von den vorhandenen Verkehrsbezirken. Die so im Validate-Netzausschnitt zusätzlich entstandenen Kordonverkehrsbezirke werden daraufhin ins Projektnetz übertragen und die resultierende Matrix übernommen. Die Teilnetzgenerierung wird für jede zu übertragende Matrix einzeln durchgeführt.

3.3.3.3 Kalibrierung der Verkehrsbelastung an Detektorwerten

Aufgrund der unterschiedlichen Auflösungen der Netze werden in einem ersten Schritt die aus der Teilnetzgenerierung entstandenen Matrizen angepasst, um das Umlegungsergebnis der Matrizen aus dem Validate-Netz mit einer grundlegend richtigen Matrixstruktur auf dem Projektnetz zu reproduzieren. Aus Konsistenzgründen werden dazu die umlegungsrelevanten Streckenattribute (Kapazität und freie bzw. zulässige Höchstgeschwindigkeit) mithilfe einer Zuordnungstabelle vom Validate-Netz auf das Projektnetz übertragen.

Die nachfolgend beschriebenen Bearbeitungsschritte werden für alle festgelegten Verkehrszustände (vgl. Kapitel 3.5.2) einzeln ausgeführt. Für die Anpassung der jeweiligen Matrix werden auf dem Projektnetz an ausgesuchten Querschnitten Zählstellen definiert und die Ergebnisse aus der Umlegung auf dem Validate-Netz entsprechend hinterlegt. Die übertragende Matrix wird nun unter Verwendung dieser Zählstellenwerte und der Verwendung des identischen Umlegungsverfahrens auf dem Projektnetz hochgerechnet. Dazu wird das in VISUM implementierte Hochrechnungsverfahren VStromFuzzy angewandt.

Das Ergebnis einer solchen Hochrechnung für die morgendliche Spitzenstunde zwischen 7:00 und 8:00 Uhr für die Tagart Dienstag bis Donnerstag ist in Bild 41 dargestellt.

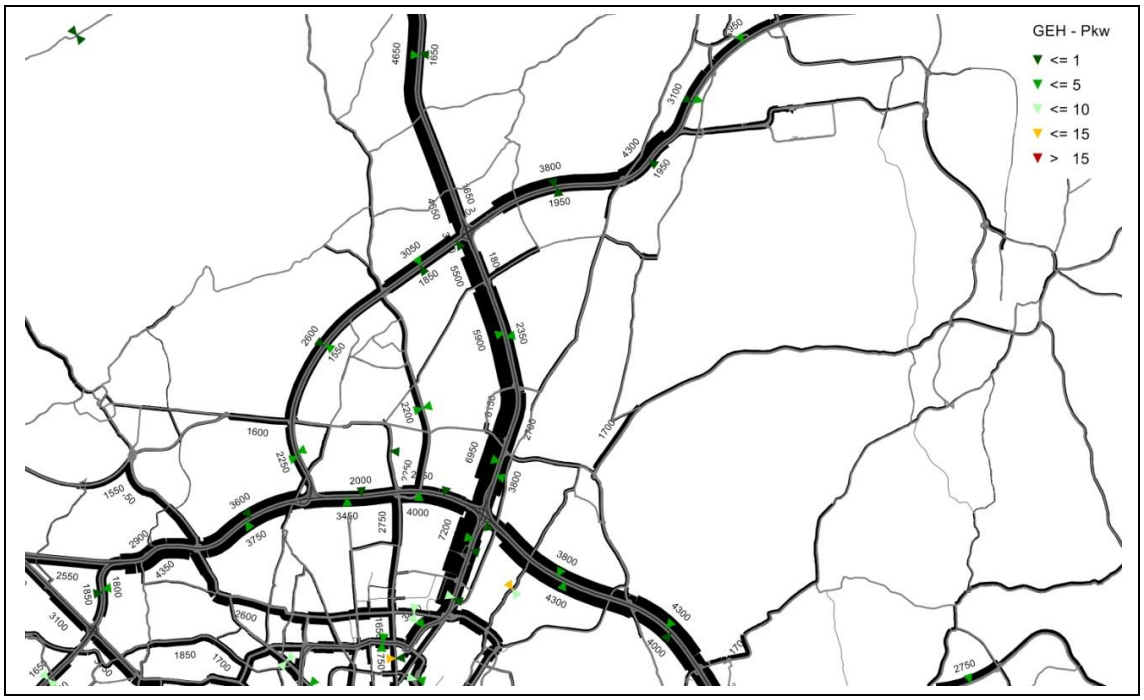


Bild 41: An das Validate-Netz angepasstes Umlegungsergebnis für Morgenspitzenstunde

Die Belastungen sind durch die schwarzen Balken verdeutlicht. Als Dreiecke markiert sind die definierten Zählstellen. Die Färbung der Zählstellenmarkierung zeigt die Qualität des Hochrechnungsergebnisses an. Als Qualitätsmaß wurde der GEH-Wert verwendet:

$$GEH = \sqrt{\frac{2 \cdot (M - C)^2}{M + C}} \qquad (6)$$

mit: *M* [Fzg/h] Streckenbelastung auf dem Projektnetz

C [Fzg/h] Streckenbelastung auf dem Validate-Netz

Es ist erkennbar, dass mit einer hochgerechneten Matrix die Umlegungsergebnisse beider Netze auf dem übergeordneten Netz sehr gut (GEH-Wert < 5) übereinstimmen.

Weiteres Überprüfen bzw. Anpassen des Netzmodells wird anhand der zur Verfügung stehenden Erhebungsdaten und Daten aus dem erstellen Datenarchiv vorgenommen. Ein wesentlicher Punkt sind hierbei die Kapazitäten und die Parameter der implementierten CR-Funktionen. Dazu werden an ausgesuchten Netzquerschnitten die aus dem Datenarchiv stammenden Verkehrsstärken und entsprechenden Reisezeiten gegenübergestellt und mit den aus dem Modell resultierenden Werten verglichen.

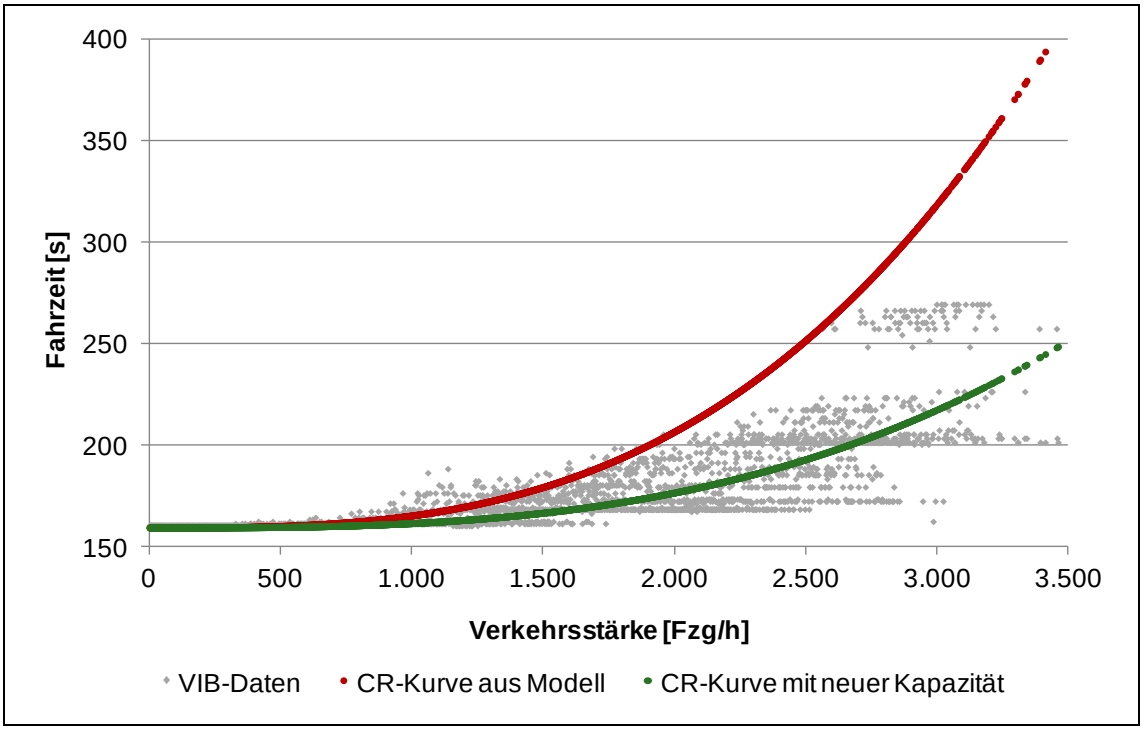


Bild 42: Anpassen der Kapazitäten und CR-Kurven

Bild 42 zeigt diesen Vergleich beispielhaft für den Abschnitt auf der A92 zwischen den Anschlussstellen Oberschleißheim und Unterschleißheim. Grau dargestellt sind die

Wertepaare der Verkehrsstärke und der Fahrzeit aus dem Datenarchiv der VIB. Im Bereich niedriger Verkehrsstärken stimmen die Werte sehr gut mit den Modellwerten überein. Die Fahrzeit im unbelasteten Netz ist somit korrekt. Es ist allerdings erkennbar, dass die ursprünglich im Modell enthaltene CR-Funktion (rot eingefärbt) die tatsächlichen Reisezeiten im Bereich hoher Verkehrsstärken tendenziell überschätzt. Wendet man allerdings die Kapazität an, die sich aus der detaillierten Betrachtung ergibt (vgl. Bild 37 und dazugehörigen Abschnitt) liegt die CR-Kurve im mittleren Bereich der Werte aus dem Datenarchiv.

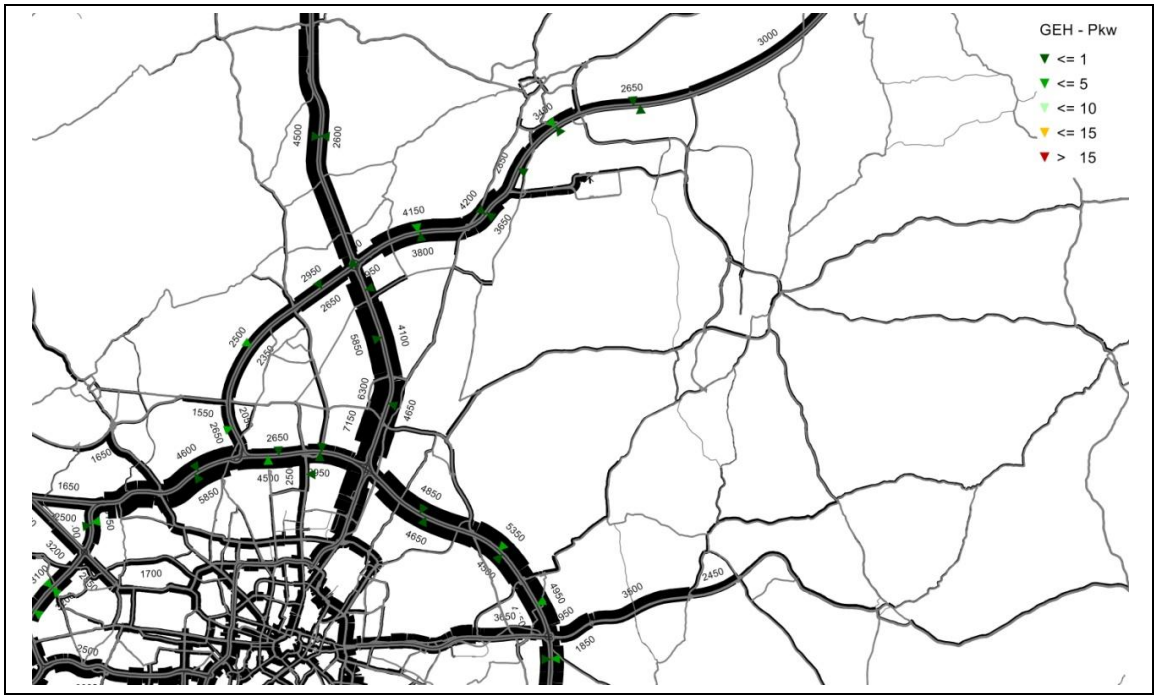


Bild 43: An Detektorwerte angepasstes Umlegungsergebnis für Morgenspitzenstunde, DiDo 7:00 - 8:00 Uhr

Um die Nachfragesituation an den Verkehrszustand während des Untersuchungszeitraumes anzupassen, werden die Matrizen nach der Validierung des Netzmodells anhand der Detektorwerte aus dem Datenarchiv hochgerechnet. Die verwendeten Detektoren befinden sich ausschließlich im übergeordneten Netz. In Bild 43 ist das Hochrechnungsergebnis für die Tagart Dienstag bis Donnerstag zwischen 7:00 und 8:00 Uhr dargestellt. An nahezu allen Detektoren wird ein GEH-Wert von kleiner als fünf erreicht. Somit bildet die hochgerechnete Matrix die Verkehrssituation während des Untersuchungszeitraumes mit sehr guter Qualität ab. Abschließend erfolgt dann eine Validierung des Modells anhand der Daten aus der erzeugten Referenzverkehrslage.

Bild 44 zeigt, für die Tagart Dienstag bis Donnerstag zwischen 7:00 und 8:00 Uhr, auf der rechten Seite die aktuelle Geschwindigkeiten aus dem Verkehrsmodell und auf der linken Seite die mittleren Geschwindigkeiten, die aus der berechneten Referenzverkehrslage resultieren. Es ist eine sehr gute Übereinstimmung der

Geschwindigkeiten für Strecken im übergeordneten als auch untergeordneten Netz erkennbar.

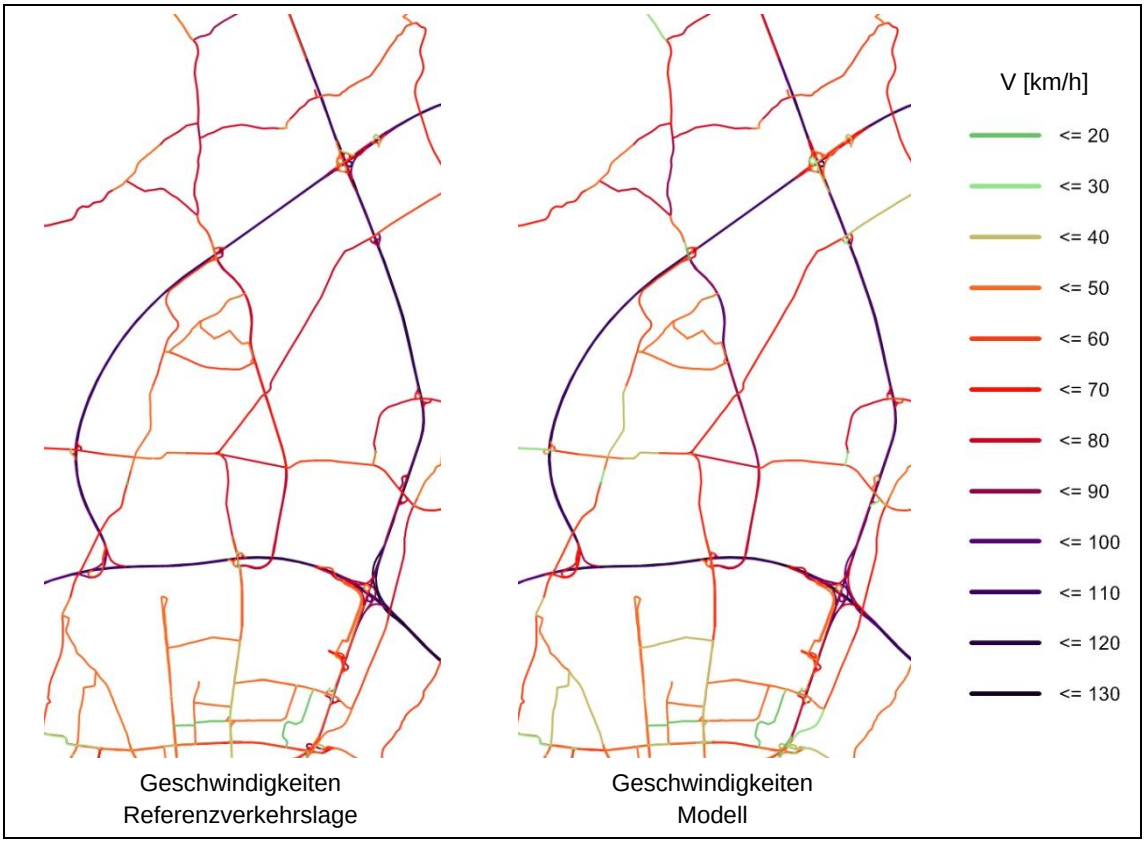


Bild 44: Vergleich der Geschwindigkeiten aus der Referenzverkehrslage und aus dem Projektnetz

3.3.4 Zusammenfassung

Im Rahmen des AP 3 werden Kennzeichenerfassungsdaten, Befragungsdaten, GPS-Log Befahrungsdaten der Probanden, Detektordaten, Daten aus der mobilen Kennzeichenerfassung und Daten aus den gezielt durchgeführten Messfahrten aufbereitet und eine Referenzverkehrslage sowie ein Verkehrsmodell erstellt.

Ziel der Aufbereitung der Kennzeichendaten ist, repräsentative Reisezeiten und die Anzahl an wiedererkannten Fahrzeugen für Teilrouten zu bestimmen. Um unplausible Reisezeiten, die bspw. durch Tanken oder Einkaufen zwischen zwei Messquerschnitten entstehen, herauszufiltern, wird ein Fahrzeugfolgefilter implementiert. Die als plausibel gekennzeichneten Datensätze der wiedererkannten Fahrzeuge zwischen zwei Messquerschnitten werden so aufbereitet, dass neben der Reisezeit ein Qualitätsindex berechnet wird, der ein Indikator für die Aktualität und die Verlässlichkeit der berechneten Reisezeit ist. Des Weiteren wird auf Basis der

plausiblen Datensätze die Anzahl der wiedererkannten Fahrzeuge pro Zeitintervall und Teilroute ermittelt (siehe Busch et al. [13]).

Im Vorfeld der GPS-Log Erhebung wurde eine Befragung der 278 Probanden sowohl zu sozio-demographischen, -ökonomischen und mobilitätsrelevanten Merkmalen als auch zum normativen Umfeld durchgeführt. Ziel der Aufbereitung dieser Befragungsdaten ist, eine Datenbank für die Schätzung des Routenwahlmodells zu erstellen und die Daten in Diagrammen grafisch aufzubereiten sowie ggf. zu interpretieren. Neben der Datenbank liegen als Ergebnis der Datenaufbereitung Diagramme vor, die eine Übersicht bspw. über die Haushalte, die Fahrzeuge und die täglichen Arbeitswege der Probanden geben. Ferner werden Befragungsdaten über die Routenkenntnis aufbereitet. Dazu gehören bekannte Alternativrouten für den Arbeitsweg und Gründe für die Wahl einer Route. Als Voruntersuchung für die Schätzung eines ökonometrischen Entscheidungsmodells wird der Einfluss von Verkehrsinformationen auf das Routenwahlverhalten und die zeitliche Flexibilität der Probanden sowie der Einfluss von Verkehrsinformationen auf das Abfahrtzeitwahlverhalten untersucht.

Die Aufbereitung der GPS-Log Befahrungen dient dem Ziel, die Trajektorien auf das Lokalisierungsnetz zu matchen, um anschließend die Choice-Sets ermitteln und diese für die Schätzung der Routenwahlparameter attributieren zu können. Ein einfaches Map-Matching ist aufgrund von Lücken, Sprüngen und Auswandern des GPS-Signals bei Stillstand oder auch schlechter GPS-Qualität nicht ausreichend. Daher müssen zusätzliche Kontrollmechanismen entwickelt und implementiert werden. Eine weitere wesentliche Aufgabe ist die Identifizierung von Wegen aus den gematchten Trajektorien. Dazu wird jede Trajektorie aufgrund von verschiedenen Kriterien auf enthaltene Zwischenaktivitäten überprüft. Wird ein Weg identifiziert, dann wird ihm eine Quell- und Zielaktivität zugeordnet. Um sicherzustellen, dass in die Schätzung des Routenwahlmodells ausschließlich plausible und hinsichtlich der zu untersuchenden Einflussfaktoren tatsächlich verwertbare Wege eingehen, werden verschiedene Filterkriterien angewendet.

Im Rahmen der Aufbereitung der Fahrsimulatordaten werden die Probandenbewertungen der Verkehrslage und die Fahrverhaltensdaten ausgewertet. Erkenntnisse aus der Analyse der Probandenbewertungen sind u. a., dass Ursachen von Verzögerungen (Baustelle oder dichter Verkehr) keinen signifikanten Einfluss auf die Bewertung der Verkehrslage durch die Probanden haben. Im Gegensatz dazu beeinflusst das unmittelbar vor einem zu bewertenden Streckenabschnitt Erlebte sehr wohl die Einschätzung der Verkehrslage. Außerdem wird der Zusammenhang von Reisezeitfaktor und Verkehrsqualitätsstufen untersucht. Eine Analyse der Fahrverhaltensdaten zeigt, dass die subjektiv empfundene Reisezeit auf einer Route nicht abhängig von der Erwartung ist. Somit wird vermutet, dass die Erwartung auf strategischer Ebene (Entscheidungsebene) zwar eine Rolle spielt, während dies für die

Bewertung von Verkehrszuständen (Empfindung) und für die subjektive Wahrnehmung von Reisezeiten nicht zutrifft (vgl. Koller-Matschke et al. [26]).

Für die spätere Ermittlung der Wirkungen von Verkehrsinformation auf das Routenwahlverhalten wird ein Verkehrsmodell für den Münchner Norden aufgebaut. Dazu werden die Streckenkapazitäten auf den Autobahnen mittels q-v-Diagrammen neu bestimmt. Im innerstädtischen Bereich werden die Strecken- und Knotenpunktkapazitäten nach HBS für verschiedene Tagarten und Tageszeiten berechnet. Außerdem werden bspw. WWW und temporäre Seitenstreifenfreigaben verortet und Verkehrsbezirke sowie Anbindungen angepasst. Anschließend wird die Verkehrsnachfrage modelliert, anhand von Detektorwerten kalibriert und mittels Reisezeiten aus der Kennzeichenerfassung validiert.

Für die Schätzung des Routenwahlmodells werden sowohl auf den tatsächlich gefahrenen als auch auf den zur Verfügung stehenden nicht gewählten Alternativrouten aktuelle Reisezeiten und andere Größen der Verkehrslage benötigt. Daher liegt der Fokus bei der Erstellung der Referenzverkehrslage auf der Fusionierung und Komplettierung der Verkehrslagedaten aus den unterschiedlichen Datenquellen. Zu den Datenquellen gehören die VIB, stationäre und mobile Kennzeichenerfassungssysteme, GPS-Daten der Probanden, GPS-Daten zusätzlicher Kontrollbefahrungen und innerstädtische Induktivschleifen. Als Ergebnis der Referenzverkehrslage liegen für jede Strecke in jedem Fünfminutenintervall die Streckenreisezeit und ein LOS vor, wenn Daten von mindestens einer Datenquelle vorhanden sind (Busch et al. [13]).

3.4 Analyse des Routenwahl- und Abfahrtszeitwahlverhaltens

Ziel dieses Arbeitspakets ist es, alle relevanten Einflussgrößen auf das Routenwahl- und Abfahrtszeitwahlverhalten der Verkehrsteilnehmer zu identifizieren und zu quantifizieren. Der Fokus liegt dabei auf der Untersuchung des Einflusses der Verkehrsbeeinflussungssysteme Verkehrsfunk, Wechselwegweisung und Navigationsgeräte.

Die Einflussgrößen können in verkehrsteilnehmerbezogene, verkehrslagebezogene, routenbezogene, und informationsbezogene Größen unterschieden werden. Die verkehrsteilnehmerbezogenen Größen beschreiben die Eigenschaften der Person, die Einflüsse des Fahrtzwecks, der Häufigkeit mit der die Route befahren wird und die Ortskenntnis des Verkehrsteilnehmers. Verkehrslage- und routenbezogene Einflussgrößen umfassen insbesondere die historischen Fahrzeiten und die aktuellen Fahrzeiten im Netz und die daraus abgeleiteten Eigenschaften der relevanten Routen (Zeit, Zuverlässigkeit aus der Fahrzeitenverteilung). Informationsbezogene Einflussgrößen beschreiben die Art, den Umfang und die Qualität der Verkehrsinformationen, die dem Verkehrsteilnehmer zur Verfügung gestellt werden.

Für die Ableitung der Einflussgrößen stehen die Daten aus den drei Erhebungen zur Verfügung. Diese werden statistisch getrennt analysiert und dann zusammengeführt.

Die Universität Stuttgart war an folgenden Aufgaben beteiligt:

- Analyse der Nutzung von Verkehrsinformationen und der Befolgung von Empfehlungen (verantwortlich): Auswertung der Daten aus den GPS-Beobachtungen, Auswertung der Nutzungshäufigkeit von Verkehrsinformationen, Auswertung der Befolgung von Empfehlungen
- Erstellung der Choice Sets (verantwortlich): Erzeugung von Alternativrouten für alle mit GPS beobachteten Routen und mit den Kennzeichenerfassungssystemen beobachteten Teilrouten, Attributierung aller Routen des Choice Sets, Zuordnung der Verkehrslage und Verkehrsinformationen zu den Zeit-Weg-Trajektorien
- Analyse des Routenwahlverhaltens (Unterstützung TUD): Schätzung der Routenwahlparameter für die Teilrouten aus der Kennzeichenerfassung, Unterstützung bei der Schätzung der Routenwahlparameter für die mit GPS beobachteten Routen
- Aufbereitung der Wirkungszusammenhänge des Routenwahlverhaltens (verantwortlich): Vergleich und Zusammenfassung der Einflussgrößen aus den drei Erhebungen, Abschätzung des Befolgungsgrads von Maßnahmen bzw. Maßnahmenpaketen, Zusammenfassung der Wirkungszusammenhänge in allgemeiner Form für die Anwendung in Verkehrsplanungsmodellen und Verkehrsleitsystemen, Validieren des Routenwahlmodells anhand unabhängiger Messdaten

3.4.1 Analyse der Nutzung von Verkehrsinformationen und der Befolgung von Empfehlungen

In einem ersten Schritt werden die erhobenen Daten aus den GPS-Beobachtungen hinsichtlich der Nutzung von Verkehrsinformationen (ist der Verkehrsfunk bzw. das Navigationsgerät eingeschaltet) und der Befolgung von Empfehlungen (wird die eine empfohlene Route gewählt) statistisch analysiert.

Im Folgenden wird dabei zuerst die heutige Informiertheit der Autofahrer analysiert. In Kapitel 3.4.1.2 wird die Nutzung der Verkehrsinformationen, die während der Erhebung zur Verfügung standen, quantifiziert und bewertet. Kapitel 3.4.1.3 schließt mit einer Betrachtung der Befolgung von Routenempfehlungen durch die Verkehrsteilnehmer.

3.4.1.1 Informiertheit der Fahrer

Um die Nutzung und die Befolgung von Verkehrsinformation und Routenempfehlungen bewerten zu können, ist eine anfängliche Betrachtung der Informiertheit der Autofahrer heute sinnvoll. Autofahrer, und Pendler im Speziellen, verfügen durch wiederholte Fahrten entlang den gleichen Streckenabschnitten über einen großen Erfahrungsschatz.

Je besser die Autofahrer durch ihre Erfahrungswerte über den aktuellen Verkehrszustand im Bilde sind, desto aktueller und korrekter müssen Verkehrsinformationen sein, um für die Fahrer einen zusätzlichen Nutzen darzustellen. Eine Analyse der beobachteten GPS-Fahrten zeigt, dass Autofahrer auf ihrem Arbeitsweg heute bereits sehr gut über die aktuelle Verkehrslage informiert sind. Dies gilt insbesondere, wenn sie sich auf ihre Erfahrungswerte verlassen können und keine unvorhergesehenen Störungen auftreten. Im Falle von Störungen steigt die Wahrscheinlichkeit, dass die Routenwahl nicht optimal im Hinblick auf die aktuellen Reisezeiten im Netz ist, stark an, siehe Bild 45.

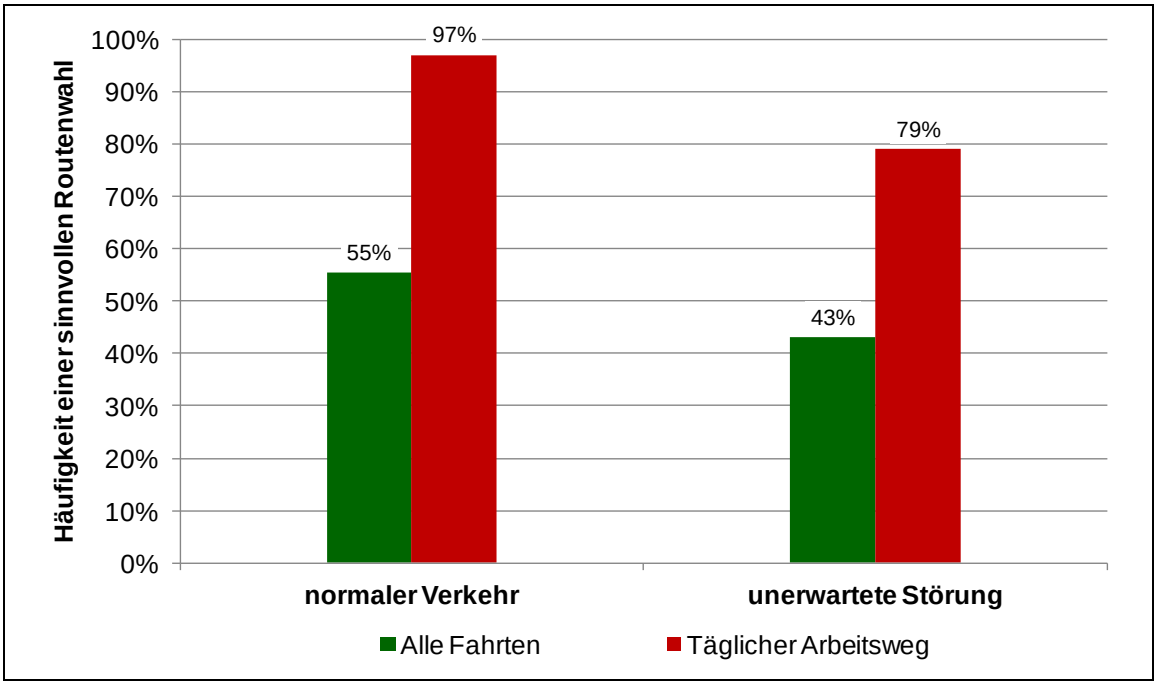


Bild 45: Informiertheit der Autofahrer über heutige Verkehrssituation

Auf dem Weg vom Wohnort zum Arbeitsplatz wählen Autofahrer in 97% aller Fahrten eine sinnvolle Route. Sinnvoll ist eine Route in diesem Zusammenhang dann, wenn die Reisezeit der gewählten Route nicht mehr als 5% von der aktuell schnellsten Route abweicht. Sogar im Falle einer unvorhergesehenen Störung, wählen Autofahrer aus ihrer Erfahrung heraus in 79% aller Fahrten eine sinnvolle Route.

Betrachtet man hingegen Fahrten auf vom Fahrer selten befahrenen Relationen, ist die Routenwahl weit weniger optimal. In nur 55% aller Fahrten wählen Fahrer hierbei eine sinnvolle Route. Im Falle von Störungen fällt der Wert sogar auf 43%.

Die Daten verdeutlichen, dass Autofahrer bereits heute über einen großen tageszeitabhängigen Erfahrungsschatz verfügen und sehr gut über die üblichen Verkehrssituationen auf ihren häufig gefahrenen Routen informiert sind. Dennoch hat Verkehrsinformation ein beträchtliches Potential zur Reduzierung der Reisezeiten im alltäglichen Verkehrsablauf. Dies gilt umso mehr im Falle von unvorhergesehenen Störungen.

3.4.1.2 Nutzung von Verkehrsinformation

Es ist bekannt, dass moderne Verkehrsinformationssysteme, und allen voran Navigationssysteme, zunehmend an Popularität gewinnen. Bereits heute ist das Routenwahlverhalten der Autofahrer zu einem guten Teil von Verkehrsinformation beeinflusst. Um den Einfluss verschiedener Informationsmedien auf das Routenwahlverhalten zu quantifizieren, ist es notwendig, das heutige Nutzungsverhalten näher zu beleuchten. Die beobachteten GPS-Fahrten liefern einen Einblick in Nutzungshäufigkeit und Verwendungszweck von Verkehrsinformationen. Tabelle 22 zeigt die Anzahl der mit GPS beobachteten Fahrten während der achtwöchigen Erhebung in Zusammenhang mit den Fahrzwecken der jeweiligen Fahrten. Das Aktivitätenmuster, mit einem hohen Anteil an Arbeitsfahrten und Freizeitfahrten unter der Woche, ist dabei typisch für Pendler. Die Aktivität Einkaufen spielt bei dieser Personengruppe kaum eine Rolle.

Tabelle 22: Fahrten und Aktivitäten aus GPS-Daten

GPS-Fahrten	Gesamt	Prozentual
Anzahl Relationen	4.100	100%
Anzahl Fahrten	16.037	100%
Anzahl Fahrten zur Arbeit	7.418	46%
Anzahl Fahrten zum Einkaufen	996	6%
Anzahl Fahrten für tägliche Freizeit	471	3%
Anzahl Fahrten für nicht alltägliche Freizeit/Urlaub	3.639	23%
Anzahl Fahrten für andere Aktivitäten	3.513	22%

Während der Erhebung wurden alle Interaktionen der Probanden mit den zur Verfügung gestellten *wiki*-Smartphones protokolliert. Somit stehen detaillierte Nutzungsprotokolle mit Informationen über den Zeitpunkt der Nutzung zur Verfügung. Dies ermöglicht eine Auswertung über die Nutzungshäufigkeit je Fahrzweck. Zudem ist bekannt, ob der Proband dabei den Navigationsdienst oder die Level-of-Service-Karte nutzte. In Summe wurde der *wiki*-Navigationsdienst auf 8% aller Fahrten im

Untersuchungszeitraum genutzt, siehe Tabelle 23. Die Daten belegen, dass Navigation nicht nur zur reinen Zielführung zu unbekannten Zielen wie Urlaub, sondern vornehmlich zur Verkehrsinformation bei starkem Verkehrsaufkommen, z. B. auf dem Weg zur Arbeit, genutzt wurde.

Tabelle 23: Nutzung des Navigationsdienstes für beobachtete GPS-Fahrten

Fahrten mit Nutzung der Navigation	Gesamt	Prozentual
Anzahl Relationen	491	12%
Anzahl Fahrten	1.303	8%
Anzahl Fahrten zur Arbeit	726	10%
Anzahl Fahrten zum Einkaufen	63	6%
Anzahl Fahrten für tägliche Freizeit	23	5%
Anzahl Fahrten für nicht alltägliche Freizeit/Urlaub	300	8%
Anzahl Fahrten für andere Aktivitäten	191	15%

In Tabelle 24 stehen die Anzahl der Fahrten, für die die Level-of-Service-Karte genutzt wurde. In Summe nutzen die Probanden die Level-of-Service-Karte auf 20% ihrer Fahrten. Der Dienst wurde dabei zur Verkehrsinformation auf Fahrten zu bekannten als auch unbekannten Zielen genutzt. Auch hier zeigt sich eine vornehmliche Nutzung bei starkem Verkehrsaufkommen in der morgendlichen Spitzenstunde vom Wohnort zum Arbeitsplatz.

Tabelle 24: Nutzung der Level-of-Service-Karte für beobachtete GPS-Fahrten

Fahrten mit Nutzung der Level-of-Service-Karte	Gesamt	Prozentual
Anzahl Relationen	892	22%
Anzahl Fahrten	2.746	17%
Anzahl Fahrten zur Arbeit	1.500	20%
Anzahl Fahrten zum Einkaufen	152	15%
Anzahl Fahrten für tägliche Freizeit	57	12%
Anzahl Fahrten für nicht alltägliche Freizeit/Urlaub	725	20%
Anzahl Fahrten für andere Aktivitäten	312	11%

Die Nutzung anderer, kollektiver Informationsmedien, wie des Verkehrsfunks, wurde nicht für jede einzelne Fahrt protokolliert. Stattdessen gaben 241 der insgesamt 278 Probanden an, den Verkehrsfunk auf ihrem täglichen Arbeitsweg zur Verkehrsinformation zu nutzen. Es kann angenommen werden, dass ein Fahrer, der auf seinem Arbeitsweg Verkehrsfunk hört, dies auf allen seinen Pkw-Fahrten tut, da diese Einstellungen im Radio im Normalfall nicht von Fahrt zu Fahrt verändert werden. Unter dieser Annahme werden Verkehrsmeldungen über Verkehrsfunk auf 87% aller Fahrten genutzt. Es zeigt sich, dass dieses traditionelle Informationsmedium noch immer eine große Bedeutung hat.

Die Beobachtungen zur Nutzungshäufigkeit und -art von Navigationssystemen aus GPS-Daten können nun an den Ergebnissen der Online-Befragung gespiegelt werden, siehe Bild 46.

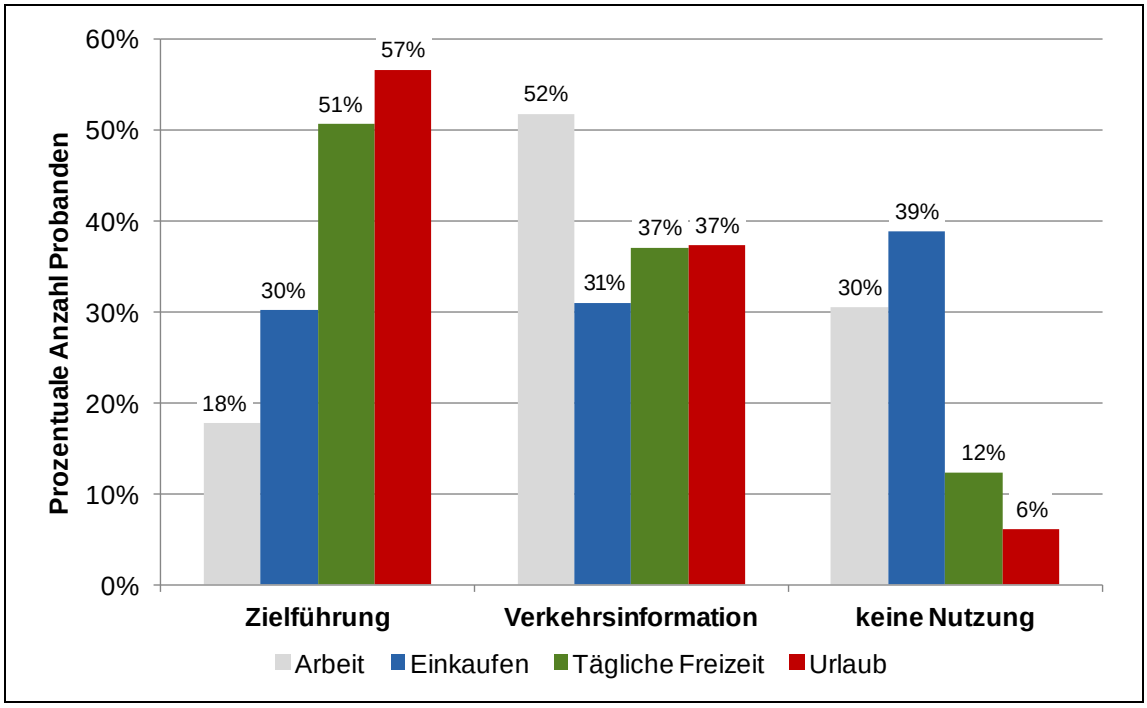


Bild 46: Nutzung von Navigation je Fahrzweck aus Online-Befragung

Auch die von den Probanden angegebene Nutzung von Navigation zeigt eine Abhängigkeit vom Fahrzweck. Navigation zur Zielführung ist auch hier für Fahrten zu unbekannten Zielen wie Urlaub am wichtigsten. Dahingegen gaben nur 18% der Probanden an, Navigation zur Zielführung auf dem Arbeitsweg zu nutzen. Die Nutzung von Navigation zur Verkehrsinformation ist besonders dann von Bedeutung, wenn die Verkehrssituation Verzögerungen oder Staus erwarten lässt. 57% gaben an, Navigation zur Verkehrsinformation auf dem Arbeitsweg zu nutzen. Für rund ein Drittel der Probanden ist Navigation als Verkehrsinformationsmedium für Fahrten zu anderen Aktivitäten, wie Freizeit, Einkaufen oder Urlaub, von Bedeutung.

Die Akzeptanz einzelner Informationsmedien wird in der Befragung ähnlich angegeben, wie sie sich in den GPS-Zeiten zeigt. Nur 7% der Probanden gaben an, keine Verkehrsinformation auf ihrem täglichen Arbeitsweg zu nutzen. Auch hier war der Verkehrsfunk mit 55% das am häufigsten genutzte Informationsmedium.

Um im folgenden Kapitel die Befolgung von Routenempfehlungen durch Navigation und Wechselwegweisung analysieren zu können, werden alle GPS-Fahrten dahingegen überprüft, ob sie eine Wechselwegweisung auf ihrer Route passieren. Falls eine Wechselwegweisung passiert wurde, wird geprüft ob zum Zeitpunkt der Überfahrung eine Routenempfehlung innerhalb einer Leitstrategie angezeigt wurde, die für das angesteuerte Ziel des Fahrers von Bedeutung war. Unter dieser

Randbedingung gibt es 8.280 von den insgesamt 16.037 beobachteten GPS-Fahrten, also 52%, für die den Fahrern eine für ihn relevante Routenempfehlung durch eine Wechselwegweisung im Untersuchungsraum zur Verfügung stand. Dieser hohe Wert resultiert daher, dass die Mehrheit der Probanden auf ihrem täglichen Arbeitsweg die Wechselwegweisung am Autobahnkreuz Neufahrn passierten, siehe Bild 47.

3.4.1.3 Befolgung von Empfehlungen

Das Potential von Verkehrsinformation im Kontext von Intelligentem Verkehrsmanagement hängt eng zusammen mit dem Befolgungsgrad der Routenempfehlungen durch die Autofahrer. Der Befolgungsgrad ist ihrerseits abhängig von der Qualität, der Verständlichkeit, der allgemeinen Akzeptanz der Informationsmedien und der Marktdurchdringungsrate.

Im Gegensatz zu einem ökonometrischen Entscheidungsmodell, welches in Kapitel 3.4.3 geschätzt und beschrieben wird, folgt hier zunächst eine rein statistische Analyse signifikanter Phänomene und dient im Weiteren zur Identifikation eines geeigneten Routenwahlmodells. Diskrete Entscheidungsmodelle beschreiben darüber hinaus einen kausalen Zusammenhang zwischen den gegebenen Einflussgrößen und der Wahlentscheidung des Fahrers. Der erklärende Charakter ist vor allem bei der Prognose zukünftigen Verhaltens bei veränderten Rahmenbedingungen unerlässlich.

Der Begriff Befolgungsrate wird in der Literatur meist als Anteil des umlenkbaren Verkehrs am Gesamtstrom definiert. Dies bezeichnet den Anteil der Fahrzeuge, der als Reaktion auf die Routenempfehlung einer Wechselwegweisung die geschaltete Alternativroute wählt. Eine Studie der Bundesanstalt für Straßenwesen [6] gibt den Befolgungsgrad wie folgt an (siehe Seite 15):

$$b = (p_1 - p_0) * 100\,\% \tag{7}$$

mit:

$p_1 = \frac{x_1}{n_1}$ [s] Anteil der Fahrzeuge auf Alternativroute mit Routenempfehlung

$p_0 = \frac{x_0}{n_0}$ [s] Anteil der Fahrzeuge auf Alternativroute ohne Routenempfehlung

x_1 Anzahl der Fahrzeuge auf Alternativroute mit Routenempfehlung

x_0 Anzahl der Fahrzeuge auf Alternativroute ohne Routenempfehlung

n_1 Gesamtanzahl der Fahrzeuge vor Entscheidungspunkt im Fall mit Routenempfehlung

n_0 Gesamtanzahl der Fahrzeuge vor Entscheidungspunkt im Fall ohne Routenempfehlung

Diese Definition erlaubt es, den Befolgungsgrad basierend auf den Verkehrsstärken lokaler Detektordaten zu bestimmen, ohne weitere Information über die eigentliche Routenwahl der einzelnen Fahrer. Die Verkehrsstärken müssen dabei sowohl stromaufwärts unmittelbar vor dem Entscheidungsquerschnitt und stromabwärts unmittelbar auf der Haupt- und Alternativroute verfügbar sein. Im Normalfall wird für die Ermittlung des Befolgungsgrads eine Ganglinie eines typischen Tags ohne Schaltung der Wechselwegweisung mit der Ganglinie an einem Tag mit geschalteter Wechselwegweisung verglichen.

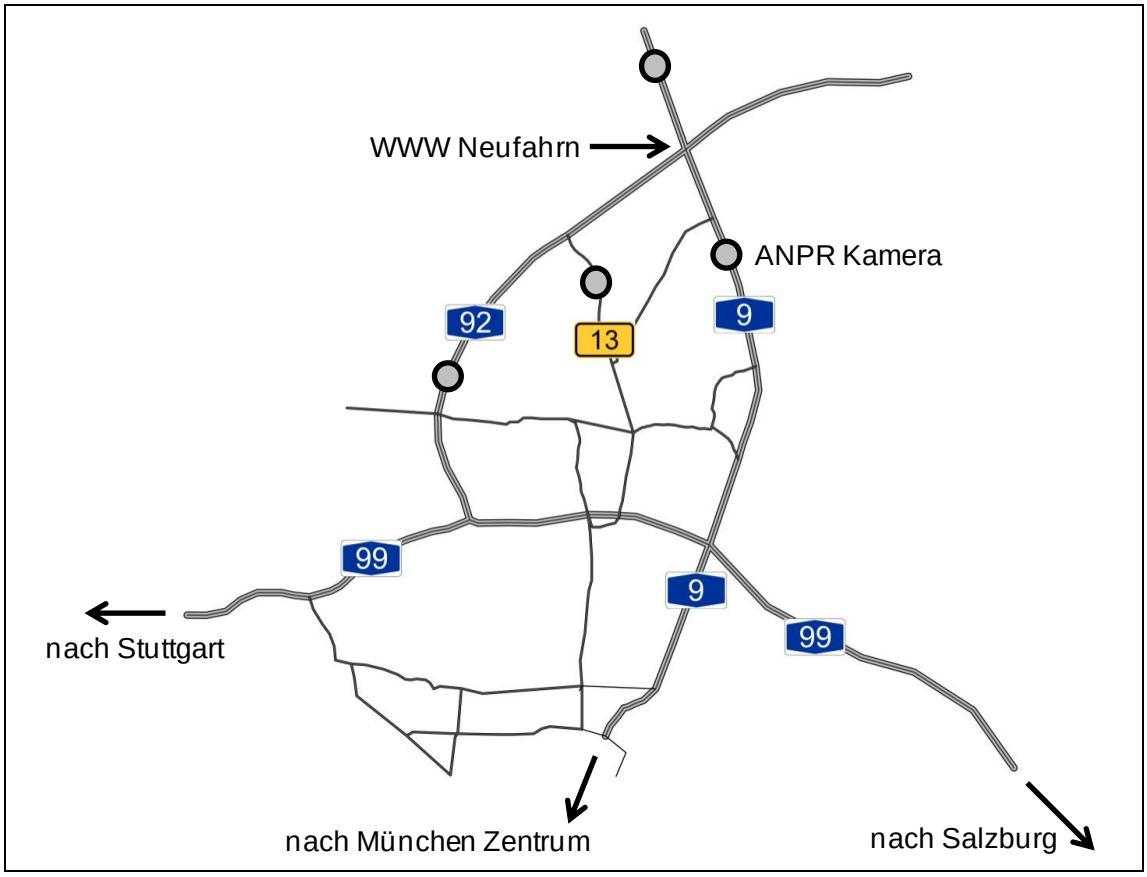


Bild 47: Straßennetz stromabwärts der Wechselwegweisung Neufahrn

Im Folgenden wird der Befolgungsgrad für die Wechselwegweisung auf der A9 vor dem Autobahnkreuz Neufahrn untersucht, siehe Bild 47. Obwohl ANPR-Systeme sowohl unmittelbar stromaufwärts der Wechselwegweisung Neufahrn, als auch stromabwärts auf den Alternativrouten A9, A92, und B13 vorhanden sind, ist es hier nicht möglich, den Befolgungsgrad anhand von ANPR-Daten zu ermitteln. Zur Bestimmung des Befolgungsgrades der Routenempfehlungen am AK Neufahrn ist die Kenntnis des eigentlichen Fahrtziels unerlässlich. Ein Fahrer auf dem Weg nach Stuttgart wird mit geringer Wahrscheinlichkeit auf eine angezeigte Routenempfehlung für das Ziel Salzburg reagieren. Um die Information des Fahrtziels zu ermitteln, können aus den ANPR-Daten Fahrzeuge herausgegriffen werden, die sowohl auf der A9 vor dem Autobahnkreuz Neufahrn, als auch an einem der Ausfahrtspunkte Stuttgart,

München Zentrum oder Salzburg wiedererkannt wurden. Da die vorhandenen ANPR-Systeme allerdings an keinem der besagten Querschnitte eine Vollerhebung aller Fahrbahnen liefern, sind die Wiedererkennungsraten bei weitem zu gering, um von der Verteilung der erhobenen Fahrtziele auf die Verteilung im Gesamtstrom schließen zu können.

GPS-Daten beinhalten Informationen über die Quellen und Ziele der detektierten Fahrzeuge. Somit ist es möglich, den Befolgungsgrad der Wechselwegweisung Neufahrn speziell für die Fahrzeuge zu analysieren, für die die angezeigte Routenempfehlung auf dem Weg zu ihrem Ziel relevant war. Für jede detektierte GPS-Fahrt, für die eine relevante Routenempfehlung zum Zeitpunkt der Überfahrung der Wechselwegweisung zur Verfügung stand, wird geprüft, entlang welcher der drei möglichen Alternativrouten A9/A92/B13 gefahren wurde. Somit wird festgestellt, wie viele der detektierten Fahrten der aktuellen Routenempfehlung gefolgt sind. Diese Analyse wurde ebenso für alle übrigen Wechselwegweisungen im Untersuchungsraum durchgeführt.

Das zweite Informationsmedium, dessen Befolgungsgrad aus den GPS-Daten ermittelt werden kann, ist das Navigationssystem. Navigationssysteme liefern dem Fahrer eine Routenempfehlung vom Start zum Ziel. Allerdings wird in vielen Fällen vom Fahrer nicht die genaue Adresse des Zielorts in die Routingmaske eingetippt, sondern ein übergeordnetes Ziel, wie München Schwabing etc. Die vom Navigationsgerät empfohlene Route wird unter all den möglichen Alternativrouten des Choice Sets als diejenige identifiziert, deren Routenverlauf sich am längsten mit der Navigationsroute überlappt.

Für viele Fahrten, auf denen die Probanden den Navigationsdienst nutzen, passierten sie zugleich eine Wechselwegweisung. Dies kann zu widersprüchlichen Empfehlungen durch das Navigationsgerät und die Wechselwegweisung führen. Tabelle 25 zeigt einen Überblick über die Anzahl der detektierten Fahrten für die eine Routenempfehlung während der Fahrt durch Navigation oder Wechselwegweisung existierte.

Dabei werden verschiedene Empfehlungsarten nach drei Kriterien unterschieden:

- Informationsmedium (keine, nur durch Navigation, nur durch Wechselwegweisung, durch Navigation und Wechselwegweisung)
- Art der Empfehlung (strategiekonformes Routing, widersprüchlich)
- Empfohlene Route (aktuelle schnellste, andere)

Für 7.498 der detektierten GPS-Fahrten lag keine Routenempfehlung vor, das Navigationsgerät war nicht in Gebrauch und es wurde keine Wechselwegweisung passiert. Da viele der Probanden die Wechselwegweisung Neufahrn auf ihrem täglichen Arbeitsweg passierten, ist die Anzahl der Fahrten mit Routenempfehlung

durch Wechselwegweisung (8.260 Fahrten) deutlich höher als die Anzahl der Fahrten, für die eine Routenempfehlung durch Navigation vorlag (745 Fahrten).

Jedoch wurde auf 4.876 Fahrten eine andere als die aktuelle schnellste Route durch die Wechselwegweisung empfohlen. Hier ist zu bedenken, dass das Ziel der für die Schaltung der Wechselwegweisung zuständigen Verkehrsleitzentralen häufig nicht primär die Optimierung der Reisezeiten auf der Alternativroute darstellt. Vielmehr sind Zielgrößen, wie die Harmonierung des Verkehrsflusses bei gleichzeitiger Bündelung des Verkehrs auf den Autobahnen zur Vermeidung von Lärm- und Schadstoffemissionen im nachgeordneten Netz, von Bedeutung.

Die Wechselwegweisungen im Untersuchungsraum zeigten im Normalfall eine Routenempfehlung entlang der üblichen Hauptroute an. Routenempfehlungen entlang der Alternativrouten wurden meist aufgrund spezieller Großveranstaltungen, wie ein Fußballspiel am Wochenende, geschaltet. Die Wechselwegweisung Neufahrn empfahl in der Standardstellung die Fahrt entlang der A9 in Richtung München Zentrum und wurde im gesamten Erhebungszeitraum lediglich 60 mal auf Empfehlung der Alternativroute entlang der A92 geschaltet. In 41 Fällen war hierbei die A92 die aktuell schnellste Route, in 17 Fällen gab es eine schnellere Route entlang des untergeordneten Straßennetzes, das nicht Teil der Routingstrategie der Autobahndirektion Südbayerns ist. In 2 Fällen, in denen eine Routenempfehlung über die A92 gegeben wurde, war die A9 die aktuell schnellste Route. Auf Basis dieser Eingangsdaten zeigt Bild 48 die Befolgungsraten gemäß der Einteilung in Empfehlungsarten aus Tabelle 25.

Tabelle 25: GPS-Fahrten mit Routenempfehlung durch Navigation und/oder Wechselwegweisung

Nr.	Informationsmedium	Art der Empfehlung	Empfohlene Route	Fahrten
0	Keines	Keine	keine	7.498
1	nur Navigation	Strategiekonform	aktuell schnellste	140
2	nur Navigation	Strategiekonform	andere	139
3	nur Wechselwegweisung	Strategiekonform	aktuell schnellste	2.918
4	nur Wechselwegweisung	Strategiekonform	andere	4.876
5	Beide	Strategiekonform	aktuell schnellste	125
6	Beide	Strategiekonform	andere	95
7	Beide	Widersprüchlich	aktuell schnellste	141
8	Beide	Widersprüchlich	andere	105
Σ				**16.037**

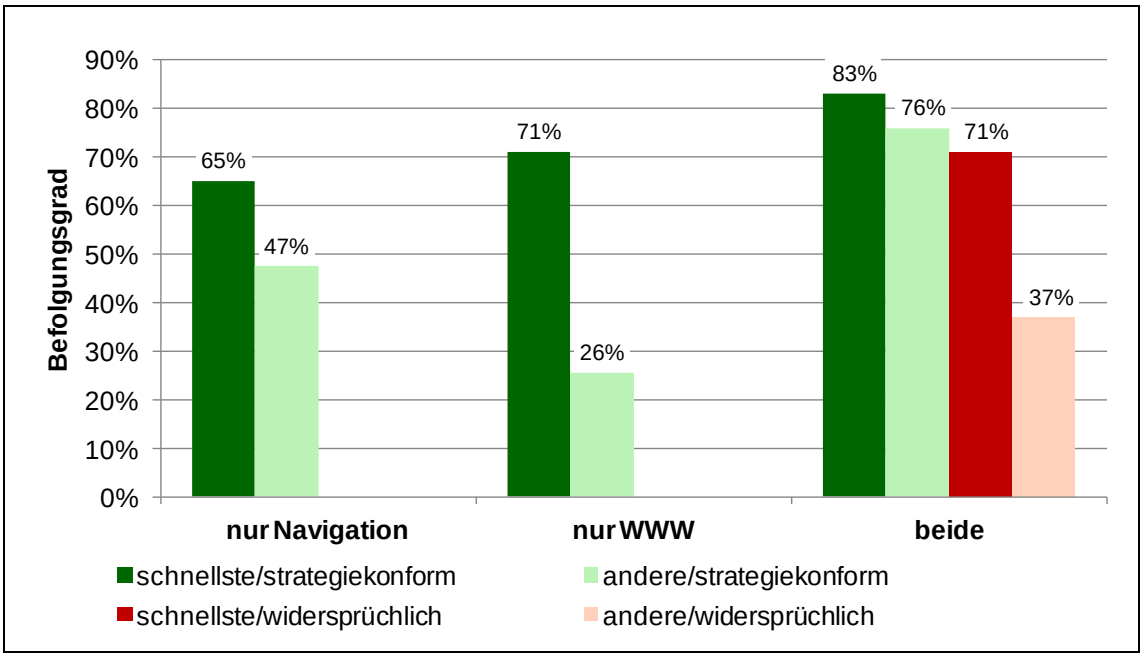


Bild 48: Befolgungsgrad für unterschiedliche Arten der Routenempfehlung

Der Befolgungsgrad von 65% für Routenempfehlungen per Navigation bei Empfehlung der aktuell schnellsten Route ist geringer als erwartet, dargestellt im dunkelgrünen Balken links. Die Probanden zeigten sich nicht bereit, ihre übliche Hauptroute zu verlassen zugunsten marginal kleiner Reisezeitvorteile. Betrachtet man Empfehlungen einer Route durch das Navigationsgerät, die nicht mehr als 5% Reisezeitdifferenz zur aktuell schnellsten Route aufwies, steigt der Befolgungsgrad dahingegen auf 75%. Im Falle der Empfehlung einer anderen als der aktuell schnellsten Route per Navigation sinkt der Befolgungsgrad auf 47%, dargestellt im linken hellgrünen Balken.

Der Befolgungsgrad der Wechselwegweisungen bei Empfehlung der aktuell schnellsten Route beträgt 71%. Dass dieser Wert deutlich über dem des Navigationsgeräts liegt, ist darin begründet, dass Wechselwegweisung per se keine Routen im nachgeordneten Netz empfiehlt und nicht nur unter dem Kriterium der kürzesten Reisezeit geschaltet wird. Allerdings fällt der Befolgungsgrad bei Empfehlung einer anderen als der aktuell schnellsten Route durch Wechselwegweisung auf 26%, da die Probanden im übergeordneten Straßennetz über einen großen Erfahrungsschatz der zu erwartenden Reisezeiten auf den durch die Wechselwegweisung geschalteten Alternativrouten verfügen. Weiterhin muss bedacht werden, dass der Befolgungsgrad vor allem in den Fällen, in denen bei Störungen auf der Autobahn eine schnellere Alternativroute im nachgeordneten Netz verfügbar ist, niedrig ist, da die Wechselwegweisung diese per se nicht empfiehlt. Bei Störungen auf der A9 empfiehlt die Wechselwegweisung Neufahrn beispielsweise das Ausweichen auf die A92, was oft zum einem Ausweichen auf die B13 führt.

Im Falle einer Routenempfehlung durch Navigation und Wechselwegweisung zeigt sich ein starker negativer Einfluss auf den Befolgungsgrad im Falle einer widersprüchlichen

Empfehlung. Dabei wirkt sich eine widersprüchliche Empfehlung negativer aus als die Empfehlung einer nicht zeitoptimalen Route. Im Falle einer Routenempfehlung der aktuell schnellsten Route durch beide Informationsmedien liegt der Befolgungsgrad bei 83% und damit deutlich über den Befolgungsgraden der einzelnen Medien allein. Der Befolgungsgrad sinkt auf 76%, wenn beide Routenempfehlungen übereinstimmen aber nicht die aktuell schnellste Route empfehlen, dargestellt im dunkelgrün gestrichelten Balken. Jedoch sinkt der Befolgungsgrad stärker bei widersprüchlichen Empfehlungen, auch wenn eine der beiden Informationsmedien die aktuell schnellste Route empfiehlt, dargestellt im hellgrünen Balken. Für den Fall, dass beide Informationsmedien eine andere als die aktuell schnellste Route empfehlen, sinkt der Befolgungsgrad bis auf 37%, dargestellt im hellgrau gestrichelten Balken.

Eine Analyse der situationsabhängigen Routenwahl in der Stated Preference Befragung ermöglicht die Ermittlung des Befolgungsgrads der in der Befragung verwendeten Informationsmedien. Eine Reaktion auf einen geänderten Verkehrszustand erfolgt im Experiment dann, wenn die Verkehrsteilnehmer, abweichend von ihrer üblichen Route, eine Alternativroute wählen. Der Befolgungsgrad gibt an, in welchem Umfang die Probanden auf die Störungsinformation in Abhängigkeit von dem Informationsmedium reagieren.

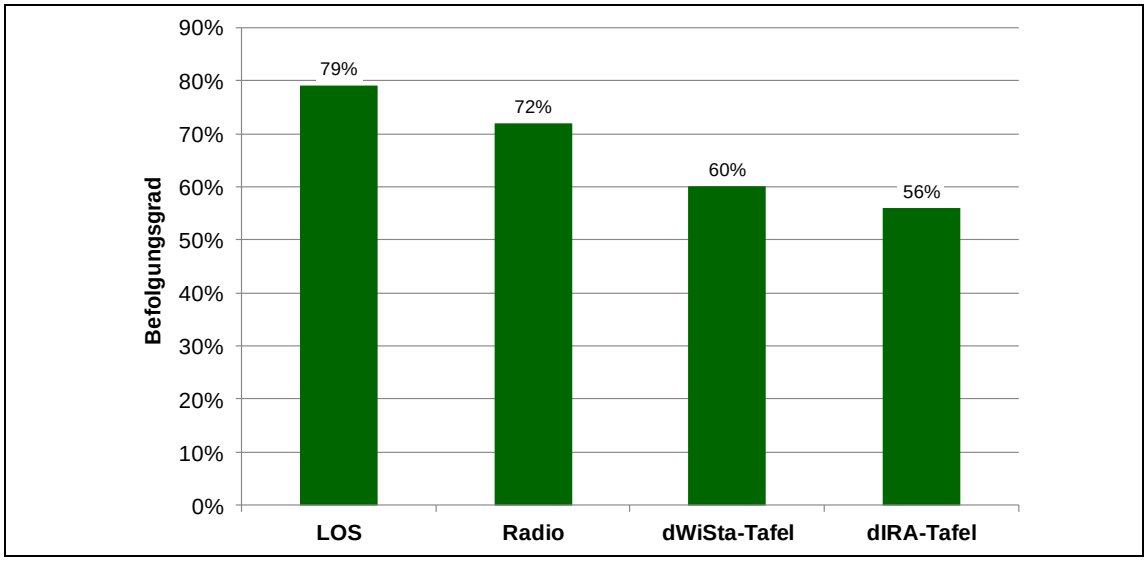


Bild 49: Befolgungsgrad in Abhängigkeit vom Informationsmedium, Auswertung der TU Dresden

Es zeigt sich, dass die Probanden am ehesten reagieren, wenn ihnen die Störung über das Medium LOS mitgeteilt wird. Der geringste Befolgungsgrad ist beim Informationsmedium dIRA-Tafel zu verzeichnen. Allerdings unterscheiden sich die Befolgungsgrade auch in Abhängigkeit von der Hauptroute des Probanden. Den geringsten Befolgungsgrad (62 %) weisen die Probanden auf, die die A9 als Hauptroute benutzten. Es kann aber nicht gefolgert werden, dass generell die Nutzer von BAB am wenigsten auf Störungsmeldungen reagieren. So ist der Befolgungsgrad

der Probanden, welche die A92 als Hauptroute nutzen (98 %) höher als derer der B13 (71 %). Der Einfluss der einzelnen Informationsmedien auf den Befolgungsgrad ist aber, unabhängig von der Hauptroute der Probanden, ähnlich. Beim Informationsmedium LOS ist der Befolgungsgrad am höchsten, gefolgt von Radio und dWiSta-Tafel. Die DIRA-Tafeln haben den geringsten Befolgungsgrad.

3.4.2 Erstellung der Choice Sets

Das Choice Set beschreibt alle möglichen Routenalternativen, die dem Verkehrsteilnehmer für die betrachtete Ortsveränderung bekannt sind und zur Verfügung stehen. Jede Route wird dabei durch eine Reihe von Attributen beschrieben, die für die Routenwahl der Verkehrsteilnehmer von Bedeutung sind bzw. sein könnten. Die alternativen Routen werden im Verkehrsmodell mit Hilfe spezieller Routensuchverfahren bestimmt, die nicht nur zeitkürzeste Routen ermitteln. Um jeder Route aktuelle Reisezeiten zuordnen zu können, werden die Reisezeiten der alternativen Routen aus den Verkehrslagedaten abgeleitet oder alternativ aus dem Verkehrsmodell abgeschätzt.

Die Aufgabe der Universität Stuttgart bestand in der Erzeugung von Alternativrouten für alle mit GPS beobachteten Routen und mit den Kennzeichenerfassungssystemen beobachteten Teilrouten. Anschließend wurden alle Routen innerhalb der Choice Sets durch die Universität Stuttgart mit dynamischen Attributen der Verkehrslage attributiert.

3.4.2.1 Erzeugen von Alternativrouten

3.4.2.1.1 Analyse der erhobenen Routen

Ein Routen Choice Set besteht aus Sicht eines Verkehrsteilnehmers in einer bestimmten Entscheidungssituation aus einer gewählten Alternative und nicht gewählten Alternativen. Zu jeder beobachteten Ortsveränderung ist somit eine sinnvolle Anzahl an Routen zu ermitteln, die dem Proband zu diesem Zeitpunkt als Alternative zur Verfügung standen. Insgesamt werden auf 4.100 Relationen plausible Ortsveränderungen erfasst. Zunächst wird geprüft, ob die Vielzahl an erfassten Ortsveränderungen ausreicht, um ein vollständiges Choice Set direkt zu erhalten. In diesem Zusammenhang werden die tatsächlich gefahrenen Routen und somit die gewählten Alternativen analysiert. Im Durchschnitt werden 1,5 verschiedene Routen je Relation genutzt. Jedoch werden 1.924 Relationen lediglich einmal befahren und somit auch nur eine Route gewählt. Die durchschnittliche Anzahl genutzter Routen auf Relationen, die mehrfach befahren werden, liegt hingegen bei 2,0. Eine differenzierte Auswertung der Anzahl befahrener Routen enthält Bild 50. Dargestellt sind die Anteile der Relationen mit der entsprechenden Anzahl befahrener Routen, unterschieden nach

unterschiedlicher Nutzungshäufigkeit der Relationen. Es ist zu erkennen, dass auf Relationen, die zwei bis viermal genutzt werden, nur auf 55% eine Route und somit auf 45% der Relationen mehrere Routen genutzt werden. In der Gruppe der Relationen die 5 bis 9 mal befahren werden, bleiben die Probanden nur noch in 32% der Fälle immer auf den identischen Routen. Auf Relationen mit zehn und mehr Befahrungen sinkt der Wert auf 20%. Wie zu erwarten, steigt der Anteil der Relationen mit höherer Anzahl genutzter Routen mit steigender Nutzungshäufigkeit der Relation.

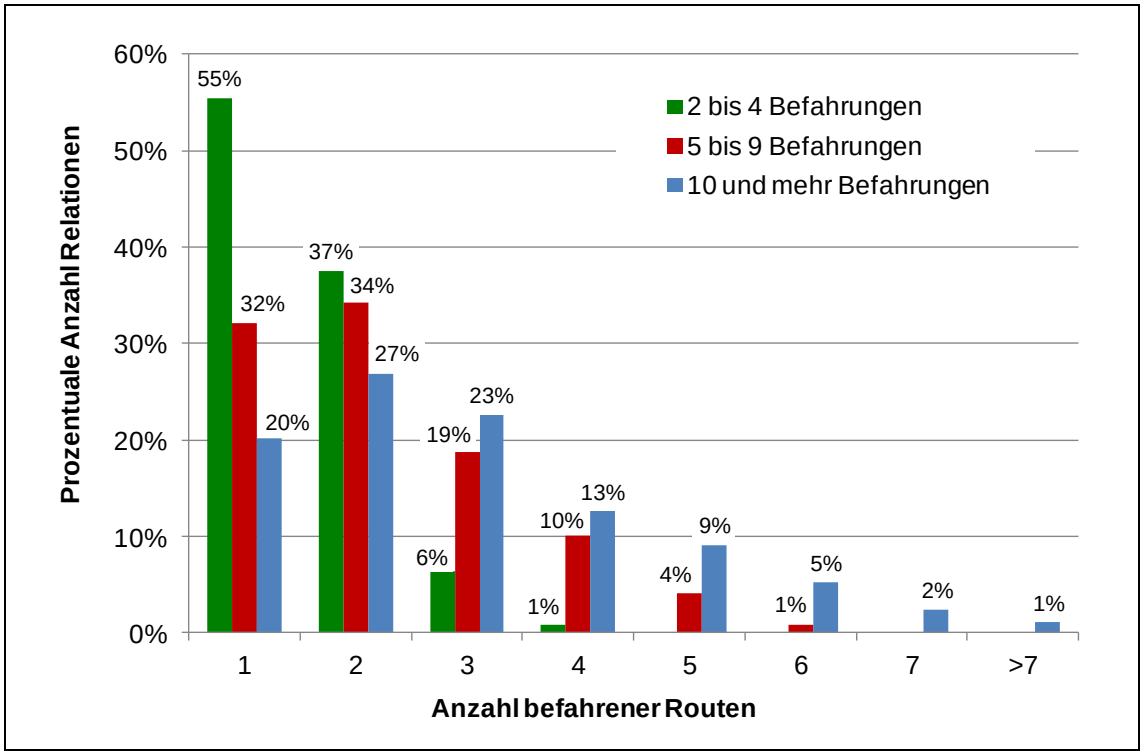


Bild 50: Anzahl Routen auf Relationen

Tabelle 26: Nutzungshäufigkeiten der Routen

Attribut	Relationen mit 2 bis 4 Befahrungen	Relationen mit 5 bis 9 Befahrungen	Relationen mit 10 und mehr Befahrungen
Durchschnittliche Anzahl befahrener Routen	1,5	2,2	3,0
Nutzungshäufigkeit der Hauptroute	77%	64%	61%
Nutzungshäufigkeit einer anderen Route	33%	36%	39%

Dies spiegelt sich ebenfalls in den ansteigenden Mittelwerten der Anzahl befahrener Routen, dargestellt in Tabelle 26, wieder. Dieser ist mit durchschnittlich 3 genutzten Routen auf den Relationen, die mindestens 10 Mal befahren werden, etwa doppelt so hoch wie auf Relationen, welche zwischen 2 und viermal befahren werden. Ebenfalls erkennbar ist, dass die Nutzungshäufigkeit der Hauptroute mit Anzahl der Befahrungen

einer Relation abnimmt. Die Bereitschaft, eine andere Route als die Hauptroute zu nutzen, nimmt demnach zu.

Die Ergebnisse machen deutlich, dass allein aus der Anzahl beobachteter Routen in einem begrenzten Zeitraum, nicht direkt eine Aussage über die eigentliche Choice Set Größe abgeleitet werden kann. Um weitere Aussagen über diejenigen Routen, die in Betracht bezogen, jedoch nicht gewählt werden, treffen zu können, werden die benannten Routen aus der Befragung näher untersucht (vgl. Kapitel 0). Abgefragt werden hier die bekannten Routen zwischen Wohnort und Arbeitsplatz.

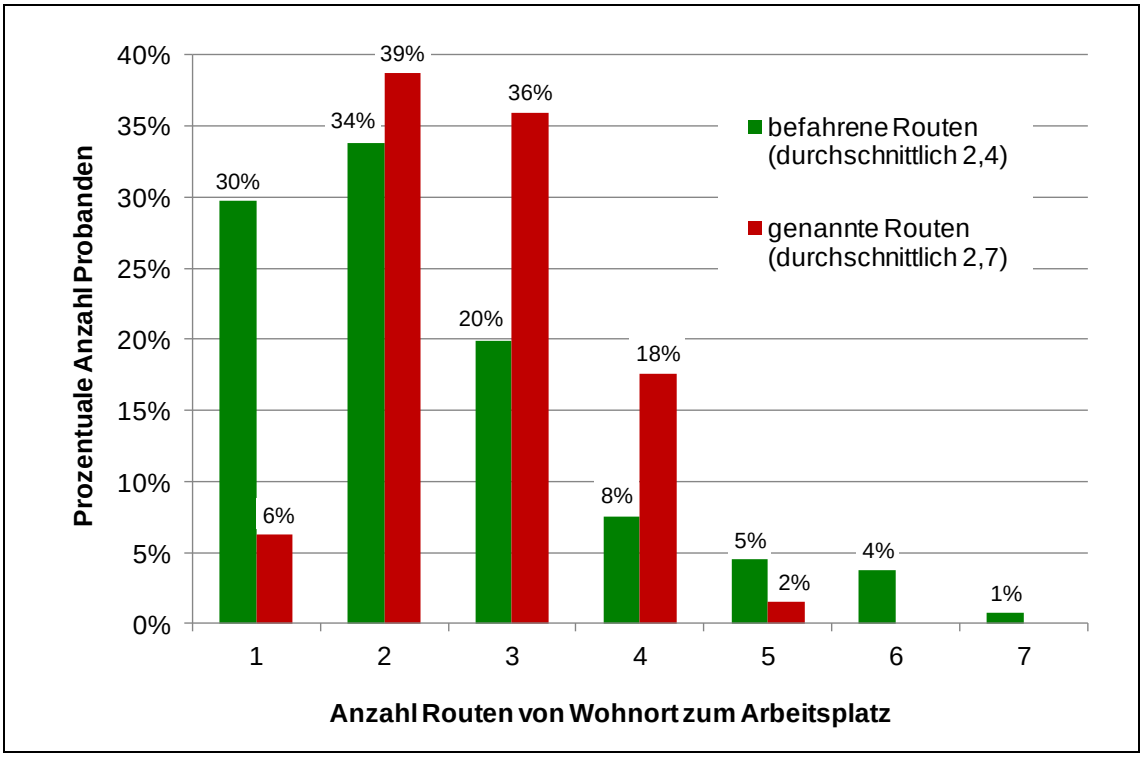


Bild 51: Anzahl Routen zwischen Wohnort und Arbeitsplatz

Das Diagramm in Bild 51 zeigt den Anteil der Probanden je Anzahl der befahrenen und der genannten Routen auf dem Weg vom Wohnort zum Arbeitsplatz. Die durchschnittliche Anzahl der genannten Routen liegt mit 2,7 über dem Mittelwert von 2,4 benannten Routen. Lediglich 6% der Probanden geben während der Befragung an, nur eine Route zu kennen. Gleichzeitig nutzen etwa 30% der Probanden auf dem Weg zur Arbeit während der achtwöchigen Erhebung stets die identische Route. Im Gegenzug nutzen rund 9% der Probanden mindestens fünf verschiedene Routen während nur 1,5% der Probanden 5 Routen benennen. Daraus lässt sich der Schluss ziehen, dass das benannte Choice Set aus der Befragung die tatsächlich gewählten Routen aus der Erhebung nicht vollständig enthält.

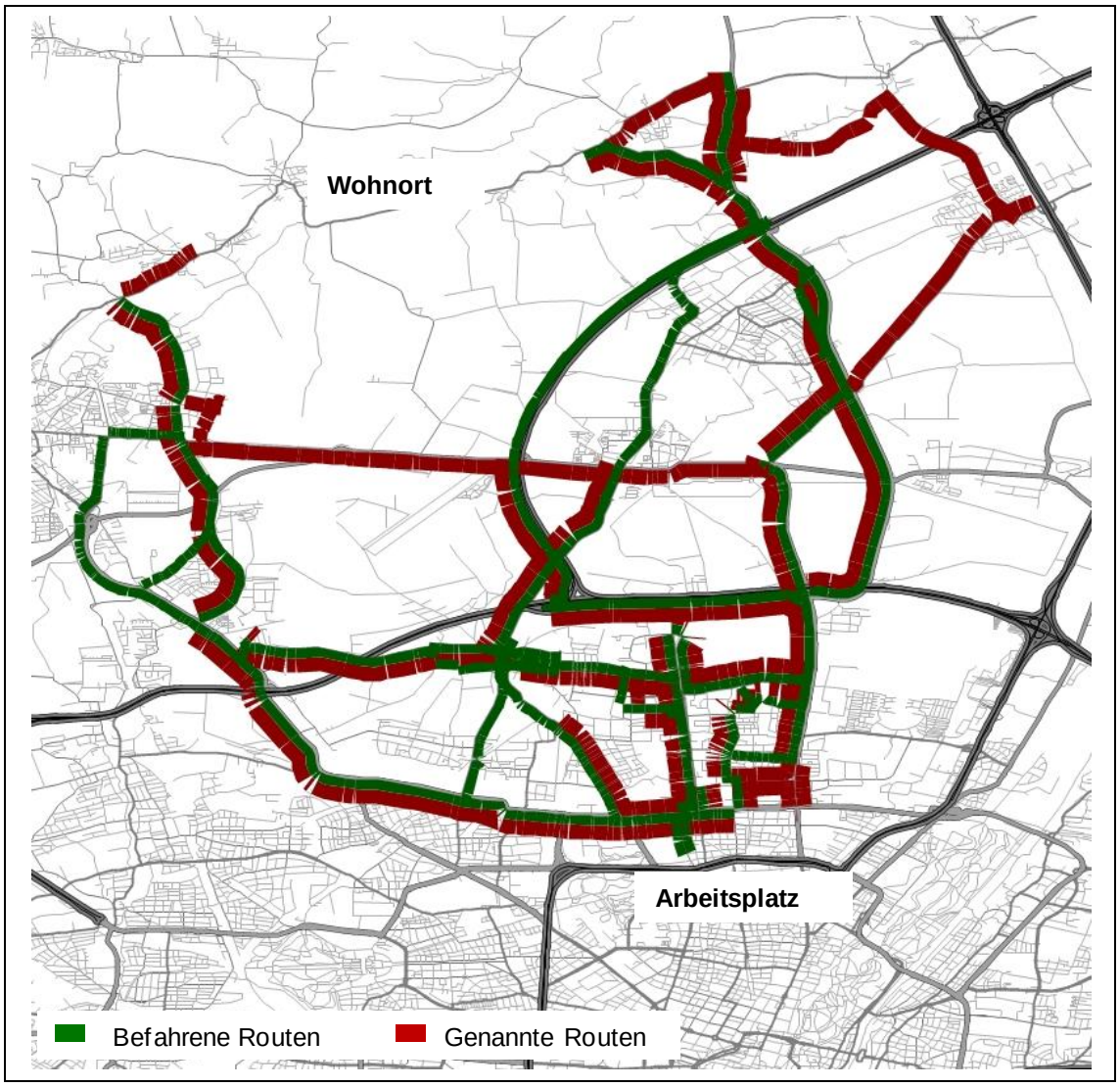


Bild 52: Befahrene und genannte Routen zwischen Wohnort und Arbeitsplatz

Tabelle 27: Überdeckung befahrener und genannter Routen

Attribut	Anzahl Routen	Anteil an gesamter Routenmenge	Anteil an genannter Routenmenge	Anteil an befahrener Routenmenge
Verschiedene Routen gesamt	1.038	100%	-	-
Genannte Routen	690	66%	100%	-
Befahrene Routen	632	61%	-	100%
Genannte und befahrene Routen	284	27%	41%	45%
Ausschließlich befahrene Routen	348	34%	-	55%
Ausschließlich genannte Routen	406	39%	59%	-

Die in Bild 52 dargestellten Routen bestätigen diesen Schluss. Abgebildet sind beispielhaft die gefahrenen (grün dargestellt) und benannten (rot dargestellt) Routen der Probanden, welche ihren Wohnort nordöstlich des Autobahnabschnittes der A92 haben. Es ist zu erkennen, dass es Routen gibt, die sowohl genannt als auch befahren

wurden. Darüber hinaus gibt es Routen, welche ausschließlich benannt bzw. ausschließlich befahren wurden. Tabelle 27 fasst die Analyse, inwiefern sich die Menge der genannten und der befahrenen Routen überdecken, für alle Probanden zusammen.

Insgesamt können 1.038 verschiedene Routen zwischen Wohn- und Arbeitsort beobachtet bzw. aus der Befragung ermittelt werden. 690 Routen davon werden benannt und 632 tatsächlich befahren. Daraus folgt, dass mit 27% nicht einmal ein Drittel der Routen sowohl befahren als auch genannt werden. Für die befahrenen Routen resultiert, dass nur 45% tatsächlich auch genannt werden. Routen die ausschließlich befahren werden, geben den Hinweis darauf, dass das Abfragen eines Choice Sets nicht unmittelbar funktioniert. Je höher die Anzahl der Routen die lediglich benannt und nicht befahren werden, desto niedriger ist die Vollständigkeit des abgefragten Choice Sets. Da der Anteil in der Untersuchung bei 55% liegt, ist davon auszugehen, dass das abgefragte Choice Set nicht ausreichend vollständig ist. Auch in Kombination mit den beobachteten Routen, die direkt letztendlich nur Aufschluss über die gewählten, aber nicht über die nichtgewählten Alternativen geben, kann das Choice Set als unvollständig eingestuft werden. Vor diesem Hintergrund werden zur Komplettierung des Choice Sets zusätzliche Routen generiert.

3.4.2.1.2 Methode zur Erzeugung der Alternativrouten

Einen Überblick über die zur Erzeugung der Alternativrouten angewandte Methode gibt Bild 53. Zunächst wird für jede Relation, auf der eine Ortsveränderung erfasst wurde, ein räumliches Choice Set erstellt. Dies besteht aus drei Routenarten. Zum einen aus den genannten als auch aus den befahrenen Routen. Zum anderen aus zusätzlich generierten Routen. Die Routengenerierung bezieht akzeptierte Umwegfaktoren, die aus den genannten Routen abgeleitet werden, mit ein. Für jede Ortsveränderung wird daraufhin aus dem räumlichen Choice Set der entsprechenden Relation, auf der die Ortsveränderung durchgeführt wurde, mit den Verkehrslagedaten aus dem aufgebauten Datenarchiv ein zeitabhängiges Choice Set generiert.

Für die Generierung von Routen ist der Netzumgriff eine maßgebende Größe. Darüber hinaus hat die Auflösung des Netzes Einfluss auf die Anzahl der gefundenen Routen. Je detaillierter das Straßennetz abgebildet ist, desto mehr Entscheidungsmöglichkeiten für eine Route bieten sich. Zudem ist die Anzahl der enthaltenen Strecken und Knoten entscheidend für die rechentechnische Umsetzbarkeit des angewandten Algorithmus zur Routengenerierung. Vor diesem Hintergrund bildet das Projektnetz die Grundlage zur Routengenierung. Gegenüber dem Lokalisierungsnetz ist das Projektnetz auf das strategische bzw. maßnahmenrelevante Verkehrsnetz reduziert (vgl. Snethlage et al. [41]) und enthält somit die maßgebenden Entscheidungsebenen der

Verkehrsteilnehmer. Darüber hinaus liegen die zeitabhängigen Attribute, welche im Vordergrund der Routenwahlanalyse stehen, ausschließlich auf dieser Ebene vor.

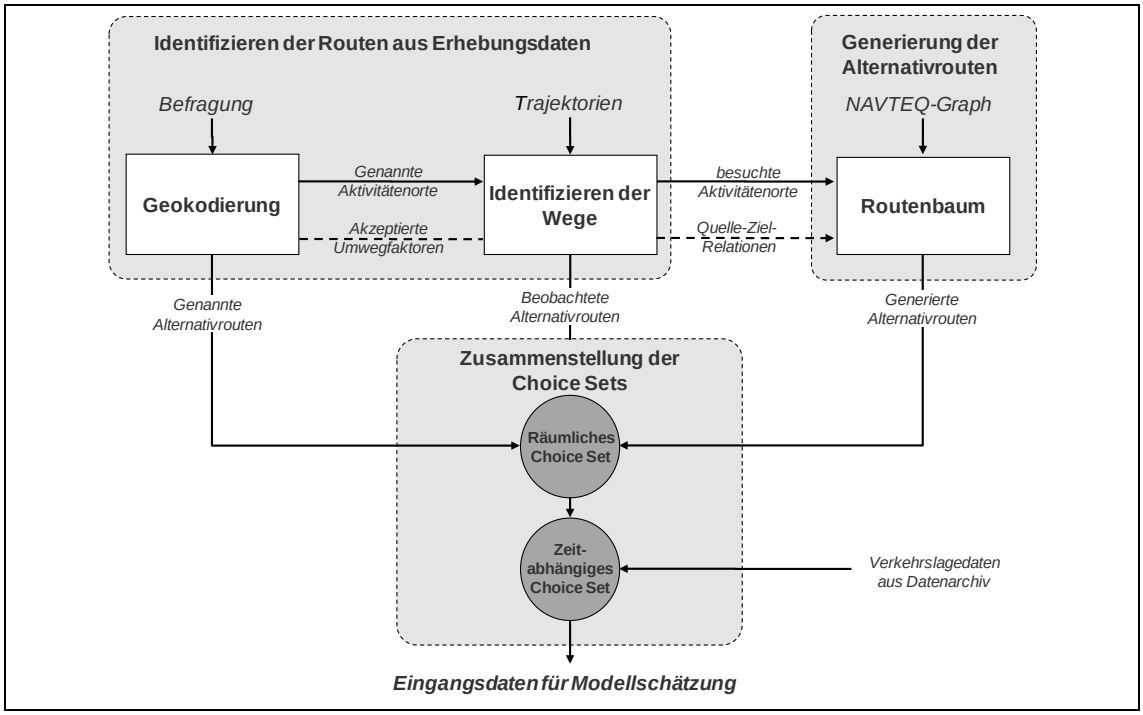


Bild 53: Methode zur Erzeugung der Alternativrouten

Die für die rechentechnische Umsetzbarkeit notwendige Vereinfachung des Projektnetzes wird im folgenden Kapitel 3.4.2.1.3 behandelt. Die Generierung zusätzlicher Routen, erläutert in Kapitel 3.4.2.1.4, findet dann auf diesem vereinfachten Projektnetz statt. Die generierten Routen müssen daraufhin in das originale Projektnetz zurücktransformiert werden (siehe Kapitel 3.4.2.1.5). Das Zusammenführen der drei Routenarten zu einem räumlichen Choice Set wird in Kapitel 3.4.2.1.6 und die daraufhin erfolgende Erstellung der dynamischen Choice Sets, inklusive der zugehörigen Attributierung, in Kapitel 3.4.2.2 beschrieben.

3.4.2.1.3 Vereinfachung des Projektnetzes

Um die rechentechnische Performance des Algorithmus' zur Routengenerierung zu optimieren, wird das Projektnetz soweit wie möglich vereinfacht, ohne das abgebildete Verkehrsnetz zu reduzieren. Zu diesem Zweck werden parallel verlaufende Strecken, die zweibahnige Straßenverläufe repräsentieren, zu einer in zwei Richtungen befahrbaren Strecke zusammengefasst. Desweiteren werden detailliert abgebildete Knotenpunkte, wie Autobahndreiecke bzw. -kreuze zu einem Knoten aggregiert. Bild 54 veranschaulicht das dabei angewandte Vorgehen.

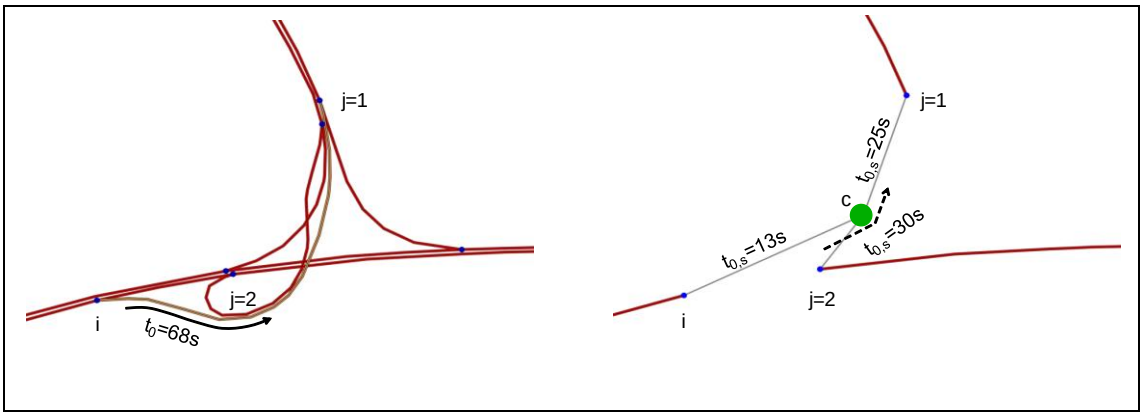


Bild 54: Vereinfachung komplexer Knotenpunkte

Im linken Teil ist der zu vereinfachende Knotenpunkt dargestellt, der sowohl parallel zulaufende Strecken als auch die in der Realität zu durchfahrenden Rampen enthält. Das INTREST-Datenmodell erlaubt nun als erstes, durch eine sogenannte "ComplexNode-ID", die eine Referenz auf Autobahn- und autobahnähnliche Knotenpunkte darstellt, alle Netzknoten, die zu einem komplexen Knotenpunkt gehören, zu identifizieren und zu gruppieren. Desweiteren wird das Attribut "Intersection-ID" herangezogen, das weniger komplexe Knotenpunkte gruppiert, die mit einem einzelnen Fahrmanöver passierbar sind. Nicht alle im Netz enthaltenen Knoten ist eine ComplexNode-ID bzw. Intersection-ID zugeordnet. Die nachfolgend beschriebenen Schritte sind daraufhin für jeden im Netz enthaltenen komplexen Knotenpunkt durchzuführen:

1. **Schwerpunkte neu setzen**: Aus den Koordinaten der gruppierten Knotenpunkte (im linken Teil in Bild 54 blau eingefärbt) lässt sich ein neuer Knotenschwerpunkt (im rechten Teil in Bild 54 grün eingefärbt) berechnen, der den kompletten Knotenpunkt vereinfacht repräsentiert.
2. **Randknoten identifizieren:** Hier werden sogenannte Randknoten durch Strecken identifiziert, die Knotenpunkte des komplexen Knotenpunktes mit anderen Knoten des Netzes verbinden. Die ComplexNode-IDs der Von- bzw. Nachknoten einer zum Randknoten zugehörigen Strecke müssen somit verschieden sein. Die identifizierten Randknoten sind im rechten und linken Teil in Bild 54 mit den Buchstaben i und j gekennzeichnet.
3. **Parallelen identifizieren:** Parallele Strecken sind über identische ComplexNode-IDs der Von- und Nachknoten identifizierbar. Ist lediglich eine von beiden ComplexNode-IDs zugeordnet und identisch, wird zusätzlich die Intersection-ID herangezogen. Ist diese identisch, gelten die Strecken ebenfalls als parallel. Von allen parallel zueinander verlaufenden Strecken wird die kürzeste behalten und die anderen verworfen. Die Von- und Nachknoten der verworfenen Strecken werden als Referenz am Von- und Nachknoten der beibehaltenen Strecke hinterlegt. Die Attribute der befahrbaren Richtung der verworfenen Strecke werden der Gegenrichtung der beibehaltenen Strecke zugeordnet.

4. **Löschen alter und Hinzufügen neuer Strecken:** In diesem Schritt werden diejenigen Knoten gelöscht, die einem komplexen Knotenpunkt zugeordnet und gleichzeitig keine Randknoten sind und somit auch alle Strecken, die sich innerhalb des komplexen Knotenpunktes befinden. Die Randknoten des komplexen Knotenpunktes werden nun durch Hinzufügen neuer Strecken (in Bild 54 grau eingefärbt) mit dem neuen Knotenschwerpunkt verbunden. Dieser Schritt wird nur dann durchgeführt, wenn die resultierende Anzahl neu hinzugefügter Strecken kleiner ist als die Anzahl der existierenden Strecken, die gelöscht werden würden.
5. **Fahrzeiten neu setzen**: Die Fahrzeiten t^V der hinzugefügten Strecken im vereinfachten Netz sind nun basierend auf der Fahrzeit t^O des kürzesten Weges im originalen Netz (gelb markiert im linken Teil in Bild 54) neu zu berechnen. Diese Fahrzeit im originalen Netz muss dafür auf die neuen Strecken und Abbieger im vereinfachten Netz aufgeteilt werden. Die Fahrzeit einer neu hinzugefügten Strecke vom Randknoten i zum neuen Knotenschwerpunkt C ergibt sich zunächst aus demjenigen Anteil der Gesamtfahrzeit des Kurzweges im Originalnetz von i nach j, der dem Längenanteil der Strecke von i nach C an der Gesamtlänge des Kurzweges im vereinfachten Netz von i nach j entspricht. Eine neu hinzugefügte Strecke von i nach C gehört nun zu jeder von i startenden Relation zu einem anderen Randknoten. Im dargestellten Beispiel gehört die Strecke von i nach C zum Kurzweg von i nach j=1 und von i nach j=2. Die Strecken- und Abbiegerzeiten im vereinfachten Netz sind demzufolge so zu setzen, dass die Fahrzeit des Kurzweges von i nach j im vereinfachten Netz für alle Relationen im komplexen Knotenpunkt den Fahrzeiten des Kurzweges im originalen Netz entspricht. Deshalb ergibt sich die Fahrzeit für den Abschnitt von i nach C aus dem minimalen Anteil der Fahrzeiten der Kurzwege aller Relation innerhalb des komplexen Knotens, die vom Randknoten i starten (Teil (1) der nachstehenden Formel). Die fehlende Fahrzeit, um von i nach j zu gelangen, wird komplett dem Abbieger von i über C nach j hinzugefügt (Teil (2) der nachstehenden Formel). Die Fahrzeit auf der Strecke von C nach j wird auf null gesetzt. Diese Berechnung findet für alle Randknoten innerhalb des komplexen Knotenpunktes statt.

$$t^V_{i\to C} = \min\left\{ t^O_{i\to j} \cdot \frac{l^V_{i\to C}}{l^V_{i\to C} + l^V_{C\to j}} \;\forall i \neq j \in [1,n] \right\} \tag{8}$$

$$t^V_{i\to C\to j} = \min\left\{ t^O_{i\to j} - t^V_{i\to C} \forall i \neq j \in [1,n] \right\} \tag{9}$$

mit:

$t^V_{i\to C}$	Fahrzeit im vereinfachten Projektnetz von i nach C
$t^O_{i\to j}$	Fahrzeit im originalen Projektnetz von i nach l
$l^V_{i\to j}$	Länge im vereinfachten Projektnetz von i nach j
N	Anzahl im komplexen Knotenpunkt enthaltenen Randknoten

6. **Löschen zweiarmiger Knotenpunkte:** Abschließend werden die zweiarmigen Knotenpunkte aus dem resultierenden Netz entfernt. Es werden nur diejenigen Knoten gelöscht, die Strecken verbinden, auf denen die identische Menge an Verkehrssystemen zugelassen ist. Die Fahrzeit der neuen Strecke ergibt sich dann aus der Summe der Fahrzeiten der beiden ursprünglichen Strecken.

Mit der Vereinfachung des Netzes kann sowohl die Anzahl der Knoten, als auch die Anzahl der Strecken um mehr als die Hälfte reduziert (vgl.Tabelle 28) werden, ohne dabei die Anzahl der Fahrtmöglichkeiten zu verringern. Die Übereinstimmung der Reisezeiten auf den Kurzwegen aller Relationen im originalen und im vereinfachten Projektnetz ist in Tabelle 29 zusammengefasst. Da das vereinfachte Projektnetz ausschließlich für die Routensuche herangezogen wird, können diese Abweichungen als vernachlässigbar eingestuft werden. Der beschriebene Algorithmus ist grundsätzlich auf allen Netzen anwendbar, in denen enthaltene komplexe Knotenpunkte eine entsprechende Referenz (ComplexNode-ID und Intersection-ID) besitzen.

Tabelle 28: Mengenbilanz der Projektnetzvereinfachung

Attribut	Originales Projektnetz	Vereinfachtes Projektnetz
Anzahl Knoten	48.354	22.620
Anzahl Strecken	17.004	7.703

Tabelle 29: Vergleich der Reisezeiten der Kurzwege aller Relationen zwischen originalem und vereinfachtem Projektnetz

Differenz der Reisezeiten der Kurzwegen zwischen originalem und vereinfachtem Projektnetz (relationsbezogen)	Anteil der Relationen
< 5% Unterschied	74%
< 10% Unterschied	97%
< 15% Unterschied	100%

3.4.2.1.4 Aufbau des Routenbaums

In der Literatur existiert eine Vielzahl von Ansätzen zur Generierung von verschiedenen Routen auf einer Relation. Basierend auf dem Bestwegverfahren (vgl. Dijkstra [17]) wurde eine Reihe von Mehrwegverfahren entwickelt. Zum einen existieren deterministische Verfahren, wie der Link-Labeling-Ansatz (vgl. Ben-Akiva et al. [9]), der Link-Elimination-Ansatz (vgl. Azedevo [4] et al), der Link-Penalty-Ansatz (vgl. de la Berra et al. [14]) und verschiedene Branch-and-Bound-Ansätze (vgl. Prato et al. [30], Friedrich et al. [21]). Zum anderen existieren stochastische Ansätze, die die Widerstände eines Netzes wahrscheinlichkeitsbasiert variieren, um mehrere Routen einer Relationen zu finden (vgl. Miller et al. [29], Ramming [32]). Bis auf den Branch-

Bound-Algorithmus haben alle diese Ansätze prinzipiell gemeinsam, dass sie auf einer wiederholten Bestwegsuche basieren, bei dem auf verschiedene Art und Weise die Widerstände im Netz verändert und so mehrere Routen gefunden werden. Die Anzahl der gefundenen Routen und die resultierenden Umwegfaktoren sind abhängig von den Kriterien für die Veränderungen der Widerstände und der Anzahl an Iterationen. Routen z.B. mit einem als zu hoch eingestuften Umwegfaktor können daraufhin aus dem Choice Set entfernt werden. Eine Betrachtung von Umwegfaktoren auf Teilen der Route ist in diesem Fall nicht ohne weiteres möglich. Zwar können zulässige Umwegfaktoren in Abhängigkeit der Routenlänge in der Art definiert werden, dass der zulässige Faktor mit steigender Routenlänge abnimmt. Dennoch können auf diese Art keine Routen ausgeschlossen werden, die auf kurzen Abschnitten unplausible Umwege enthalten, da diese mit steigender Routenlänge weniger ausschlaggebend sind. Besonders auf langen Relationen entstehen dann in detailliert abgebildeten Netzen fehlerhafte Choice Sets. Daher ist die Anwendung eines Algorithmus‘ wünschenswert, der die Betrachtung von Teilrouten erlaubt. Vor diesem Hintergrund wird für die Generierung der Routen ein Branch-and-Bound-Algorithmus verwendet. Dieser erlaubt es, auf Basis vollständiger Enumeration, Ausschlusskriterien für Teilrouten zu definieren. Vollständige Enumeration bedeutet im klassischen Sinne, alle Routen auf einer Relation mit dem Aufspannen eines Routenbaums, basierend auf einem gerichteten Graphen, zu erstellen. Die Wurzel des Graphen repräsentiert die Quelle der Relation und die Äste des Routenbaums die gefundenen Routen. Durch Definition von Kriterien, die jeder schrittweise zum Routenbaum hinzuzufügende Knoten erfüllen muss, ist es möglich, gefundene Teilrouten auszuschließen (Branch-and-Bound). Die resultierenden Routen sind dann abhängig von den Kriterien, die für enthaltene Teilrouten definiert sind, z.B. Umwegfaktoren basierend auf dem Kurzweg für diese Teilrouten. Für jeden neuen Knoten, der als Element eines Routenastes hinzugefügt wird, werden verschiedene Kriterien geprüft. Schlaich stellt in [38] eine Methode vor, in der jeder hinzuzufügende Knoten die folgenden drei Kriterien zu erfüllen hat:

- Die Route darf keine Kreisfahrten enthalten (Der Routenast wird verworfen, wenn der Knoten bereits Teil dieses Routenastes ist)
- Umwegfaktor entlang der gesamten Routen (Der Routenast wird verworfen, wenn der Umwegfaktor vom aktuellen Knoten zum ersten Knoten der Route einen bestimmten Wert überschreitet.)
- Umwegfaktor für das letzte, aktuelle Teilstück der Route (Der Routenast wird verworfen, wenn der Umwegfaktor auf der Teilroute zwischen dem aktuellen Knoten und dem vorangegangenen Knoten der sich in 15 Minuten Entfernung auf der aktuellen Routen befindet, einen bestimmten Wert überschreitet.)

Sowohl die komplexe Netzstruktur als auch die Vielfältigkeit der beobachteten Routen, für die die Choice Sets zu generieren sind (kurze und lange Routen, innerstädtische Routen, Routen auf dem Autobahnnetz), erfordern differenzierte Kriterien für

verschiedene Teilroutenlängen. Bild 55 verdeutlicht die beschriebene Problematik. Dargestellt ist ein Teil einer zu generierenden Route (blaue, durchgezogene Linie), auf der Relation vom Wohn- zum Arbeitsort (gekennzeichnet durch einen grauen Punkt). Der aktuell zum Routenbaum hinzuzufügende Knoten ist rot markiert. Der kürzeste Weg innerhalb einer auftretenden Routenmasche ist blau gestrichelt gekennzeichnet. Das linke Bild verdeutlicht das Abprüfen des Umwegfaktors, der sich ausgehend vom Quellknoten ergibt. Im rechten sind die Maschen verschiedener Größe verdeutlicht, für die zulässige Umwegfaktoren zu definieren sind.

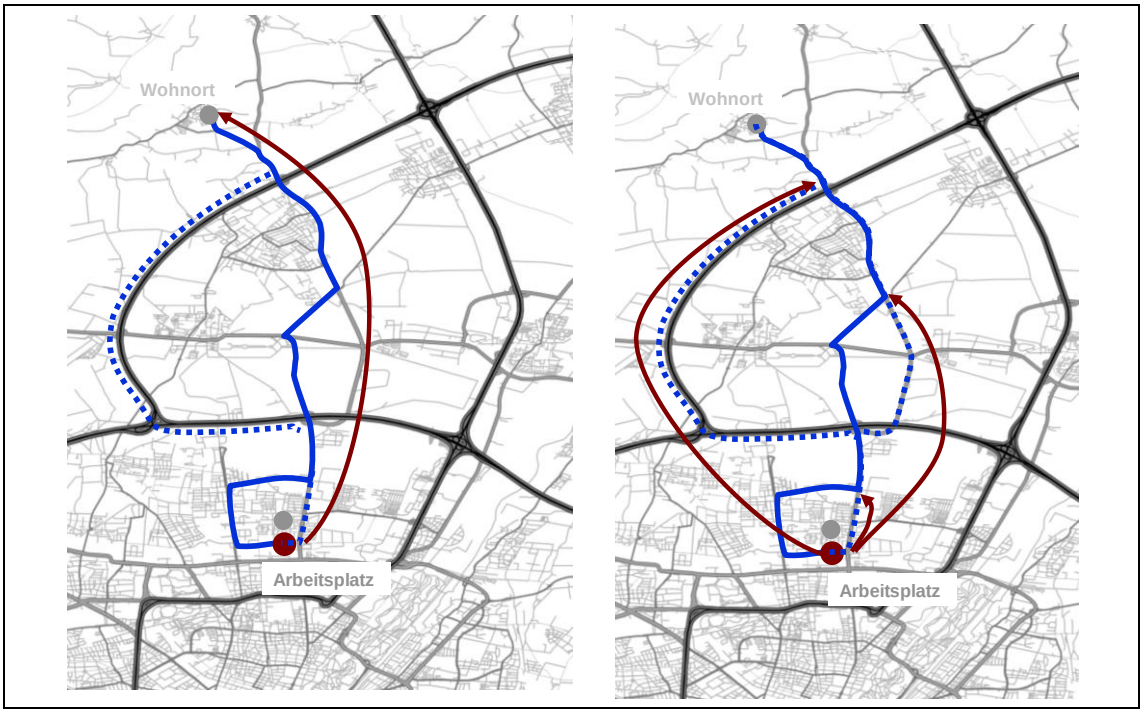


Bild 55: Kriterien für Umwegigkeit in Maschen verschiedener Größe

Aufgrund der unterschiedlichen Netzdichten im Projektnetz (sowohl ländlicher Bereich als auch innerstädtischer Bereich) werden für die Routengenerierung in *wiki* vier Maschengrößen mit spezifischen, zulässigen Umfaktoren definiert, was einer Ausdifferenzierung des dritten Kriteriums von Schlaich et al. [38] entspricht. Dies führt zu folgender Berechnungsvorschrift für die maximal zulässige Reisezeit vom aktuell hinzuzufügenden Knoten zum Beginn einer Masche auf der aktuellen Teilroute:

$$t_{\max} = \min\left[\begin{cases} 1{,}0 \cdot t_{\min}, wenn & t_{\min} < 250 \\ 2{,}0 \cdot t_{\min}, wenn & t_{\min} < 450 \\ 1{,}6 \cdot t_{\min}, wenn & t_{\min} < 1.000 \\ 1{,}4 \cdot t_{\min}, wenn & t_{\min} \geq 1.000 \end{cases}, t_{\min} + 1.800\right] \qquad (10)$$

mit: t_{min} [s] Fahrzeit des kürzesten Weges zwischen aktuellem Knoten und Maschenbeginn

t_{max} [s] Fahrzeit zwischen aktuellem Knoten und Maschenbeginn auf aktueller Teilroute

Die in Formel 10 enthaltenen Parameter entsprechen den maximal zulässigen Umwegfaktoren. Der rechte Teil der Formel sagt aus, dass für keine Teilroute ein absoluter Umweg von mehr als 1.800 Sekunden, also eine halbe Stunde, zulässig ist. Da zunächst für jede Relation ein räumliches Choice Set generiert werden soll, das Basis für die dynamischen Attribute in Anhängigkeit vom Zeitpunkt der durchgeführten Ortsveränderungen ist, wird als Kriterium die freie Fahrzeit im unbelasteten Netz herangezogen.

Die angewandten Faktoren sind maßgebend für Anzahl und Art der generierten Routen und sollten sich daher möglichst an beobachtetem Verhalten orientieren. Zur Bestimmung dieser Faktoren werden daher die benannten Routen zwischen Wohn- und Arbeitsort herangezogen, da diese Aufschluss darüber geben, wie groß die akzeptierten Umwegfaktoren entlang von Teilrouten sind, die von den Probanden grundsätzlich in Betracht gezogen werden. Ein Beispiel, dargestellt in Bild 56, soll das Vorgehen verdeutlichen.

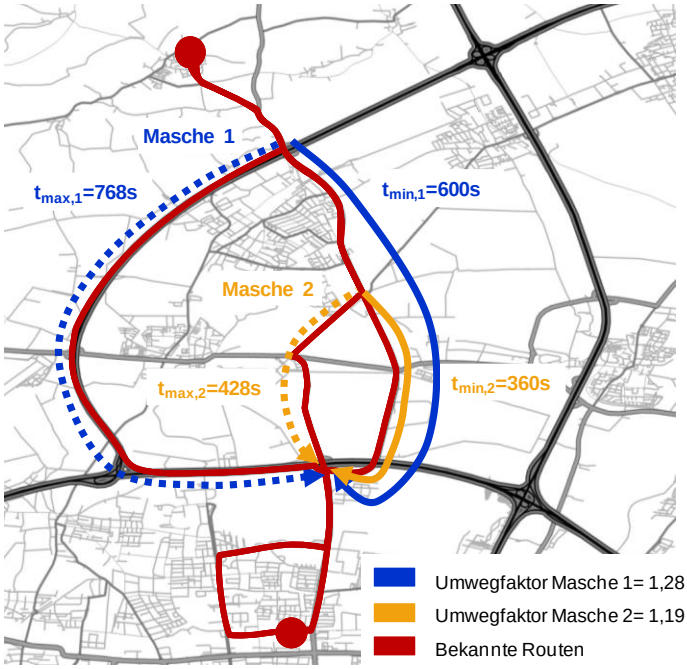


Bild 56: Ableiten der Parameter für zulässige Umwegfaktoren

Für jeden Probanden werden die jeweils benannten Routen, in diesem Fall fünf (rot gekennzeichnet), herangezogen. Aus den benannten Routen können in Zusammenhang mit dem vorhandenen Netz Maschen verschiedener Größen identifiziert werden, bei dem u.a. der längere Teil der Masche genannt wurde. Zwei dieser Maschen sind gekennzeichnet. In Masche 1 (blau eingefärbt) ergibt sich aus dem Verhältnis der maximal akzeptierten Fahrzeit und der minimalen, also aus dem Kurzweg resultierenden Fahrzeit, ein akzeptierter Umwegfaktor von 1,28. Für die gelbe Masche ergibt sich hingegen ein Umwegfaktor von 1,19. Für jeden Probanden werden nun alle Maschen dieser Art identifiziert und die akzeptierten Umwegfaktoren bestimmt.

In Bild 57 sind alle diese abgeleiteten Umwegfaktoren als Datenpunkte in Abhängigkeit von der minimalen Reisezeit der Masche eingezeichnet. Jeder Punkt repräsentiert einen aus den benannten Routen abgeleiteten, akzeptierten Umwegfaktor. Die graue Linie stellt die abgeleitete Funktion für die akzeptierten Umwegfaktoren dar, wie sie auf Seite 100 als Formel notiert ist. Die Abschnitte und Funktionswerte werden dabei so gewählt, dass, bis auf beobachtete Extremwerte, alle Werte einbezogen und gleichzeitig möglichst niedrige Funktionswerte definiert werden. Für Maschen, die auf dem Kurzweg in weniger als 250 Sekunden zu durchfahren sind, wird nur dieser Kurzweg zugelassen, da die Anzahl der resultierenden Routen möglichst klein sein soll und die Analyse des großräumigen Verhaltens im Betrachtungsfokus steht. Die abgeleitete Funktion ist das Ergebnis eines iterativen Optimierungsprozesses, in dem die Anzahl der resultierenden Routen möglichst klein und die erhobenen akzeptierten Umwegfaktoren möglichst gut in den generierten Routen wiedergespiegelt werden sollen.

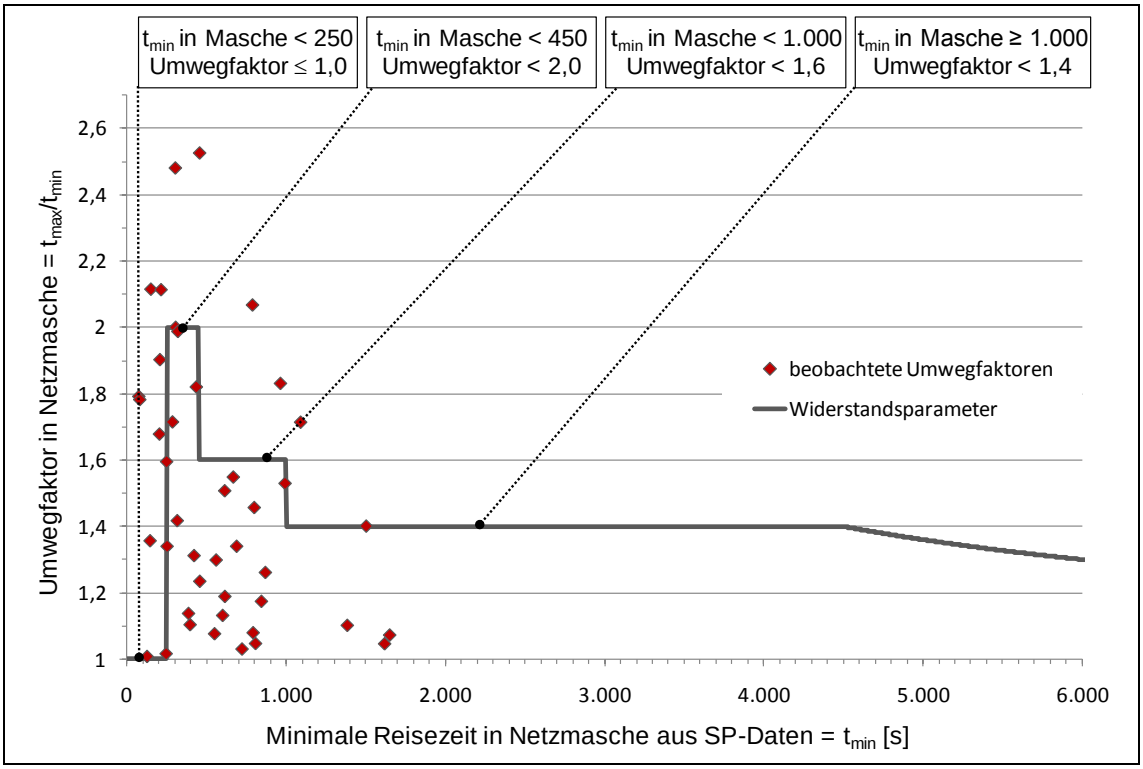


Bild 57: Parameter für zulässige Umwegfaktoren

Als abschließendes Beispiel ist in Bild 58 der resultierende Routenbaum, aufgestellt mit beschriebenem Algorithmus, angewendet auf ein Netz mit sieben Knoten, nochmals dargestellt. Für jede mögliche Route von Quelle Q zu Ziel Z entsteht ein Routenast. Eine vollständige Enumeration, ohne zugelassene Kreisfahrten, würde acht Routen entstehen lassen. Alle Äste, die Knotenelemente mit gestricheltem Rahmen enthalten, sind nicht Teil des resultierenden Routenbaums, da eines der Abbruchkriterien zum Ausschluss geführt hat. Für jeden aktuellen Knoten (derjenige am Astende des jeweiligen Generierungsschrittes) wird der Widerstand auf dem vorangegangenen

Teilstück zu einem bereits überfahrenen Knoten mit dem Widerstand des kürzesten Weges zwischen diesem Knotenpaar verglichen. In der Abbildung sind die Paarungen dieser Knoten mit den verschiedenen möglichen Teilrouten farblich gekennzeichnet. Die grüne Masche ist z.B. auf dem kürzesten Weg direkt von Knoten 1 nach 2 mit einer Fahrzeit von 10 Minuten zu durchfahren. Eine Alternative bietet der Fahrweg von Knoten 1 nach 3 und dann nach 2, mit einer Fahrzeit von 12 min. Der resultierende Umwegfaktor von 1,2 ist niedriger als der akzeptierte Umwegfaktor von 1,6 für einen Kurzweglänge mit 10 Minuten Dauer. Der Routenast mit der Teilroute von 1 nach 3 zu 2 wird also beibehalten. Zwei Beispiele von Ästen, welche verworfen werden, sind als blau bzw. rot gestrichelte Linien abgebildet. In diesen beiden Fällen werden nur die Routenäste beibehalten, welche diese Maschen (rot und blau eingefärbt) auf dem Kurzweg durchlaufen.

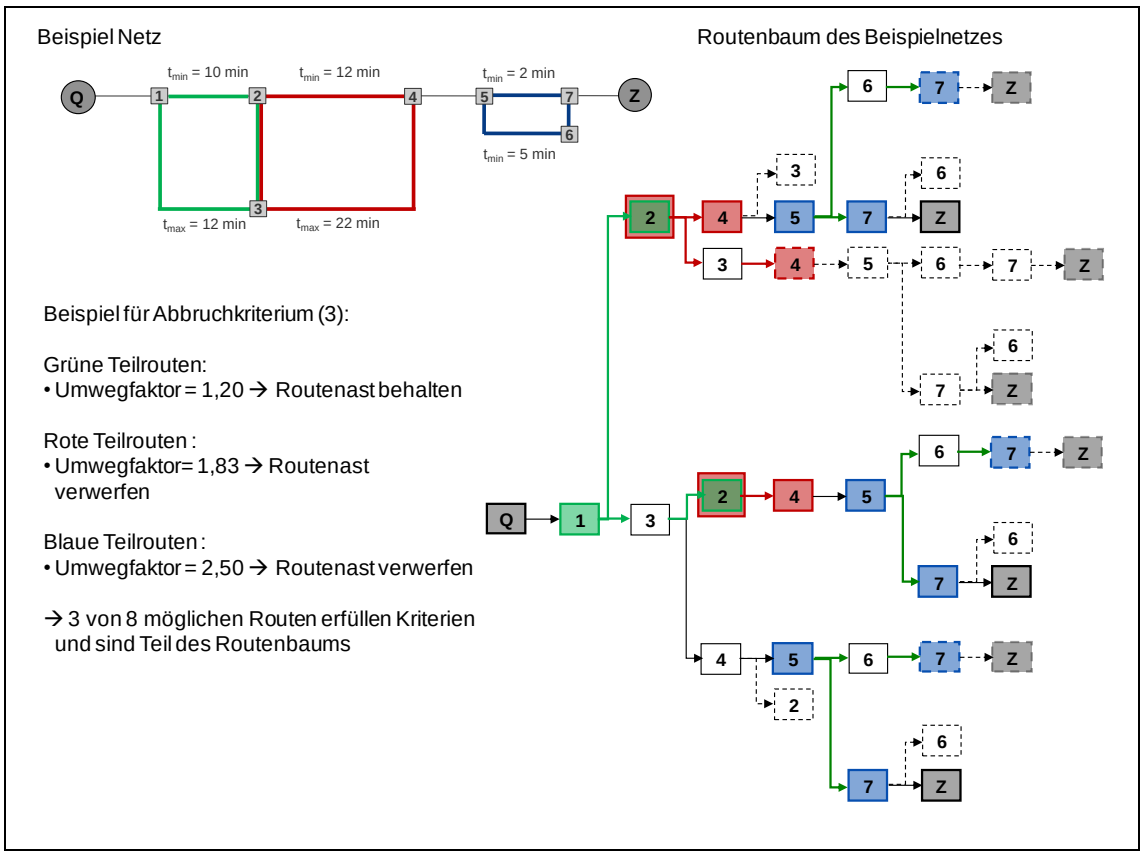


Bild 58: Beispiel Routenbaum

3.4.2.1.5 Rücktransformation in das Projektnetz

Um die generierten Routen mit dynamischen Attributen versehen zu können, müssen diese vom vereinfachten Projektnetz in das originale Projektnetz rücktransformiert werden. Da alle Knoten eines komplexen Knotens im originalen Netz zu einem neuen Knoten im vereinfachten Projektnetz zusammengefasst werden, ist die Rücktransformation nicht eindeutig. Enthält eine generierte Route diesen neuen

Knoten, ist nicht ohne weiteres bestimmbar, welche Knotenpunkte dieses komplexen Knotenpunktes im originalen Projektnetz tatsächlich Teil der Route sind. Bei parallelverlaufenden Strecken besteht das identische Zuordnungsproblem. Alle Elemente aus dem originalen Netz, die im vereinfachten Projektnetz nicht mehr enthalten sind, besitzen jedoch eine Referenz auf das neue Netzelement im vereinfachten Projektnetz. Auf diese Weise ist es für jedes Routenelement möglich, welches Teil des vereinfachten Projektnetzes ist, basierend auf dieser Referenzliste eine Menge an Strecken- bzw. Knotenelementen zu markieren. Bild 59 zeigt auf der linken Seite den Routenverlauf grün eingefärbt im vereinfachten Projektnetz. Auf der rechten Seite ist die markierte Menge der Netzelemente rot eingefärbt.

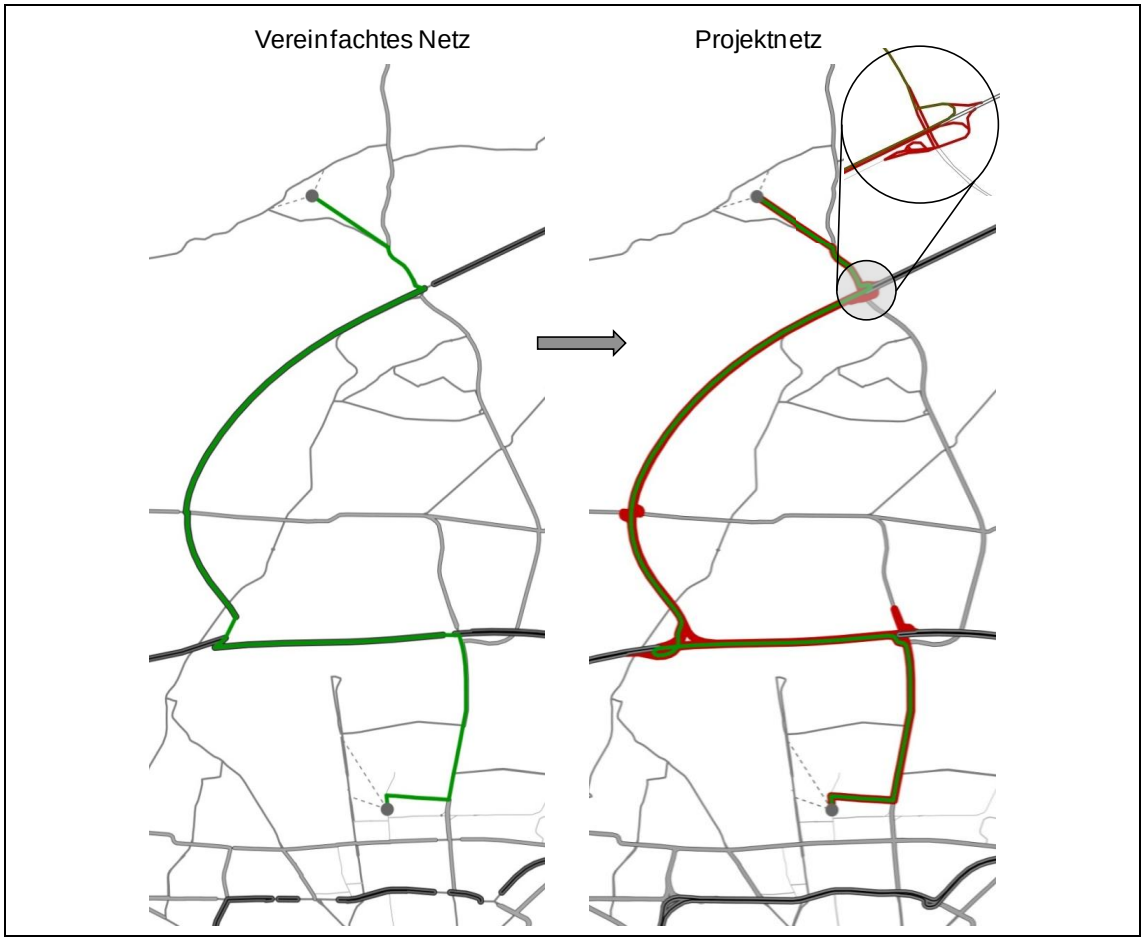


Bild 59: Rücktransformation der generierten Routen

Es ist erkennbar, dass für die Autobahnabschnitte jeweils beide Richtungen markiert sind. Innerhalb der komplexen Knotenpunkte sind ebenfalls alle zugehörigen Netzelemente, wie Rampen oder abgebildete Verflechtungsstreifen, gekennzeichnet. Um sicherzustellen, dass bei der Rücktransformation in das originale Projektnetz der richtige Routenverlauf erzeugt wird, erfolgt im originalen Projektnetz auf der entsprechenden Relation eine Kurzwegsuche mit angepasster Regel für den resultierenden Routenwiderstand (siehe nachfolgende Formel).

$$w_{route} = \sum_{s=l}^{L} t_s \cdot \left(a \cdot flag_s + 1\right) \tag{11}$$

mit:

w_{route}	Widerstand der Route im originalen Projektnetz
t_s	Fahrzeit, des Netzelements s, Menge l bis L enthält Elemente der Route im originalen Projektnetz
a	Parameter, bei dieser Anwendung a = 1.000
$flag_s$	0 wenn Netzelement s markiert ist, 1 wenn Netzelement s nicht markiert ist

Durch diese Art von Widerstandsfunktion werden Routenelemente, die nicht Teil der markierten Netzelemente sind, sehr unattraktiv, da die Fahrzeit des entsprechenden Netzelements um den Faktor 1.000 erhöht wird. Für jede generierte Route jeder Relation wird die entsprechende Menge an Strecken auf dem originalen Projektnetz markiert und eine automatisierte Kurzwegsuche durchgeführt. Als Ergebnis liegen alle generierten Routen im originalen Projektnetz vor.

3.4.2.1.6 Komposition der räumlichen Choice Sets

Für alle Relationen, auf denen die Probanden Ortsveränderungen durchgeführt haben, müssen nun aus den befahrenen, genannten und generierten Routen räumliche Choice Sets erstellt werden. Dazu werden die Routen einzeln, nacheinander zum Choice Set hinzugefügt. Um sicherzustellen, dass jede Route im Choice Set nur einmal vorhanden ist, wird ein sogenannter Ähnlichkeitsfaktor C verwendet (vgl. Cascetta [15]).

$$C_{ij} = \frac{l_{ij}}{\sqrt{l_j} \cdot \sqrt{l_i}} \tag{12}$$

mit:

C_{ij}	Ähnlichkeit zwischen Route i und Route j
l_i bzw. l_j	Länge der Route i bzw. der Route j
l_{ij}	Länge, auf der die Route i und j gemeinsam verlaufen

Bevor eine Route zum räumlichen Choice Set hinzugefügt wird, erfolgt die paarweise Prüfung der Ähnlichkeit zu allen anderen bereits im Choice Set enthaltenen Routen. Die Routen werden nur dann ins Choice Set aufgenommen, wenn der Ähnlichkeitsfaktor zu allen anderen Routen kleiner als 0,9 ist. So wird erreicht, dass sich die Routen ausreichend voneinander unterscheiden und die Größe des Choice Sets im angemessenen Bereich bleibt (vgl. Schüssler et al. [40]). Im ersten Schritt werden die befahrenen Routen hinzugefügt, dann die genannten und abschließend die generierten Routen. Demzufolge werden z.B. generierte Routen, die eine große Ähnlichkeit zu einer befahrenen Route aufweisen, nicht zum Choice Set hinzugefügt.

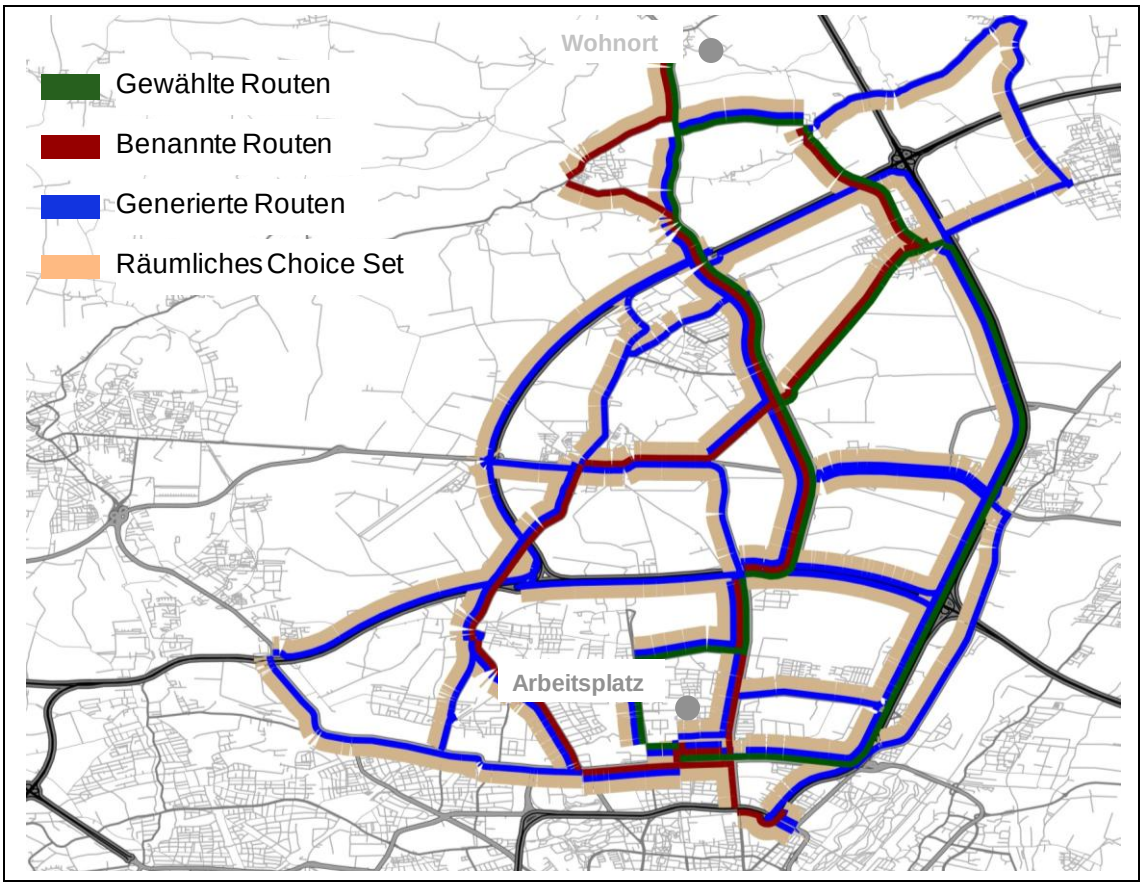


Bild 60: Beispiel räumliches Choice Set

Bild 60 zeigt ein resultierendes räumliches Choice Set für eine Relation vom Wohnort zum Arbeitsplatz. Für diesen Probanden wurden insgesamt 16 Ortsveränderungen aufgezeichnet. Die Ähnlichkeitsprüfung der aufgezeichneten Wege zeigt, dass dafür drei unterschiedliche Routen genutzt wurden. Bei der SP-Befragung benannte der Proband vier verschiedene, ihm bekannte Routen. Von diesen Routen hat er zwei befahren, so dass dem Choice Set zwei genannte Routen hinzugefügt werden. Von den 35 für die Relation genutzten Routen wurden zwei befahren und eine genannt. Demzufolge wird das Choice Set um 32 generierte Routen ergänzt. Das räumliche Choice Set besteht somit aus 37 verschiedenen Routen (vgl. Tabelle 30).

Tabelle 30: Beispiel Struktur räumliches Choice Set

Attribut	Anzahl	davon befahren	davon genannt	Anzahl resultierender Routen für Choice Set
Befahrungen	16	-	-	3
Genannt	4	2	-	2
Generiert	35	2	1	32
Gesamt ohne Ähnlichkeitsprüfung	55	-	-	-
Gesamt nach Ähnlichkeitsprüfung	-	-	-	37

Tabelle 31 zeigt den Umfang und die Zusammensetzung der Choice Sets bezüglich der verschiedenen Routenarten. Bezogen auf alle Relationen werden im Mittel 1,5 Routen befahren und 20,5 generiert. Die durchschnittliche Choice Set Größe beträgt 22,2 und ist somit vergleichbar mit der Größe aus anderen Untersuchungen (vgl. Dugge [18]).

Tabelle 31: Mengengerüst und Zusammensetzung der räumlichen Choice Sets

Routenart	Alle Relationen (Anzahl 4.100)	Wohnen - Arbeiten (Anzahl 266)	Mittelwert bezogen auf alle Relation	Mittelwert bezogen auf Wohnen - Arbeiten
Gefahren	6.208	632	1,5	2,4
Benannt	384	384	-	1,4
Generiert	84.270	8.364	20,5	31,4
Summe	90.862	9.380	22,2	35,3

Die Anzahl der Routen eines Choice Sets ist ein Resultat aus den vorhandenen Fahrtmöglichkeiten auf einer Relation. Je dichter das Netz ist, desto mehr Fahrtmöglichkeiten ergeben sich. Die Netzdichte ist in Ballungsräumen erheblich höher als im ländlichen Bereich, daher unterscheidet sich die Anzahl der Routen im Choice Set je nach räumlicher Lage der Relationen. Tabelle 32 zeigt in diesem Zusammenhang die mittlere Anzahl der Routen einer Relation in Abhängigkeit davon, ob die Quelle bzw. das Ziel in München lagen. Es ist zu erkennen, dass Relationen, die weder Quelle noch Ziel in München haben, also tendenziell auf Netzteilen mit niedrigerer Dichte verlaufen, mit 9,5 Routen die geringste Routenanzahl aufweisen. Für Relationen, die sowohl Quelle als auch Ziel in München haben, sind mit 24,2 Routen pro Relation deutlich mehr Routen im Choice Set enthalten. Obwohl die Luftlinienlänge der Relationen innerhalb von München erheblich kürzer ist, ergeben sich hier mehr Fahrtmöglichkeiten. Der höhere mittlere Umwegfaktor ist mit den Parametern der Routengenerierung zu erklären, die für eine bestimmte Maschengröße einen vergleichsweise hohen Umwegfaktor zulassen. Die höchste Anzahl an Routen weisen Relationen auf, die entweder in München enden oder beginnen, da sich hier zwei Effekte überlagern, die jeweils zu tendenziell mehr Routen führen: Zum einen ergeben sich in München mehr Fahrtmöglichkeiten aufgrund der höheren Netzdichte. Zum anderen sind diese Relationen auch im Mittel die längsten Relationen (ca. 27 km Luftlinienlänge). Je länger eine Relation ist, je mehr Alternativen ergeben sich tendenziell entlang der gefundenen Routen.

Tabelle 32: Mittlere Anzahl von Routen differenziert nach Lage

Attribut	Nicht München - Nicht München	Nicht München - München	München - Nicht München	München - München
Mittlere Luftlinienlänge	22,0	27,1	27,0	6,1
Mittlerer Umwegfaktor	1,70	1,54	1,58	1,90
Mittlere Anzahl von Routen	**9,5**	**30,3**	**34,0**	**24,2**

Die eben beschriebenen Effekte sind nochmals in einem Diagramm in Bild 61 verdeutlicht. Dargestellt ist die mittlere Anzahl der Routen je Relation (grüne Balken) differenziert nach Entfernungsklassen. Die Entfernungsklassen werden anhand der Luftlinienentfernung der Quelle und des Ziels einer Relation gebildet. Es ist klar erkennbar, dass die Anzahl der gefundenen Routen wie zu erwarten mit zunehmender Entfernung ansteigt. Darüber hinaus zeigt die graue Linie an, wie hoch der Anteil der Relationen in der jeweiligen Entfernungsklasse ist, die weder Quelle noch Ziel in München haben. Je höher dieser Anteil ist, desto weniger Routen werden gefunden. Für höhere Entfernungsklassen steigt dieser Anteil der Relationen und der Effekt der höheren Luftlinienentfernung wird durch den Lageeffekt nicht nur ausgeglichen, sondern dominiert. Somit fällt die mittlere Anzahl der Routen je Relation ab 45 km Luftlinienentfernung wieder ab, da hier der Anteil der Relation ohne Quelle oder Ziel in München erheblich ansteigt.

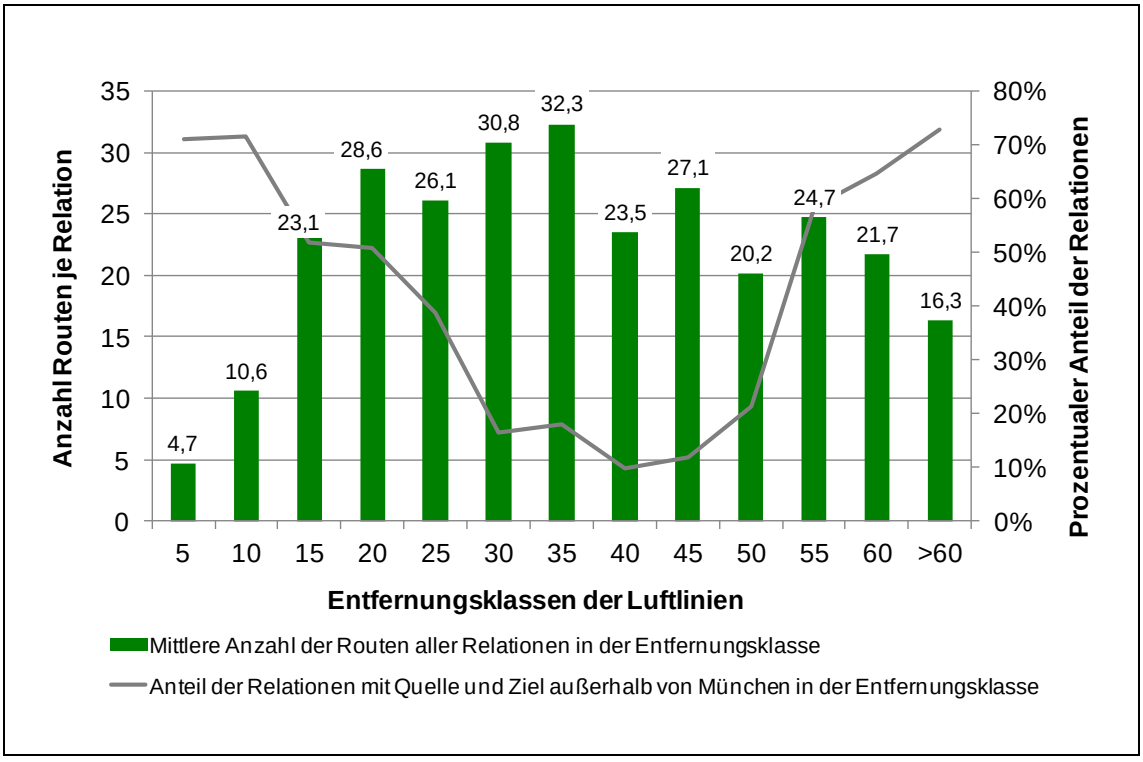


Bild 61: Anzahl der Routen je Relation differenziert nach Luftlinienlänge der Relation

3.4.2.2 Attributierung der Routen

Für jeden Probanden existiert eine bestimmte Anzahl von Relationen, die dieser befahren hat. Über die Probanden liegen personenspezifische Informationen aus den Befragungen vor. Für jede ihm zugeordnete Relation sind Startort, Zielort, Aktivität bzw. Zweck an der Quelle bzw. Ziel bekannt, aber auch Nutzungshäufigkeit oder z.B. die übliche Abfahrtszeit. Darüber hinaus ist jeder Relation ein räumliches Choice Set zugeordnet, welches aus einer bestimmten Anzahl an Routen besteht. Die Routen im räumlichen Choice Set enthalten statische, also zeitunabhängige Attribute. Für jede Ortsveränderung des Probanden wird nun das räumliche Choice Set der Relation herangezogen, auf der die Ortsveränderung durchgeführt wurde. Aufgrund des bekannten Abfahrtszeitpunkts der Ortsveränderung kann das Choice Set nun mit dynamischen, also zeitabhängigen Attributen versehen werden (vgl. Bild 62). Eine Übersicht aller Routenattribute für die Routen eines dynamischen Choice Sets ist in Tabelle 33 enthalten.

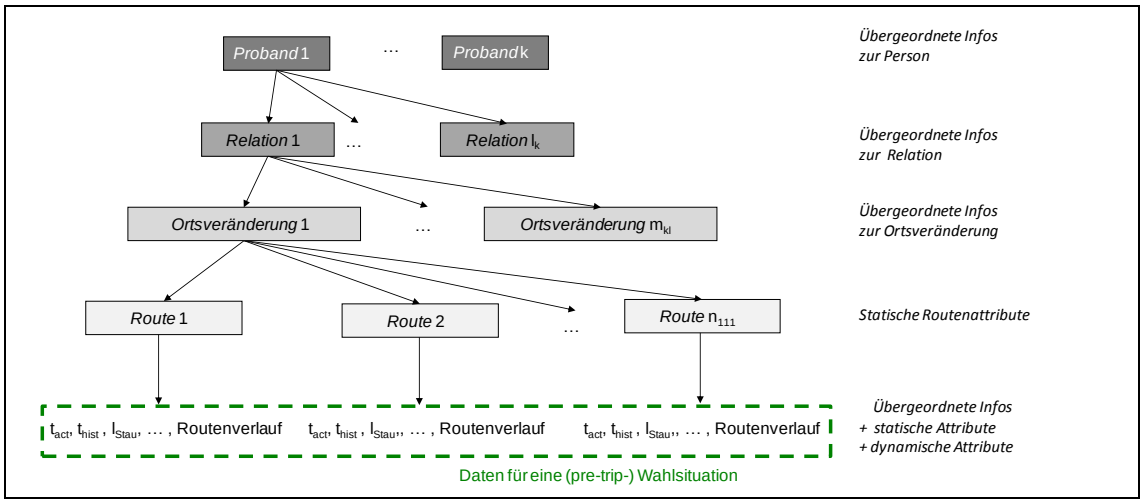


Bild 62: Datenmodell der Choice Sets

Tabelle 33: Übersicht der Routenattribute

Übergeordnete Attribute	Statische Attribute	Dynamische Attribute
• Personenmerkmale • Infos zur Relation (Startort, Zielort, Wegezweck, Häufigkeit) • Infos zur Ortsveränderung (Startzeit, Dauer, Nutzung von Navigation, Nutzung der LOS-Darstellung)	• Gesamtlänge • Länge auf Autobahnen bzw. außerörtlichen Hauptstraßen • Reisezeit im unbelasteten Netz • Umwegfaktor • Eigenständigkeit • Ähnlichkeit zu Hauptrouten • Bekanntheitsgrad	• Gemeldete Länge stockender Verkehr bzw. Stau • Angezeigter LOS (frei, stockend, Stau) • Durch WWW empfohlene Länge • Durch Navigationsgerät empfohlene Länge • Aktuelle und historische Reisezeit • Fahrzeitindex

Die statischen Attribute des räumlichen Choice Sets wie Länge, Länge auf Autobahn und Reisezeit im unbelasteten Netz lassen sich direkt aus dem Verkehrsmodell ableiten. Der Umwegfaktor wird als Quotient der Luftlinie einer Relation und der Länge der Route bestimmt. Die Eigenständigkeit einer Route berechnet sich auf Grundlage des Ähnlichkeitsfaktors nach Cascetta (vgl. Formel 12) wie folgt (vgl. Friedrich et al. [21]):

$$E_i = \frac{1}{\sum_{j' \in I} f_i(j)} \quad mit \quad f_i(j) = C_{ij} = \frac{l_{ij}}{\sqrt{l_j} \cdot \sqrt{l_i}} \tag{13}$$

mit:

E_i Eigenständigkeit der Route i

C_{ij} Ähnlichkeit zwischen Route i und Route j aus Routenmenge I

Für jede Relation wird außerdem die Hauptroute als die am häufigsten befahrene Route bestimmt und darauf basierend für jede Route die Ähnlichkeit zu dieser Hauptroute nach Formel 12 berechnet. Der Bekanntheitsgrad wird unter der Annahme berechnet, dass ein Streckenelement für einen Probanden als bekannt gilt, wenn er es mindestens zweimal während des Untersuchungszeitraums überfahren hat. Der Bekanntheitsgrad gibt nun den Anteil der als bekannt eingestuften Streckenlänge an der Gesamtlänge einer Route an.

Für die dynamische Attributierung wird nun auf Daten aus dem Verkehrsdatenarchiv zurückgegriffen, dass die Referenzverkehrslage (aktuelle Reisezeit und LOS) und die gemeldete Länge stockender Verkehr und Stau für jede Strecke S des Projektnetzes für alle 5-Minuten-Intervalle I des Untersuchungszeitraumes enthält (für das Erstellen des Datenarchivs siehe Busch et al. [13] und Snethlage et al. [41]). Die Streckenmenge S wird dabei um die Anbindungen und die nicht ins Projektnetz transformierbaren Streckenabschnitte aus dem Lokalisierungsnetz (vgl. Kapitel 3.3.2.1.5) ergänzt. Für diese ergänzte Streckenmenge liegen ausschließlich statische Attribute vor (aktuelle Fahrzeit entspricht immer Fahrzeit im unbelasteten Netz, kein gemeldeter stockender Verkehr bzw. Stau, unbekannter LOS).

Die Zuweisung der dynamischen Attribute erfolgt auf Basis der aktuellen Reisezeit aus der Referenzverkehrslage (vgl. Friedrich et al. [20]). Für eine Route wird nun anhand des Abfahrtszeitpunkts der Ortsveränderung für die erste Strecke S1 das erste relevante Zeitintervall I1 ausgewählt und die für dieses Zeitintervall gültige Geschwindigkeit anhand der aktuellen Reisezeit bestimmt. Daraus ergibt sich der Zeitpunkt, an dem das Ende dieser Strecke S1 erreicht wird. Liegt dieser Zeitpunkt noch innerhalb dieses Zeitintervalls I1, wird für die Restdauer des Zeitintervalls die Fahrgeschwindigkeit der Folgestrecke herangezogen. Wird das Ende der aktuellen Strecke S1 erst in den folgenden Zeitintervallen erreicht, wird der Anteil der Strecke S1 bestimmt, der im aktuellen Zeitintervall I1 noch befahren werden kann. Für den noch ausstehenden Anteil der Strecke S1 wird dann die Fahrgeschwindigkeit aus den

folgenden Zeitintervallen herangezogen. Für die Grenzen jedes Zeitintervalls sind somit die aktuelle Lage und für jede Strecke der Ein- und Ausfahrzeitpunkt als für die Attributierung relevante Zeitpunkt-Lage-Kombinationen bekannt. Die aktuelle Reisezeit ergibt sich dann direkt aus dem Einfahrzeitpunkt der ersten Strecke und dem Ausfahrzeitpunkt der letzten Strecke der Route. Die weiteren dynamischen Attribute (dargestellter LOS, gemeldete Länge stockender Verkehr und Stau) ergeben sich dann aus den relevanten Zeitpunkt-Lage-Kombinationen und der entsprechenden Werten aus dem Datenarchiv für die entsprechende Strecke und das passende Zeitintervall. Das beschriebene Vorgehen ist in Bild 63 nochmals anhand von zwei Beispielen verdeutlicht.

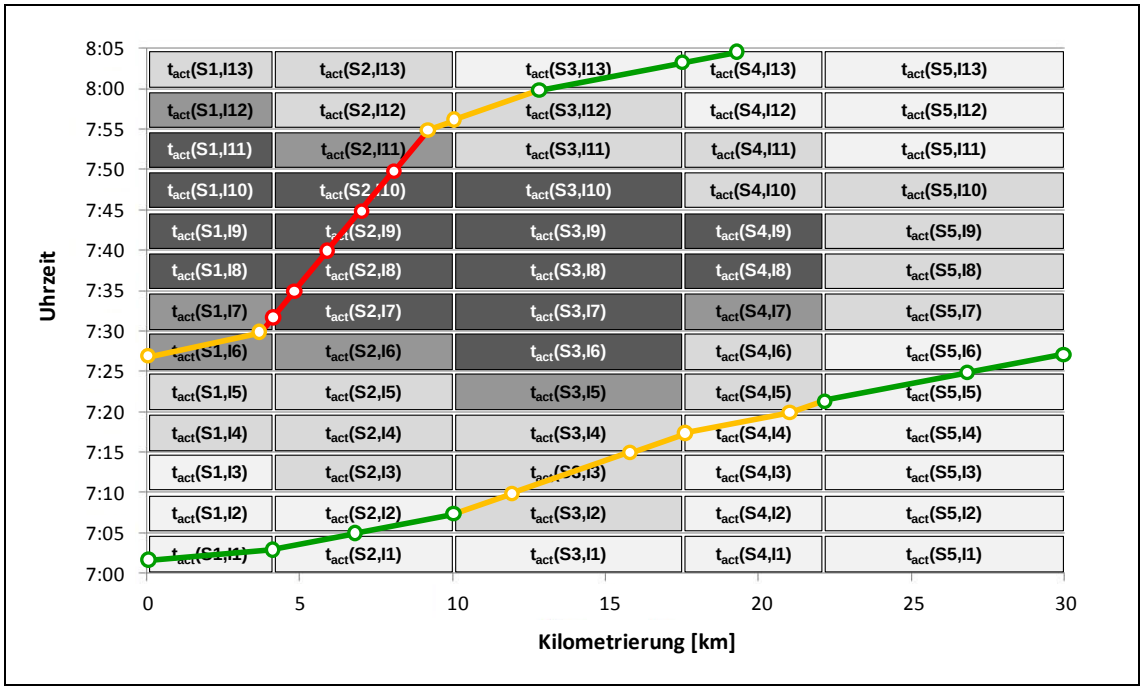


Bild 63: Setzen der dynamischen Attribute am Beispiel Reisezeit und LOS (angelehnt an Friedrich et al. [20])

Dargestellt sind die Zeitintervalle I über den Strecken S. Je höher die aktuell vorliegende Reisezeit, desto dunkler ist die Einfärbung des Kästchens und entsprechend steiler der Verlauf der Trajektorie. Die Färbung der Trajektorie gibt die verschiedenen LOS Stufen wieder (grün=freier Verkehr, gelb=stockender Verkehr, rot=Stau) welche dem Probanden als LOS-Kartendarstellung zur Verfügung standen. Die relevanten Zeitpunkt-Lage-Kombinationen sind mit Kreisen gekennzeichnet.

Für die Bestimmung der historischen Reisezeit werden zunächst zwölf typische Tageszeiten definiert, wobei nach Uhrzeit und Wochentagsart differenziert wird (siehe Tabelle 34).

Tabelle 34: Übersicht der definierten Tageszeiten

	Montag bis Freitag	Samstag und Sonntag
00:00 - 06:00	1	7
06:00 - 09:00	2	8
09:00 - 15:00	3	9
15:00 - 18:00	4	10
18:00 - 19:00	5	11
19:00 - 24:00	6	12

Für jede Tageszeit wird für jedes 5-Minuten-Intervall im Untersuchungszeitraum die aktuelle Reisezeit einer Route nach dem bereits beschriebenen Verfahren bestimmt. Die tageszeitspezifische historische Reisezeit ergibt sich dann als der Median aus dieser Menge an aktuellen Reisezeiten für diese Tageszeit. Den Routen des Choice Sets wird dann der entsprechende Wert der historischen Reisezeit abhängig von der Tageszeit, zu der die Ortsveränderung durchgeführt wurde, zugeordnet.

Analog dazu wird für jede Tageszeit ein Reisezeitindex als Zuverlässigkeitsmaß berechnet. Der RZI ist der Quotient aus der durchschnittlichen Reisezeit im Fall von Störungen und einer Sollreisezeit bei freiem Verkehr, siehe Formel 13. Hier wird der RZI als der Quotient aus dem 95%-Perzentil und dem 15%-Perzentil der aktuellen Reisezeiten zu der entsprechenden Tageszeit über den gesamten Erhebungszeitraum berechnet. Somit erhält man analog zur historischen Reisezeit einen tageszeitspezifischen Reisezeitindex.

$$RZI_{95} = \frac{\mathrm{t}95\%}{\mathrm{t}15\%} \tag{14}$$

mit: $\mathrm{t}95\%$ [s] 95%-Perzentil aller gemessenen Routenreisezeiten

$\mathrm{t}15\%$ [s] 5%- Perzentil aller gemessenen Routenreisezeiten

Für die Berechnung der durch Wechselwegweisung empfohlenen Länge werden zunächst alle Relationen einer Zielkategorie entsprechend der von der Autobahndirektion Südbayern definierten Schaltstrategien zugeordnet. So kann für jede Ortsveränderung auf einer Relation die Menge aller während einer Ortsveränderung überfahrenen und gleichzeitig relevanten Wechselwegweisungen bestimmt werden. Ausschlaggebend für diese Menge ist hierbei nur die für die Ortsveränderung tatsächlich genutzte Route. Aufgrund der relevanten Wechselwegweisung und der Zielkategorie der Ortsveränderung kann nun eine empfohlene Streckenmenge anhand der aktuell geschalteten Strategie bestimmt werden. Für jede Route des Choice Sets kann nun die Summe der Länge der Strecken bestimmt werden, die in dieser empfohlenen Streckenmenge enthalten sind.

Wenn der Proband während der Ortsveränderung das *wiki*-Navigationsgerät genutzt hat, werden der Zeitpunkt der Routenanfrage und der Verlauf der angefragten Route protokolliert. Somit ergibt sich eine bestimmte Streckenmenge, deren Elemente sowohl Teil des vom Navigationsgeräte empfohlenen Routenverlaufs als auch Teil des Verlaufs der aktuell betrachteten Route sind. Für jede Route wird nun der Anteil der empfohlenen Strecken am untersuchten Routenverlauf bestimmt. Dieser Anteil ist ein Maß dafür, welche Route im Choice Set am ehesten der empfohlenen Route entspricht. Außerdem wird der Anteil des Routenverlaufs an der empfohlenen Strecke berechnet, um eine Aussage treffen zu können, in welchem Ausmaß der empfohlenen Route gefolgt wurde.

In Tabelle 35 sind die durchschnittlichen Ausprägungen von einigen ausgewählten Attribute differenziert nach verschiedenen Routenarten zusammengefasst. Insgesamt liegen für 16.037 Ortsveränderungen in Summe 418.666 Routen vor.

Tabelle 35: Ergebnisse der dynamischen Choice Set Generierung

Attribut	**Genannte Routen (Wohnen-Arbeiten)**	**Gefahrene Routen (Wohnen-Arbeiten)**	**Gefahrene Routen (alle)**	**Generierte Routen (Wohnen-Arbeiten)**	**Generierte Routen (alle)**	**Alle Routen**
Anzahl Relationen	259	266	4.100	266	4.100	4.100
Anzahl Routen	6.093	10.866	37.418	136.690	438.155	481.666
∅ Länge [km]	42,2	38,3	36,0	43,1	41,4	41,0
∅ Länge gemeldeter stockender Verkehr (TMC) [km]	0,16	0,21	0,18	0,153	0,15	0,15
∅ Länge gemeldeter Stau (TMC) [km]	0,09	0,12	0,13	0,107	0,13	0,13
∅ Länge angezeigter LOS frei	32,4	28,3	25,9	35,7	34,3	33,6
∅ Länge angezeigter LOS stockend	0,70	0,58	0,70	0,61	0,80	0,79
∅ Länge angezeigter LOS Stau	0,41	0,56	0,44	0,37	0,48	0,47
∅ Umwegfaktor	1,49	1,37	1,4	1,59	1,64	1,62
∅ Fahrzeit bei freier Geschwindigkeit [min]	39,4	34,0	32,6	38,8	37,6	37,2
∅ historische Fahrzeit [min]	41,1	36,8	33,8	41,2	37,6	38,6
∅ aktuelle Fahrzeit [min]	42,5	38,6	35,6	42,3	39,0	40,4
∅ Fahrzeitindex	1,30	1,34	1,33	1,32	1,34	1,34

3.4.3 Analyse der Routenwahlverhaltens

Die Analyse des Routenwahlverhaltens erfolgt mit Hilfe von ökonometrischen Entscheidungsmodellen und umfasst verkehrsteilnehmerbezogene, verkehrslagebezogene, routenbezogene, und informationsbezogene Einflussgrößen. Die verkehrsteilnehmerbezogenen Größen beschreiben die Eigenschaften der Person, die Einflüsse des Fahrtzwecks, der Häufigkeit mit der die Route befahren wird und die Ortskenntnis des Verkehrsteilnehmers. Verkehrslage- und routenbezogene Einflussgrößen umfassen insbesondere die historischen Fahrzeiten und die aktuelle Fahrzeit im Netz und die daraus abgeleiteten Eigenschaften der relevanten Routen (Zeit, Zuverlässigkeit aus der Fahrzeitenverteilung). Informationsbezogene Einflussgrößen beschreiben die Art, den Umfang und die Qualität der Verkehrsinformationen, die dem Verkehrsteilnehmer zur Verfügung gestellt werden. Die Bedeutung der einzelnen Einflussgrößen wird mit Hilfe einer Maximum-Likelihood Schätzung quantifiziert. Die Schätzung der Parameter erfolgt getrennt für die Datensätze der GPS-Logger und des Stated Preference Experiments. Für beide Datensätze werden verschiedene Modelle getestet, die sich in den Bewertungsfunktionen und deren Elastizitäten unterscheiden (vgl. Schiller et al. [35]).

Die Universität Stuttgart unterstützte die Technische Universität Dresden mit einer Machbarkeitsanalyse zur Schätzung eines Routenwahlmodells auf Basis wiedererkannter Fahrzeuge aus ANPR-Daten. Die zur Verfügung stehenden ANPR-Systeme lieferten an den für Routenwahl interessanten Querschnitten keine Vollerhebung aller Fahrbahnen. Dies hatte eine äußerst niedrige Wiedererkennungsrate entlang der zu untersuchenden Alternativrouten zur Folge. Aufgrund des geringen Anteils wiedererkannter Fahrzeuge war eine statistisch signifikante Untersuchung der Routenwahl nicht möglich.

Weiterhin unterstützte die Universität Stuttgart die Technische Universität Dresden bei der Schätzung der Routenwahlmodelle auf Basis der GPS-Daten und des Stated Preference Experiments.

3.4.3.1 Statistische Auswertung der erhobenen Daten zur Routenwahl

Im Vorfeld und begleitend zur Schätzung der Einflussparameter der Routenwahl mit Wahlmodellen lieferte die Universität Stuttgart konventionelle Auswertungen der Befragungsdaten. Im Folgenden sollen einige ausgewählte Aspekte dieser Auswertungen vorgestellt werden.

Die Analyse der Ortsveränderungen zwischen Wohn- und Arbeitsort zeigte, dass die Probanden im Mittel 2,3 unterschiedliche Routen benutzen. Insgesamt kennt ein Proband 3,7 verschiedene Wege zwischen Wohn- und Arbeitsort (Summe aus befahrenen und benannten Routen). Obwohl das Untersuchungsgebiet über ein dichtes Autobahn-

und Bundestraßennetz verfügt, zeigt sich, dass im Falle von Überlastung nur wenige der vorhandenen Routen eine attraktive Alternative darstellen. Im Mittel existieren 22 sinnvolle Routen von Quelle zum Ziel im Untersuchungsraum. Viele dieser Routen überlappen sich zum Teil, so dass sich die Anzahl sinnvoller Alternativrouten unter der Randbedingung von 80% Autobahnanteil auf vier Alternativrouten reduziert.

Auf ihrem Arbeitsweg waren die Probanden in unterschiedlichem Maße flexibel in Ihrer Routenwahl. 65% aller Probanden nutzen lediglich eine oder zwei Routen während des gesamten Feldversuchs. Nur 17% nutzten mehr als drei Routen, siehe Bild 64.

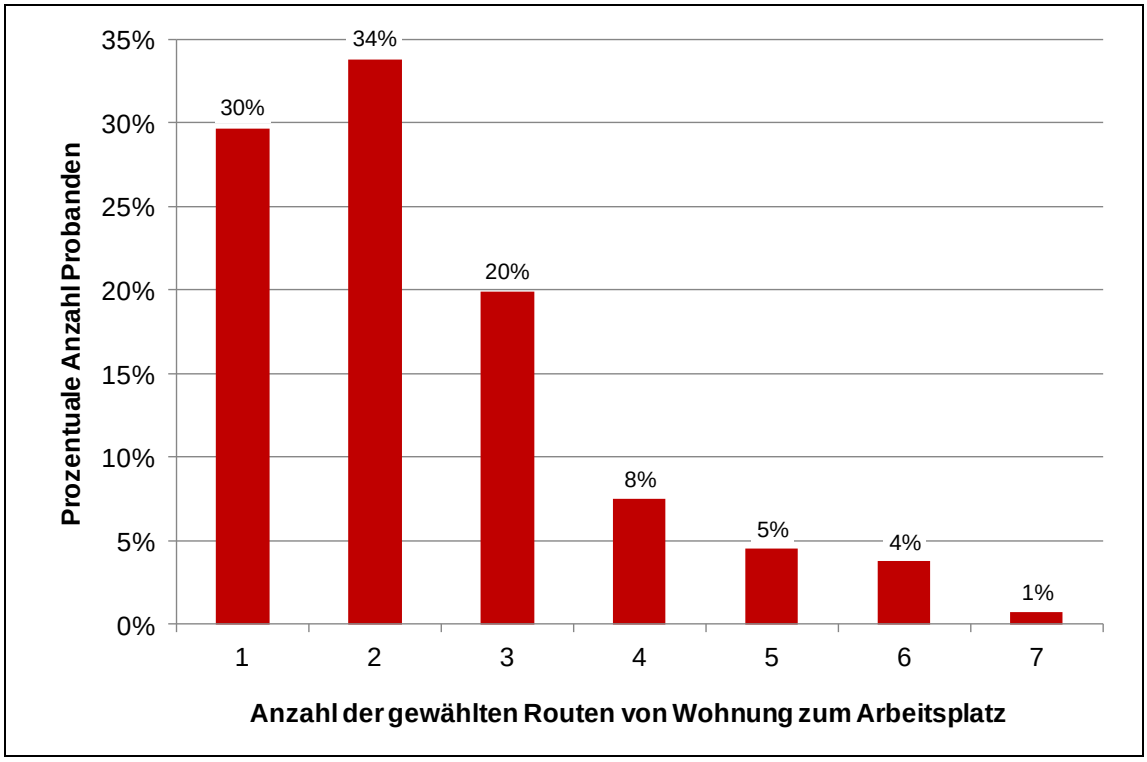


Bild 64: Flexibilität der Routenwahl von Probanden auf dem morgendlichen Arbeitsweg

Aus den GPS-Daten lässt sich außerdem auf eine stark ausgeprägte Hauptroutenpräferenz auf dem Arbeitsweg schließen. Die Hauptroute ist dabei immer die am häufigsten genutzte Route. Von 4.291 aufgezeichneten Arbeitswegen wurden 3.605 (84%) auf der Hauptroute durchgeführt. Bild 65 zeigt die Anteile der Probanden, die ihre Hauptroute für einen bestimmten Anteil ihrer Arbeitswege nutzen. Auffallend ist, dass 30% immer die identische Route zwischen Wohn- und Arbeitsort wählen. Nur 12% der Probanden nutzen mindestens für jede zweite Ortsveränderung eine Route, die nicht der Hauptroute entspricht.

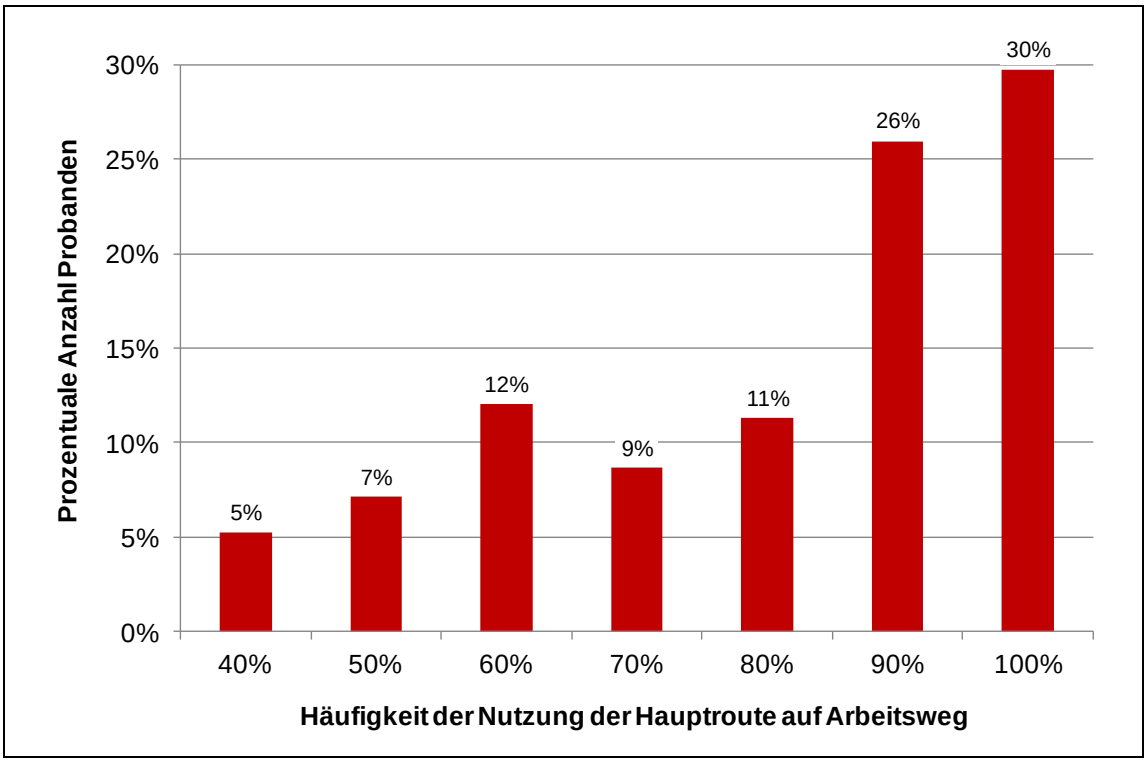


Bild 65: Hauptroutenpräferenz von Probanden auf dem morgendlichen Arbeitsweg

Wie die Probanden ihre Hauptroute wählen wird durch verschiedene Faktoren bestimmt. Die Antworten der Probanden aus der Befragung lassen sich in acht Gründe zusammenfassen , nach denen diese ihre Hauptroute aus den gegebenen Alternativen wählen. Tabelle 36 zeigt ein Ranking der genannten Gründe.

Tabelle 36: Gründe für die Wahl der Hauptroute auf dem morgendlichen Arbeitsweg

Ranking der Gründe für die Hauptroute		Anzahl Nennungen
1	Schnellste Route	208
2	Angenehm/stressarm/wenig Verkehr	129
3	Kürzeste Route	112
4	Geringe Staugefahr/ verlässlich	94
5	Wirtschaftlich	71
6	Gewohnheit	58
7	Geringe Unfallgefahr/sicher	42
8	Günstige Lage für weiter Unternehmungen	43

Ein Vergleich der Hauptroute mit den anderen Alternativrouten für alle 278 Probanden liefert mittlere Kenngrößen, siehe Tabelle 37. Die Hauptrouten sind wie erwartet im Mittel sowohl die schnellsten, als auch die kürzesten Routen, da 197 der insgesamt 278 Probanden die A9 als Hauptroute auf dem morgendlichen Arbeitsweg nutzen. Interessanterweise ist die Verlässlichkeit der Hauptrouten schlechter als die der

durchschnittlichen Alternativroute. Die Verlässlichkeit wird hierbei als Reisezeitindex (RZI) berechnet.

Tabelle 37: Vergleich der Haupt- und Alternativrouten vom Wohnort zum Arbeitsplatz

Mittlere Kenngrößen	Hauptroute	Alternativrouten
Reisezeit in [min]	37	41
Länge [km]	37	42
Länge Autobahn [%]	53	45
Verlässlichkeit [-]	1,38	1,33

Gründe zum Ausweichen auf eine Alternativroute sind ebenfalls aus der Befragung bekannt. Anders als zuvor, wurden die Probanden gebeten, für sie relevante Gründe aus einer gegebenen Liste auszuwählen. Bild 66 zeigt Gründe für das Verlassen der Hauptroute und den Anteil der Probanden für den dieser Grund relevant ist. Die Reduktion der Reisezeit und die Vermeidung von Staus sind die meist genannten Gründe zum Verlassen der üblichen Hauptroute. Verkehrsmeldung via Radio oder Navigationssysteme werden von den Probanden als wichtige Information für ihre Routenwahl erachtet.

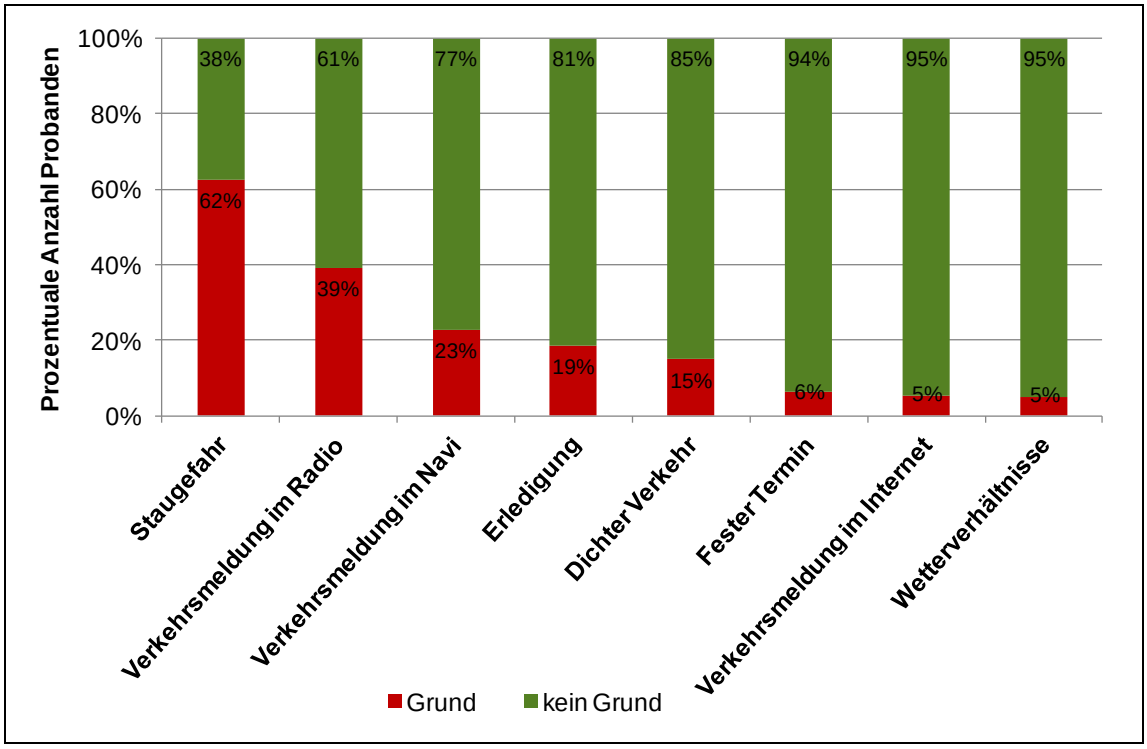


Bild 66: Gründe für das Verlassen der Hauptroute

Mithilfe der GPS-Daten und den generierten Alternativrouten kann außerdem ausgewertet werden, wie effektiv die Probanden beim Wechseln auf eine Alternativroute bezüglich der Fahrzeiteinsparung waren:

- Das Wechseln auf eine Alternativroute zahlte sich in 50% der Fälle aus, in denen die Hauptroute nicht die schnellste Route war.
- Im Allgemeinen konnten die Probanden beim Wechseln auf eine Alternativroute 4 Minuten Reisezeit (bzw. 10%) bezogen auf die Hauptroute einsparen. In 66% der Fälle bei Ausweichen auf eine Alternativroute erlebten die Probanden einen Reisezeitverlust von 14%.
- Die Auswahl der Alternativrouten bei Abfahren von der Hauptroute war demnach nicht optimal und ein Abfahren von der Hauptroute wirkte sich im Mittel mit 5% Reisezeitverlust negativ aus.
- Im Falle einer falschen Entscheidung (wenn die Reisezeit als Kriterium herangezogen wird) hätten die Probanden in 63% der Fälle auf dem Autobahnnetz bleiben sollen und nur in 37% der Fälle ins untergeordnete Netz wechseln sollen.

3.4.3.2 Ökonometrische Entscheidungsmodelle der Routenwahl

Vorrangiges Ziel der Analyse des Routenwahlverhaltens mit ökonometrischen Entscheidungsmodellen ist es, den Einfluss von Verkehrsinformation zu ermitteln. Dieser lässt sich für die beobachteten Wege aus dem umfangreichen Datenarchiv individueller und kollektiver Verkehrsinformation der GPS-Daten ableiten. Speziell zur Ermittlung des Einflusses der einzelnen Informationsmedien (LOS, Verkehrsfunk, dWiSta-Tafeln, Reisezeittafeln) wird die Stated Preference Befragung herangezogen. Somit können die Entscheidungsmodelle der Routenwahl auf Basis von zwei Datensätzen geschätzt werden.

Aufgabe der Universität Stuttgart war es, die Einflussgrößen innerhalb der Nutzenfunktion zu spezifizieren, die im Anschluss in einem makroskopischen Verkehrsmodell des Untersuchungsraums zu integrieren sind. Um den Einfluss von Verkehrsinformation auf das Routenwahlverhalten in einem makroskopischen Verkehrsmodell abbilden zu können, wird eine Basisnutzenfunktion geschätzt. Die Basisnutzenfunktion enthält dabei keine Informationsmedien, sondern nur verkehrslageabhängige oder statische Attribute (wie historische Reisezeit, Länge etc.) ohne die Attribute der aktuellen Verlustzeiten (frei, stockend, Stau), die über Verkehrsinformation übermittelt werden. Damit wird das heutige Routenwahlverhalten (Verhalten beruhend auf einer subjektiven Wahrnehmung des Verkehrsangebots und implizitem Wissen) aus Erfahrung beschrieben. Bei der Schätzung der Basisnutzenfunktionen zeigte sich, dass, neben der historischen Reisezeit, die Routenlänge und Eigenständigkeit der Routen die maßgebenden Parameter sind.

Der Einfluss von Verkehrsinformation wird auf Grundlage der Basisnutzenfunktion als additiver Einfluss auf die Routenwahl ermittelt. Dabei werden die Attribute der Basisnutzenfunktion und deren Einflüsse auf die Routenwahl als konstant und gegeben angenommen und dann weitere informationsmediumsspezifische Attribute und deren Einflüsse geschätzt.

Der Einfluss einzelner Informationsmedien lässt sich dabei gut aus den Daten der Stated Preference Befragung ermitteln. Dabei wurden die folgenden Informationsmedien betrachtet:

- LOS
- Verkehrsfunk
- dWiSta-Tafel
- dIRA-Tafel

Der Einfluss von kombiniertem Einsatz mehrerer Informationsmedien lässt sich dahingegen aus den GPS-Daten ermitteln. Für folgende Informationsmedien und deren Kombinationen konnten hinsichtlich des Einflusses auf Routenwahlentscheidungen Nutzenfunktionen geschätzt werden:

- LOS und Radio
- Radio und WWW
- LOS, Radio und WWW
- Radio, WWW und Navigation

Eine Übersicht über alle geschätzten Modelle und die statistischen Kenngrößen zur statistischen Sicherheit und Modellgüte sind ausführlich im Einzelbericht der Technischen Universität Dresden beschrieben (vgl. Schiller et al. [35]).

3.4.4 Aufbereitung der Wirkungszusammenhänge des Routenwahlverhaltens

Aufgabe der Universität Stuttgart war es, die Ergebnisse durch unabhängige Messdaten zu validieren und für die Anwendung in Verkehrsplanungsmodellen und Verkehrsleitsystemen aufzubereiten.

Das geschätzte Routenwahlmodell wird mit der Verkehrsplanungssaftware VISUM der PTV AG auf dem Projektnetz umgesetzt, um die Auswirkungen von Verkehrsinformation für den gesamten Ballungsraum ermitteln zu können. Hierfür wird eine stochastische Umlegung verwendet, die das heutige Routenwahlverhalten bei nicht perfekter Information abbildet. Das Vorgeben von externen Choice Sets ist bisher in VISUM nicht möglich, so dass die implementierte stochastische Routensuche auf den in *wiki* entwickelten Algorithmus zur Generierung von Routen angepasst werden

muss. Im Allgemeinen basiert die stochastische Routensuche, zur Generierung von mehreren Alternativrouten zwischen einer Quelle und einem Ziel, auf einer wiederholten Bestwegsuche. Dabei werden in jeder Iteration die Widerstände von Netzelementen (Strecken und Abbieger) zufällig variiert und so stets ein neuer Bestweg gefunden. Die gefundenen Alternativrouten werden daraufhin auf ihre globale Umwegigkeit geprüft und gegebenenfalls in das Choice Set aufgenommen. Die Nachfrage einer Quelle-Ziel-Relation wird anschließend gemäß dem hinterlegten Wahlmodell auf die Alternativrouten des Choice Sets aufgeteilt.

Die Art und Anzahl der gefundenen Routen ist somit abhängig von der Anzahl der durchgeführten Iterationen, von den Parametern für die zufällige Variation der Widerstände und den vorgegebenen Umwegfaktoren. In VISUM lassen sich sowohl die maximale Anzahl an Suchiterationen als auch die Parameter des normalverteilten Widerstandswert I_{i+1}eines Netzelements mit dem Mittelwert I'_i der Standardabweichung σ vorgeben, siehe Formel 15. Die Anzahl der Iterationen und die Streubreite der Widerstandsvariationen werden hierbei so gesetzt, dass durch die reine Routensuche zunächst keine potentielle plausiblen Routen ausgeschlossen werden.

$$I_{\mathrm{i+1}} = I'_i + \sigma \cdot N$$

$$\sigma = a \cdot \left(\frac{1}{\left(i_{ex}\right)^b} \right) \cdot \left(I'_i\right)^c \qquad (15)$$

mit:

I_{i+1}	Zufälliger Widerstand in Iteration i+1
I'_i	Geschätzter Widerstand in Iteration i
N	Normalverteilte Zufallszahl
i_{ex}	Anzahl externer Iterationen zum Ausgleich der Verteilung der Nachfrage auf die gefundenen Routen
a, b, c	Parameter

Bezüglich der Plausibilität der Routen geschieht eine Vorauswahl auf Basis eines globalen Umwegfaktors für die gesamte Route. Anschließend wird ein Umwegtest ausgeführt auf Basis eines globalen Umwegfaktors für alle überfahrenen Maschen. Die Parameter für die Vorauswahl und den Umwegtest sind so gesetzt, dass sie den empirisch abgeleiteten Umwegfaktoren aus der Befragung möglichst gut entsprechen und beziehen sich auf die Abweichung zur Reisezeit bei freiem Verkehr auf dem Bestweg für die jeweilige Quelle-Ziel-Relation:

- Vorauswahl mit globalem Umwegfaktor für gesamte Route:

  $I'_i > d \cdot BW'_i + e$ (d=1,23, e=300)

- Umwegtest mit globaler Umwegfaktor für Netzmaschen:

  $I'_i > f \cdot BW'_i + g$ (f=2, g=0)

Mit diesen Parametereinstellungen konnten sinnvolle und den empirisch beobachteten Routen ähnliche Choice Sets als Basis für die makroskopische Umlegung generiert werden. Dem an Messwerten kalibrierten Umlegungsergebnis liegt demnach das in AP4 geschätzte Routenwahlmodell auf einem hinsichtlich Anzahl und Verlauf sehr ähnlichem Choice Set zugrunde.

Um den Einfluss von Information auf das Routenwahlverhalten in einer Umlegung abzubilden, muss die geschätzte Nutzenfunktion der Routenwahl als Teil des Routenwiderstands einbezogen werden. Hierbei sind ausschließlich streckenbezogene Attribute integrierbar. Das direkte Setzen von routenbezogenen Attributen ist nicht möglich, da die für das Routenwahlmodell verwendeten Routen vorher nicht explizit bekannt sind, sondern wie bereits beschrieben, erst innerhalb der Umlegung erzeugt werden. Dadurch lassen sich bspw. die Hauptroutenkonstante, aber auch relationsbezogene Verkehrsinformationen, wie die Empfehlung einer Route durch Wechselwegweisung oder Navigationsgerät, nicht unmittelbar abbilden. Anders verhält es sich hingegen bei streckenbezogenen Verkehrsinformationen, wie Staumeldungen oder Verkehrslagedarstellungen, die als belastungsabhängige Attribute auf Strecken modelliert werden können.

3.4.5 Analyse des Abfahrtszeitwahlverhaltens

Für die Analyse des Abfahrtzeitwahlverhaltens wurde eine Stated Preference Befragung durchgeführt. Damit wird die zeitliche Flexibilität von Verkehrsteilnehmern ermittelt, um die Einflüsse von Verkehrsinformation auf die zeitliche Verlagerung von Verkehr zu bestimmen.

Die Universität Stuttgart unterstützte die Technische Universität Dresden bei der statistischen Auswertung der Befragungsdaten im Vorfeld der Schätzung eines ökonometrischen Entscheidungsmodells.

3.4.5.1 Statistische Auswertung der SP-Befragung zur Abfahrtszeitwahl

Die Einflüsse der Attribute, bzw. ihrer konkreten Ausprägungen auf die Abfahrtszeitwahl, werden bei der Schätzung eines Abfahrtszeitwahlmodells durch die Technische Universität Dresden ermittelt (vgl. Schiller et al. [35]). Erste statistische Auswertungen der Änderung der Abfahrtszeit geben hier aber bereits Aufschluss über die zu erwartende Signifikanz der untersuchten Attribute.

Eine Entscheidungssituation ist definiert durch

- Eine vorgeschlagene Änderung der üblichen Abfahrtszeit,
- eine prognostizierte Reisezeitersparnis,
- eine Zuverlässigkeit der Prognose
- und einen Startpunkt des Weges.

Da Abfahrtszeitwahl und zeitliche Flexibilität sehr stark von individuell unterschiedlichen Wegeketten und terminlichen Verpflichtungen abhängen, zeigt Bild 67 die Abfahrtszeitwahl der 278 Probanden über alle 12 Entscheidungssituationen in Abhängigkeit der Arbeitszeitmodelle. Es zeigt sich, dass die Probanden mit flexibler Arbeitszeit prozentual deutlich öfter bereit sind, ihre Abfahrtszeit zu wechseln. Um dies genauer zu analysieren, wird das Arbeitszeitmodell als personenbezogenes Attribut in die Schätzung der Abfahrtszeitwahl aufgenommen.

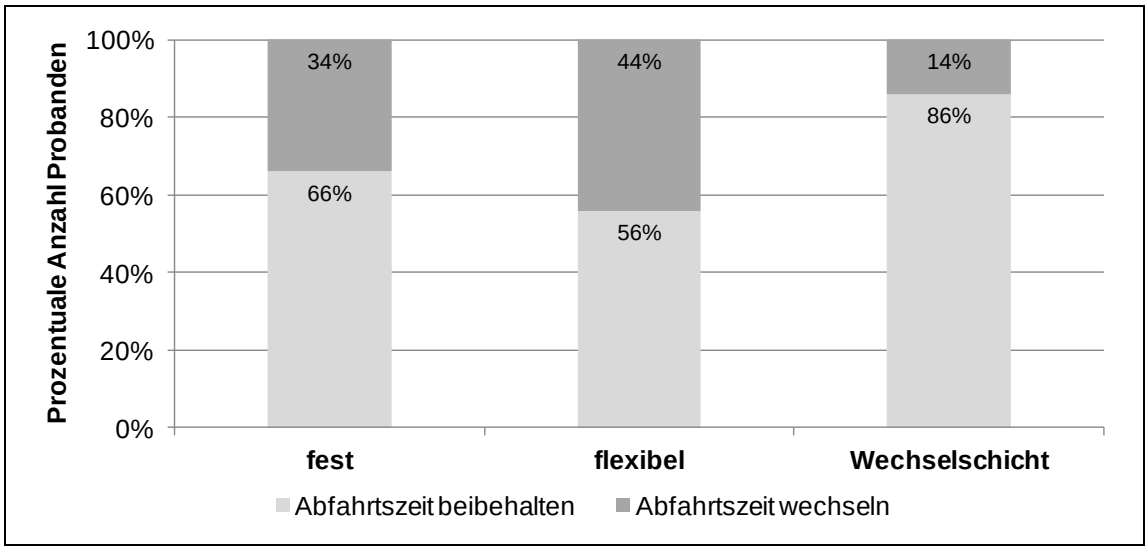


Bild 67: Abfahrtszeitwahl in Abhängigkeit der Arbeitszeitmodelle der Probanden

Bild 68 zeigt die Abfahrtszeitwahl in Abhängigkeit der zeitlichen Abweichung der vorgeschlagenen Abfahrtszeit von der eigentlichen Wunschabfahrtszeit. Je größer die absolute Abweichung, desto geringer ist die Bereitschaft zum Wechsel der Abfahrtszeit. Interessant ist zudem, dass eine um 40 Minuten verfrühte Abfahrtszeit deutlich unattraktiver bewertet wird als eine um 40 Minuten verspätete Abfahrtszeit.

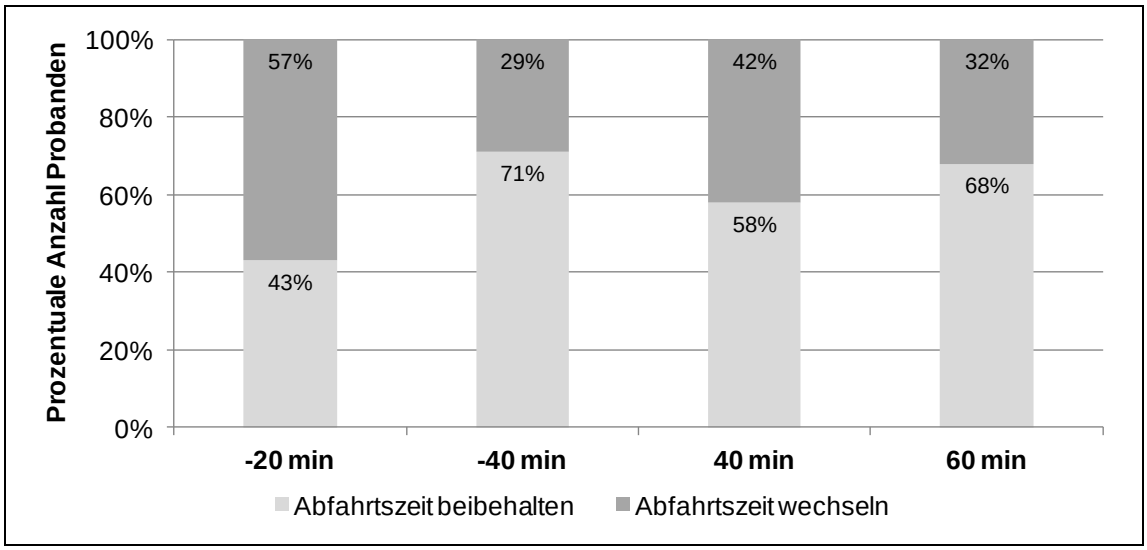


Bild 68: Abfahrtszeitwahl in Abhängigkeit der vorgeschlagenen Änderung der üblichen Abfahrtszeit in Bezug zur üblichen Wunschabfahrtszeit

Bild 69 zeigt die Abfahrtszeitwahl in Abhängigkeit der prognostizierten Reisezeitersparnis. Je größer die prognostizierte Reisezeitersparnis, desto höher die Bereitschaft zum Wechsel der Abfahrtszeit. Die Reisezeitersparnis in Minuten beschreibt dabei einen prozentualen Anteil der üblicherweise erlebten Reisezeit auf dem Arbeitsweg.

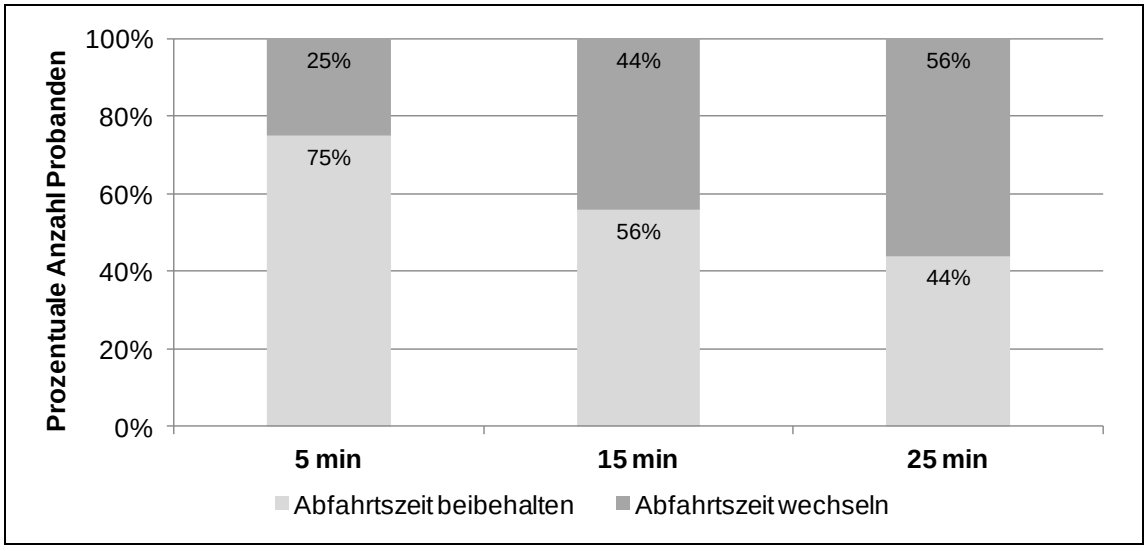


Bild 69: Abfahrtszeitwahl in Abhängigkeit der prognostizierten Reisezeitersparnis

Bild 70 zeigt die Abfahrtszeitwahl in Abhängigkeit der Zuverlässigkeit der Prognose. Die Änderung der Zuverlässigkeit, mit der die prognostizierte Reisezeitersparnis tatsächlich eintritt, hat kaum Einfluss auf das Abfahrtszeitwahlverhalten. Obwohl ein leichter Anstieg der Bereitschaft zum Wechseln der Abfahrtszeit mit steigender Zuverlässigkeit erkennbar ist, bleibt anzunehmen, dass die Zuverlässigkeit als entscheidungsrelevantes Attribut für die Probanden zu abstrakt und nicht greifbar war.

Auffällig ist, dass für Probanden mit festen Arbeitszeiten die Zuverlässigkeit eine größere Rolle bei der Abfahrtszeitwahl spielt als für Probanden mit flexiblen Arbeitszeiten.

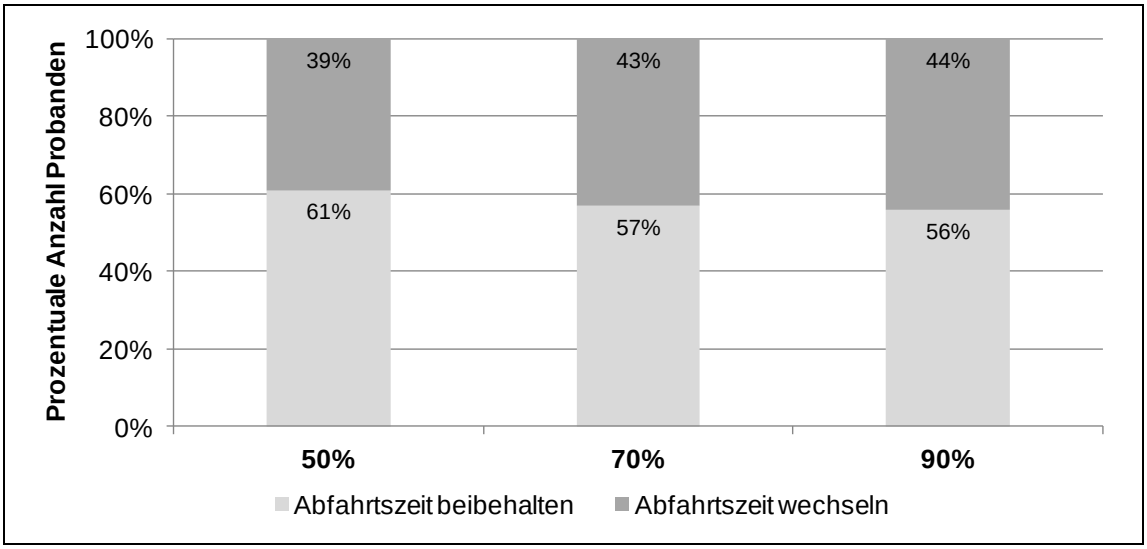


Bild 70: Abfahrtszeitwahl in Abhängigkeit der Zuverlässigkeit der Prognose

Bild 71 zeigt die Abfahrtszeitwahl in Abhängigkeit des Startpunkts der Fahrt. Obwohl Wegeketten im Allgemeinen individuell sehr unterschiedlich über den Tag verteilt sind, schwankt die zeitliche Flexibilität nur geringfügig über den Tag. Bei Fahrten mit Start bei der Arbeit zeigt sich eine leicht höhere Bereitschaft die Abfahrtszeit zu wechseln. Probanden mit festen und flexiblen Arbeitszeiten zeigen ein ähnliches Verhalten für die Abfahrtszeitwahl in Abhängigkeit des Startpunkts der Fahrt.

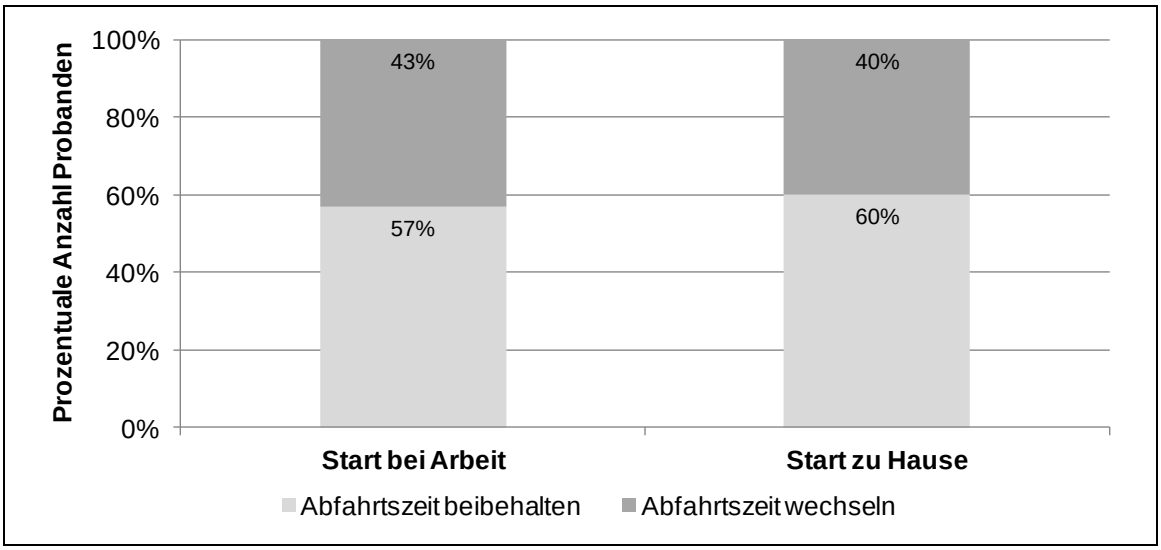


Bild 71: Abfahrtszeitwahl in Abhängigkeit des Startpunkts der Fahrt

3.4.5.2 Ökonometrische Entscheidungsmodelle

Zur Quantifizierung der Einflussgrößen der Abfahrtszeitwahl wurden die Ergebnisse der SP-Experimente mit Wahlmodellen durch die Technische Universität Dresden geschätzt (vgl. Schiller et al. [35]). Bei der Wahl gibt es generell zwei Alternativen:

- Alternative 0: Die Abfahrtszeit wird nicht verändert.
- Alternative 1: Die Abfahrtszeit wird unter den gegebenen Rahmenbedingungen verändert.

Aus der statistischen Voruntersuchung ergeben sich drei ordinale Attribute für die Nutzenfunktion der Wahlmodelle, welche der Entscheidung zu Änderungen der Abfahrtszeit zugrunde gelegt werden:

- die Zeit, um welche die Abfahrtszeit verschoben werden soll,
- die damit verbundene Einsparung an Reisezeit und
- die Zuverlässigkeit, mit der diese Reisezeitverringerung erreicht wird.

Ein weiteres ordinales Attribut ist die übliche Dauer des Arbeitsweges des Probanden, das die Universität Stuttgart für jeden Probanden aus seinen GPS-Daten ermittelte. Diese Attribute werden in der Schätzung immer als unabhängige Nutzenkomponenten behandelt. Die Information darüber,

- ob die Fahrt zu Hause oder am Arbeitsplatz beginnt und
- ob der Proband flexible oder feste Arbeitszeiten hat,

werden ebenfalls berücksichtigt. Der Startort wird in der Schätzung als unabhängige Größe in die Nutzenfunktion integriert. Die Arbeitszeit (fest, flexibel) wurde als soziodemografisches Merkmal in die Nutzenfunktion integriert und durch die Universität Stuttgart für jeden Probanden aus dem Fragebogen den SP-Daten zugespielt. Alternativ wird der Datensatz entsprechend den Personenmerkmalen aufgeteilt und die Parameter der Nutzenfunktionen für die einzelnen Datensätze getrennt geschätzt.

Die maßgebenden Attribute zur Beschreibung der Abfahrtszeitwahl erweisen sich als:

- Abfahrtzeitverschiebung AZV [min]
- avisierte Zeiteinsparung ZE [min]
- Zuverlässigkeit der avisierten Zeiteinsparung ZUV [-]

Eine Übersicht über alle geschätzten Modelle und der statistischen Kenngrößen zur statistischen Sicherheit und Modellgüte sind ausführlich im Einzelbericht der Technischen Universität Dresden beschrieben (vgl. Schiller et al. [35]).

3.4.6 Aufbereitung der Wirkungszusammenhänge des Abfahrtszeitwahlverhaltens

Makroskopische Umlegungsmodelle bilden die Routenwahl der Verkehrsteilnehmer ab, indem sie die Verkehrsnachfrage auf die in der Routensuche gefundenen Alternativrouten einer Quelle-Ziel-Relation aufteilen. Die Routenwahl basiert dabei auf den Widerständen (negativer Nutzen als Funktion der einzelnen Attribute wie Reisezeit, Länge etc.) der einzelnen Alternativrouten im Choice Set. Um den Einfluss von Abfahrtszeitwahlverhalten in einer Umlegung abzubilden, muss die geschätzte Nutzenfunktion der Abfahrtszeitwahl mit ihren einzelnen Attributen als Teil des Routenwiderstands integriert werden.

Die Routenwahl ist abhängig von der aktuellen Reisezeit und der Länge der Route. Jede alternative Route i hat den Nutzen (vgl. Schiller et al. [35]):

$$V_i = -\beta_{takt} \cdot t_{akt} - \beta_L \cdot L$$

Die Abfahrtszeitwahl ist abhängig von der möglichen Zeitersparnis (ZE) und der Verschiebung des Abfahrtszeitpunkts (∆T) in Bezug auf die Wunschabfahrtszeit des Fahrers. Die Zusammenhänge dieser Einflussgrößen lassen sich in folgender Nutzenfunktion (geschätzt in AP4) zusammenfassen. Jede alternative Abfahrtszeit j hat den Nutzen:

$$V_j = \beta_{ZE} \cdot ZE - \beta_{-\Delta T} \cdot \Delta T - \beta_{+\Delta T} \cdot \Delta T$$

Eine Alternative, bestehend aus einer Route i zu einem Abfahrtszeitpunkt j, hat den kombinierten Gesamtnutzen:

$$V_{i,j} = \beta_{ZE} \cdot \left[\frac{1}{\beta_{takt}} \cdot V_{R_0}^{AVZ_0} - \frac{1}{\beta_{takt}} \cdot V_{R_i}^{AVZ_i} \right] - \beta_{-\Delta T} \cdot \Delta T - \beta_{+\Delta T} \cdot \Delta T$$

Dabei wird der Nutzen der Zeitersparnis durch die Nutzendifferenz der Route R_0 (Route zum Wunschabfahrtszeitpunkt) zur Route R_1 (Route bei verschobenem Abfahrtszeitpunkt) ersetzt. Der Parameter β_{ZE} rechnet die Reisezeitersparnis (in Sekunden) in Nutzeneinheiten um. Der Nutzen V_i einer Route i muss demnach in Sekunden umgerechnet werden, um in der Gesamtnutzenfunktion mit β_{ZE} gewichtet werden zu können. Dies geschieht durch Division durch β_{takt}.

Das in AP4 ermittelte Wahlmodell (Logit-Modell) berechnet nun die Wahrscheinlichkeit P, mit der eine der n Alternativen in Abhängigkeit des jeweiligen Nutzens gewählt wird:

$$P_i = \frac{e^{Vi}}{\sum_{a=1}^{n} e^{Va}}$$

Da die Vergleichsreisezeit der Route R_0 zum Wunschabfahrtszeitpunkt für alle Alternativen des Choice Sets gleich ist und das Logit-Modell auf Nutzendifferenzen beruht, lässt sich diese aus der Gesamtnutzenfunktion kürzen und es ergibt sich die vereinfachte kombinierte Nutzenfunktion der Routen- und Abfahrtszeitwahl:

$$V_{i,j} = \beta_{ZE} \cdot \left[-\frac{1}{\beta_{takt}} \cdot V_{R_i}^{AVZ_i} \right] - \beta_{-\Delta T} \cdot \Delta T - \beta_{+\Delta T} \cdot \Delta T$$

Weiterhin muss das Attribut der Verschiebung des Abfahrtszeitpunkts ΔT für jede Alternative des Choice Sets im Verkehrsnetz abgebildet werden. Dabei wird modelliert, dass ein Verkehrsteilnehmer zu unterschiedlichen Tageszeiten mit anderen Verkehrsteilnehmern um die bestehende Straßenkapazität (in Fahrzeugen pro Stunde) konkurriert. Aufgrund der Wunschabfahrtszeit konkurrieren in der Spitzenstunde mehr Verkehrsteilnehmer (höhere stündliche Nachfrage) um die vorhandene Straßenkapazität als in der Nebenverkehrszeit (niedrigere stündliche Nachfrage). Der Verkehrsteilnehmer kann sich nun zwischen verschiedenen Abfahrtszeitpunkten entscheiden, die wiederum Routenreisezeiten aufgrund der Gesamtnachfrage in diesem Zeitintervall zur Folge haben. Modelliert man Straßenkapazitäten für definierte Zeitintervalle, so lässt sich die Abfahrtszeitwahl als Teil der Widerstandsfunktion einer Route abbilden, in dem das Einfahren in ein bestimmtes Zeitintervall, abhängig vom Wunschabfahrtszeitpunkt, mit zusätzlichem Widerstand belegt ist. Für Fahrten innerhalb des Zeitintervalls, das dem Wunschabfahrtszeitpunkt entspricht, ergibt sich kein zusätzlicher Widerstand. Bild 72 verdeutlicht dies graphisch.

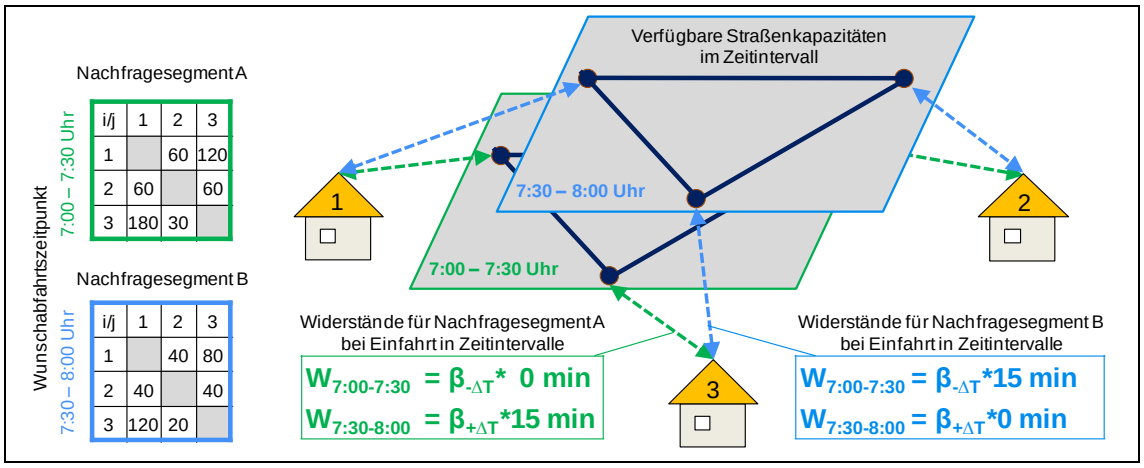


Bild 72: Modellierung der Abfahrtszeitwahl durch Zeitintervalle

Das schematische Beispiel zeigt ein Verkehrsnetz mit drei Verkehrsnachfragebezirken. Der Wunschabfahrtszeitpunkt für alle Fahrten aus Nachfragesegment A liegt zwischen 7:00 und 7:30 Uhr (im Verkehrsmodell mit 7:15 modelliert). Der Wunschabfahrtszeitpunkt des Nachfragesegments B entsprechend zwischen 7:30 und 8:00 Uhr (7:45 im Modell). Das Straßennetz verfügt zu beiden Zeitintervallen (7:00-7:30 und 7:30-8:00 Uhr) über die gleichen Kapazitäten in Fahrzeugen pro 30 Minuten.

Allerdings ist die Nachfrage im Zeitintervall zwischen 7:00-7:30 Uhr um 20% höher als zwischen 7:30-8:00 Uhr. Demnach sind zwischen 7:00-7:30 Uhr höhere Routenreisezeiten aufgrund von erhöhter Auslastung des Straßennetzes gegeben. Ein Wechsel der Abfahrtszeitwahl, hier im Beispiel ein Verschieben der Abfahrtszeit um 30 Minuten nach hinten auf 7:45 Uhr) ermöglicht Reisezeitersparnisse. Da jedoch ein Wechsel der Abfahrtszeit unattraktiv ist, wird die Einfahrt in das Zeitintervall 7:30-8:00 Uhr (in der Abbildung mit blau gekennzeichnet) mit einem zusätzlichen Widerstand belegt. Der zusätzliche Widerstand wird im Verkehrsmodell auf den Anbindungen in die jeweiligen Zeitscheiben für jedes Nachfragesegment festgelegt (in der Abbildung mit grünen gestrichelten Pfeilen dargestellt). Eine Anbindung beschreibt in einem Verkehrsmodell den Zugangsweg von einem Verkehrsnachfragebezirk zum eigentlichen Verkehrsnetz. Dieser wird hier nicht, wie sonst üblich, als Überwindung rein räumlicher Distanz, sondern als zeitliche Distanz zum nächsten Zeitintervall interpretiert. Wäre die zeitliche Differenz der Abfahrtszeitpunkte zu groß für die vorhandenen Reisezeitersparnisse gewählt (zum Beispiel eine Stunde), so würden sich keine der Fahrten in ein anderes Zeitintervall verlagern und das Umlegungsergebnis entspräche dem eines reinen Routenwahlmodells.

Im Vergleich zu herkömmlichen dynamischen Umlegungsverfahren, die eine Verschiebung des Abfahrtszeitpunkts intern verwenden, ermöglicht diese Modellierungsmethodik sowohl eine Gewichtung der Attribute der Routen- und Abfahrtszeitwahl und die Auswertung der Fahrzeugstunden einzelner Nachfragesegmente (Nachfrage pro Zeitintervall), als auch die Anzahl der verlagerten Fahrten.

3.4.7 Zusammenfassung

Aus den beobachteten GPS-Fahrten und Stated Preference Experimenten konnten relevante Einflussgrößen auf das Routenwahl- und Abfahrtszeitwahlverhalten der Verkehrsteilnehmer identifiziert und quantifiziert werden.

Vor allem die Reisezeit hat einen entscheidenden Einfluss auf die Routenwahl. Zudem ist eine starke Hauptroutenpräferenz der Probanden zu erkennen, so dass Alternativrouten erst ab einem gewissen Schwellwert an Reisezeiterhöhung auf der Hauptroute attraktiv werden. Der besondere Fokus der Untersuchung lag dabei auf der Analyse des Einflusses der Verkehrsbeeinflussungssysteme Verkehrsfunk, Wechselwegweisung und Navigationsgeräte. Besonders hohen Einfluss auf das Routenwahlverhalten hatte der Verkehrsfunk und die über Navigationsgeräte dargestellte Level-of-Service Karte.

Entscheidend für die Bereitschaft zur Verschiebung der üblichen Abfahrtszeit auf dem Arbeitsweg war die mögliche Reisezeiteinsparung. Eine Abfahrtszeitverschiebung gegenüber der üblichen Abfahrtszeit ist dabei grundsätzlich unattraktiv, wobei ein

späteres Abfahren besser akzeptiert wird. Bei typischen Pendlerdistanzen wird eine um zehn Minuten frühere Abfahrtszeit akzeptiert, wenn der Zeitgewinn zwischen sechs und sieben Minuten beträgt. Die Autofahrer haben hohe Anforderungen an Reisezeitersparnisse, wenn sie dafür eine Änderung ihres Tagesablaufs in Betracht ziehen müssen.

Um die Schätzung eines Routenwahlmodells auf einem Netzumgriff der Südhälfte Bayerns und dieses Detailgrads zu ermöglichen, stellte sich die Herausforderung der Generierung eines sinnvollen Choice Sets für alle von den Probanden befahrenen Relationen. Die Kombination eines Branch&Bound-Verfahrens zur Routensuche mit empirisch belegten akzeptierten Umwegfaktoren ermöglichte das Finden aller, unter einstellbaren Randbedingungen, sinnvollen Routen im Verkehrsnetz.

Zur Nutzung des geschätzten Routenwahlmodells in makroskopischen Verkehrsplanungsmodellen wurde eine Anpassung des Wahlmodells und der stochastischen Wegesuche zur Erzeugung der korrekten Choice Sets in stochastischen Umlegungsverfahren vorgenommen.

Die Integration des Abfahrtszeitwahlmodells in makroskopischen Verkehrsmodellen gelang über die Abbildung einzelner Abfahrtszeiten als Fahrt durch verschiedene Zeitscheibenverkehrsnetze. Basierend auf der üblichen Abfahrtszeit der Verkehrsteilnehmer bzw. des Nachfragesegments gelten unterschiedliche Zugangswiderstände für jedes Zeitscheibenverkehrsnetz. Somit wird die Abfahrtszeitverschiebung ins Verhältnis zur Reisezeitersparnis entlang freier Routen zu anderen Tageszeiten gesetzt.

3.5 Ermittlung der Potentiale von Verkehrsbeeinflussungssystemen

In Zeiten und Räumen hoher Verkehrsnachfrage kann durch die Verschiebung des Abfahrtzeitpunkts, der temporären Erhöhung der Straßenkapazität oder auch der räumlichen Verlagerung eines Teils der Verkehrsnachfrage auf eine andere Route die Leistungsfähigkeit des Verkehrssystems erhöht werden (Systemoptimum). Hierfür hat der einzelne Verkehrsteilnehmer jedoch hinzunehmen, dass er zugunsten des Systemoptimums z. B. über eine andere Route geleitet wird und unter Umständen eine längere Reisezeit in Kauf nehmen muss. Im besten Fall kann durch eine Verkehrsbeeinflussung ein Zustand erreicht werden, bei dem Nutzergleichgewicht und Systemoptimum nahezu deckungsgleich sind.

Ziel dieses Arbeitspakets war es, zu untersuchen, in welchem Umfang durch den Einsatz vorhandener Verkehrsbeeinflussungssysteme ein derartiger Zustand erreicht werden kann. Das Potenzial ist dabei als die Menge des Reisezeit- und Kraftstoffaufwands definiert, die durch eine optimierte Routen- und Abfahrtszeitwahl erreicht werden kann.

Die Universität Stuttgart war an folgenden Aufgaben beteiligt:

- Ziele, Zielkonflikte und Potenziale einer Beeinflussung der Routen- und Abfahrtszeitwahl (verantwortlich): Beschreibung von Zielen und Zielkonflikten, Literaturanalyse zum Thema Potenzial von Verkehrsnachfrage- und Verkehrsangebotsbeeinflussung, Entwicklung typisierter Beispielnetze und Untersuchung der Potentiale der Routenwahl und der Abfahrtszeitwahl, Überprüfung der Erreichung des Nutzergleichgewichts anhand der Erhebungsdaten
- Ermittlung von Verkehrszuständen (verantwortlich): Ableitung typischer Nachfragezustände, Ermittlung der Verkehrszustände für ein theoretisches Optimum, ein praktisch erreichbares Optimum, den heutigen Zustand und einen Zustand ohne Information, Quantifizierung der Potenziale bezogen auf den Reisezeitaufwand und den Kraftstoffverbrauch

3.5.1 Ziele, Zielkonflikte und Potentiale einer Beeinflussung der Routen- und Abfahrtszeitwahl

Adaptive Verkehrsinformationssysteme gewinnen durch die Verfügbarkeit von Verkehrsdaten in Echtzeit und wachsender Popularität von Navigationsgeräten zunehmend an Bedeutung im Kontext moderner Verkehrsmanagementkonzepte. Verkehrsleitzentralen der öffentlichen Hand nutzen Verkehrsdaten für den Betrieb straßenseitiger Verkehrslenkungsanlagen, um Staus innerhalb des gesamten Verkehrsnetzes zu reduzieren. Allerdings sind die Betreiber der Verkehrsleitzentralen nicht ausschließlich auf die Reduktion der Reisezeiten bedacht, sondern verfolgen einen weitergefassten Optimierungsansatz bei der Formulierung ihrer Verkehrsplanungsleitstrategien. Dabei steht die optimale Ausnutzung der netzweit verfügbaren Kapazitäten im Konflikt mit der allgemeinen Direktive der Bündelung des Verkehrs auf dem Hauptstraßennetz und der Reduktion von Schadstoff- und Lärmemissionen in städtischen Gebieten.

Auf der anderen Seite konkurrieren privatwirtschaftliche Firmen auf dem wachsenden Markt der mobilen Endgeräte unter dem Geschäftsmodell, ihren Kunden Reisezeitvorteile durch dynamisches Routing und Verkehrslageinformation zu ermöglichen. Obwohl nach und nach Überlegungen zu den Wirkungen von Navigationssystemen auf den Verkehrsablauf aller Fahrer im Zusammenhang mit einer schnell wachsenden Marktdurchdringungsrate entstehen, liegt der Fokus heute noch stark auf der Optimierung der Genauigkeit der in Echtzeit dargestellten Verkehrsinformation für die Nutzung durch den einzelnen Fahrer.

Autofahrer setzen hohe Priorität auf flexible Nutzung des Verkehrsangebots ohne Einschränkungen durch verkehrsplanerische Regularien oder verkehrstechnische Lenkungskonzepte. Sie nutzen Verkehrsinformation zur Unterstützung ihrer eigenen

Erfahrungswerte über tagesaktuelle Reisezeiten und der Prognose von Auswirkungen unerwarteter Störungen. Verkehrsinformation, die übergeordnete Lenkungsziele verfolgt und nicht dem persönlichen Nutzen des Autofahrers dient, wird langfristig nicht mehr nachgefragt. Auf der anderen Seite verlangen Autofahrer jedoch nach einem zuverlässigen Verkehrsangebot, in dem Reisezeiten zu bestimmten Tageszeiten oder Wochentagen vorhersehbar sind. Dies schafft zu einem gewissen Grad Akzeptanz für Verkehrslenkungsstrategien innerhalb der Verkehrsmanagementziele. Das Ziel eines jeden Fahrers nach Minimierung der persönlichen Reisezeit kann dabei weitere Kriterien wie eine geringe Anzahl überfahrener Lichtsignalanlagen, kurze Länge der Reiseroute, ansprechende Szenerie oder verkehrssicherheitsrelevante Merkmale umfassen. Zukünftige Verkehrsinformationen müssen demnach zunehmend auf die persönlichen Präferenzen der Autofahrer anpassbar und leicht verständlich sein, anstatt übermäßig akkurat und detailliiert.

Um die Potentiale von Verkehrsinformation zu evaluieren, müssen die Mängel der Verkehrsnetze näher beleuchtet werden. Zum einen entstehen Staus und Störungen des Verkehrsablaufs durch Überlastung der Straßen aufgrund zu hoher Verkehrsnachfrage. Zum anderen reduzieren Baustellen und Unfälle die bestehenden Kapazitäten und führen zu Staus und Störungen.

Verkehrsinformation und -lenkung beeinflusst lediglich die zeitliche und räumliche Verteilung der Verkehrsnachfrage – im Sinne der Routen- und Abfahrtszeitwahl der Verkehrsteilnehmer – und kann somit zur Reduzierung von Störungen bedingt durch Überlastung beitragen.

Störfallmanagement durch die örtlichen Betreiber beschleunigt die Räumung von Unfall- und Gefahrenstellen. Dies reduziert die verkehrlichen Beeinträchtigungen durch Unfälle und erhöht die allgemeine Zuverlässigkeit des Straßennetzes.

Eine höhere Leistungsfähigkeit des Straßennetzes kann durch Angebotsmanagement in Form temporärer Seitenstreifenfreigabe, dynamischen Tempolimits und Lkw-Überholverboten oder Ausbau der Infrastruktur erreicht werden.

Im Münchener Autobahnnetz ereigneten sich Störungen in 0,8% aller Stunden des Jahres 2009 basierend auf einer Auswertung von 160 Streckenabschnitten, durchgeführt von der Autobahndirektion Südbayern. Der Anteil der jährlichen Störungsstunden liegt damit unter dem erklärten Ziel von 1% der Gesamtstundenanzahl. Bei näherer Betrachtung ergibt sich, dass 7% der Stunden mit Störung durch Baustellen, 9% durch Unfälle und 84% durch hohe Verkehrsnachfrage bedingt waren.

Eine Untersuchung der GPS-Daten zeigt weiterhin, dass für jeden einzelnen Fahrer das Potenzial von räumlicher Verlagerung (Routenwahl) durch Verkehrsinformation durchschnittlich bei drei Minuten bzw. 9% der Reisezeit liegt. In 10% der Fahrten könnten Fahrer sogar bis zu 75% ihrer Reisezeit einsparen.

Das Potential von zeitlicher Verlagerung (Abfahrtszeitwahl) durch Verkehrsinformation hängt stark von der Flexibilität der einzelnen Fahrer ab. Wenn ein Fahrer bereit ist, seine Abfahrtszeit um maximal zehn Minuten zu verschieben, beträgt das Einsparpotential im Mittel 6% der Reisezeit.

Diese Zahlen belegen, dass Verkehrsinformation sowohl für den einzelnen Autofahrer als auch für das Fahrerkollektiv im Rahmen eines übergeordneten Verkehrsmanagements eine zentrale Rolle spielen. Die Beeinflussung des Verhaltens der Verkehrsteilnehmer und somit die Verlagerung der Verkehrsnachfrage kann jedoch nicht alle Störungsursachen adressieren. Andere Maßnahmen der Verkehrsangebotsbeeinflussung zur Erhöhung der Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit des Straßennetzes sind zwingend notwendig.

Eine Literaturanalyse zu Potentialen von Verkehrsnachfragebeeinfussung in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität München ergab umfangreiche Vorarbeit auf dem Gebiet der Befolgungsgrade und umlenkbaren Verkehrsanteile einzelner Netzbeeinflussungsanlagen. Untersuchungen zu den Potentialen räumlicher und zeitlicher Verlagerung für einen gesamten Untersuchungsraum sind aufgrund der vielfältigen Einflussgrößen einzelner Anlagen als schwierig zu bewerten. Die netzweiten Wirkungen von individueller Verkehrsinformation über Navigationsgeräte lassen sich dahingegen per Simulation leichter auf einen gesamten Ballungsraum übertragen. Speziell für die verkehrlichen Wirkungen von zeitlicher Verlagerung liegen kaum empirische Untersuchungen vor.

Netzbeeinflussungsanlagen (NBA) sind kollektiv-dynamische Leit- und Informationssysteme, die die Routenwahl der Verkehrsteilnehmer während der Fahrt beeinflussen. Mit Hilfe von NBA werden Verkehrsströme von überbelasteten Strecken auf weniger belastete Alternativrouten gelenkt. Somit dienen sie dem Abbau von vorhandenen und der Vermeidung von prognostizierten Stauungen, der Minimierung der Gesamtreisezeiten, der Verringerung des Kraftstoffverbrauchs (Umweltbelastung) sowie der Erhöhung der Verkehrssicherheit. Außerdem wird mit Hilfe von NBA der volkswirtschaftliche Schaden durch Wartezeiten im Stau reduziert.

NBA werden an hochbelasteten Autobahnteilstrecken, auf denen häufig Verkehrsstörungen auftreten, die einen möglichst hohen Anteil an Durchgangsverkehr aufweisen und für die eine geeignete Alternativroute mit Kapazitätsreserven und geringem Umwegfaktor vorhanden ist, gebaut.

Eine Umlenkungsempfehlung sollte nur dann gegeben werden, wenn die umgelenkten Verkehrsteilnehmer durch die Nutzung der empfohlenen Alternativroute einen Vorteil gegenüber denen erzielen, die der Empfehlung nicht gefolgt sind, wodurch eine systemoptimale Beeinflussung schwierig ist.

Die Umleitungsempfehlungen auf Bundesfernstraßen werden den Verkehrsteilnehmern entweder auf Wechselwegweisern (WWW), dynamischen Wegweisern mit integrierten

Stauinformationen (dWiSta) oder dynamischen Informationstafeln zur Reisezeitanzeige (dIRA) angezeigt.

Wirkungen von NBA hängen von einer Vielzahl von Einflüssen ab. Dazu gehören technische Aspekte (Richtigkeit, Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Schnelligkeit), verkehrliche Aspekte (Umleitungsanlass, Länge und Art der Alternativroute, Umfeldbedingungen, Fahrerkollektiv), menschliche Aspekte (Wahrnehmbarkeit, Auffälligkeit, Begründbarkeit, Akzeptanz, Erfahrungen der Fahrer) sowie Informationen anderer Systeme. Generell ist die Akzeptanz einer Verkehrsbeeinflussungsmaßnahme von der für den Kraftfahrer erkennbaren Übereinstimmung zwischen Anzeigezustand der Verkehrsbeeinflussungsanlage und der aktuellen (Verkehrs-) Situation abhängig (vgl. BMVBS [10] und BMVBS [11], Steinauer et al. [43]).

Hinweise für eine Wirkungsschätzung von NBA sind in den Normen und Richtlinien nicht beschrieben. Bisherige Untersuchungen zur Wirkungsanalyse von NBA thematisieren die Quantifizierung der räumlich verlagerbaren Verkehrsanteile bzw. bestimmen innerhalb von Kosten-Nutzen-Analysen Effizienz und Kosten von NBA.

Bisherige Studien zeigen, dass im Bereich von Bundesfernstraßen 5 bis 20% des Durchgangsverkehrs (vgl. Balz [5]) umgeleitet werden können. Zu einem ähnlichem Ergebnis der umgelenkten Verkehrsanteile zwischen 5% und 30% des Durchgangsverkehrs kommen Beckmann et al. [8] und Steinauer et al. [43]. Schlaich et al. [37] beziffern auf Basis von Mobilfunkdaten im Projekt Do-iT den Anteil des Durchgangsverkehrs, der bei Schaltung der NBA im Autobahnviereck Stuttgart-Heilbronn-Karlsruhe-Walldorf auf eine Alternativroute verlagert werden könnte, auf 10-12%. In Kühne et al. [27] werden die verlagerbaren Verkehrsanteile des Gesamtverkehrs auf einer Route mit 5 bis 15% beziffert. Wird die Umleitung mit der Anzeige „Stau“ begründet, erhöht sich der Anteil nach diesen Angaben auf 10 bis 20%.

In BASt [6] wurden bekannte Methoden und Verfahren zur Bestimmung des Befolgungsgrades von Alternativroutenempfehlungen an NBA untersucht. Demnach sind individuelle, situative und verkehrliche Einflüsse jeder NBA heterogen und es treten starke zufällige Schwankungen der Zusammensetzung des zu beeinflussenden Verkehrsstromes auf. Dadurch wird die Bestimmung des Befolgungsgrades mit einem allgemeingültigen und auf andere Anlagen übertragbaren Verfahren schwierig.

Untersuchungen zu Wirkungen von individueller Verkehrsinformation über Navigationssysteme konnten zeigen, dass durch Straßenverkehrsinformationen grundsätzlich ein Potenzial zur stärkeren Beeinflussung des Verkehrsverhaltens vorhanden ist und Reduzierungen der Reisezeit, der Staubildung und des Unfallgeschehens erreicht werden können, vgl. Abdel-Aty [1], Conquest et al.[16], Hu und Mahmassani [23]. Im Rahmen der Projekte Munich COMFORT und EUROTRIANGLE/ CORE konnte bei Feldversuchen nachgewiesen werden, dass bei etwa 30% der durchgeführten Fahrten, bei denen fahrtrelevante Meldungen empfangen wurden, eine veränderte Routenwahl bewirkt wurde und somit ein hohes

Potenzial zur stärkeren Beeinflussung des Verkehrsverhaltens besteht. Der erreichbare Nutzen hängt dabei wesentlich vom Ausmaß der betreffenden Störung und den verfügbaren alternativen Netzkapazitäten ab, vgl. Prognos und Keller [31].

Eine Abschätzung der erreichbaren Reisezeitersparnisse bei einer vollständigen Ausrüstung aller Fahrzeuge mit Verkehrsinformationen wurde von Zackor und Keller [47] gegeben. Sie kamen zu einer Größenordnung von 2% bis 3%, die sich durch Umfahrung von Staus realisieren lässt. Dadurch werden hochbelastete und staugefährdete Streckenabschnitte entlastet und vorhandene Kapazitätsreserven im Netz genutzt. Sind jedoch keine Kapazitätsreserven (Alternativroute mit Verkehrsbelastung unterhalb der Kapazität) vorhanden, kann auch bei Vorhandensein hochwertiger Verkehrsinformationen in allen Fahrzeugen keine Verbesserung erreicht werden.

Auf Basis mikroskopischer Simulationen des Hauptstraßennetzes von Hannover kam Matschke in [28] zu ähnlichen Ergebnissen. Es zeigte sich, dass bei vollständig dynamischer Navigationsweise, also der Zielführung unter Heranziehung aktueller, im gesamten Netz verfügbarer Reisezeiten, Reduzierungen von rund 5% der Gesamtreisezeit aller Fahrzeuge bezogen auf den Fall, dass kein Fahrzeug im Netz navigiert ist, erreichbar sind. Als Datengrundlage sind dazu jedoch zeitlich fein aufgelöste Informationen in 5-Minuten-Intervallen notwendig. Bei Vergrößerung der Aktualisierungsschritte auf 15 Minuten oder 30 Minuten verringern sich die resultierenden Gesamtreisezeitgewinne und liegen dann maximal bei 4% bzw. 3%. Für die Reisezeiten einzelner Quelle-Ziel-Beziehungen kann eine Reisezeitreduzierung von etwa 10% bei einem langen Aktualisierungsintervall von 30 Minuten und normalen Verkehrsverhältnissen erzielt werden. Wird das Intervall zur Sendung neuer Informationen auf fünf Minuten reduziert, sind größere Reduzierungen von 15% bis 20% möglich, wobei sich die positiven Auswirkungen auch für die Nicht-Navigierten ergeben

Beim kombinierten Einsatz von NBA und individueller Verkehrsinformation über Navigationssysteme zeigen sich nachweisbare Wechselwirkungen (vgl. Beckmann et al. [7]). Mit Hilfe von Simulationsrechnungen haben Beckmann et al. [8] die Auswirkungen von Navigationssystemen und Netzbeeinflussungsanlagen untersucht. Dabei wurde das Routenwahlverhalten auf Basis von Teilkollektiven abgebildet und Szenarien zu unterschiedlichem Vorhandensein kollektiver und individueller Verkehrsbeeinflussungssysteme auf dem BAB-Netz Rhein-Ruhr durchgeführt. Die Untersuchung ergab, dass die exogenen Einflüsse (Netzgeometrie, Belastungssituation, Störfallursachen) einen erheblichen Einfluss auf das Simulationsergebnis hatten und kein eindeutiges Handlungskonzept abgeleitet werden konnte. Hinsichtlich der Befolgungsrate wurde erläutert, dass beide Systeme sich gegenseitig stützen können, wenn sie beide die Route der Wechselwegweisungsanlage (WWW) empfehlen. Zur Erreichung einer hohen Befolgungsrate bei kollektiven Systemen folgerten Beckmann et al. [8], dass zukünftige

WWW die Möglichkeit der besseren Information der Fahrer (z. B. über Stauort, Stauursache, momentane Reisezeiten auf den Alternativrouten) zur Akzeptanzsteigerung nutzen sollten.

Außerdem wird ein Datenverbund, bei dem alle Anbieter dynamischer Systeme auf die gleiche, möglichst qualitativ hochwertige Datengrundlage zugreifen können, empfohlen, damit das System „Verkehr“ transparenter wird. Empfohlen wird ebenfalls ein Informationsverbund, bei dem zusätzlich zum Datenverbund, Informationen über Schaltvorgänge und Routenempfehlungen von den NBA an die dynamischen Navigationssysteme weitergegeben werden.

Bei hohen Verbreitungs- und Befolgungsraten von individuellen Navigationssystemen kann es durch Verlagerung signifikanter Verkehrsanteile zu einem Nicht-Schalten der WWW kommen. Es könnte aber auch passieren, dass die individuellen Systeme die durch die WWW entlastete Hauptroute empfehlen. Für den Nutzer des individuellen Systems entstehen in beiden Fällen an den Wechselverkehrszeichen widersprüchliche Routenempfehlungen. Beckmann et al. [8] gehen jedoch davon aus, dass die Systeme sich nicht gegenseitig beeinflussen, da die Anteile der mit einem Navigationsgerät ausgestatteten Fahrzeuge noch sehr gering ist. Aufgrund der rasanten Marktentwicklung in den vergangenen Jahren ist diese Aussage jedoch nicht mehr haltbar, sodass gerade diese gegenseitigen Beeinflussungen zu untersuchen sind.

NBA sind durch ihre von der Akzeptanz der Verkehrsteilnehmer abhängige Wirksamkeit nur bedingt geeignet zur Beeinflussung der Verkehrsnachfrage mit dem Ziel einer Annäherung an ein netzweites Systemoptimum. Systemoptimale Umlenkung der Verkehrsnachfrage (sowohl räumlich als zeitlich) bedarf zusätzlicher Maßnahmen der Angebotsbeeinflussung so wie LSA-Signalisierung, Kapazitätsbeeinflussung mit Streckenbeeinflussungsanlagen oder Standstreifenfreigabe und Bepreisung des Verkehrsangebots durch Maut.

Die Potentiale von Routen- und Abfahrtszeitwahl im Sinne von systemoptimaler räumlicher und zeitlicher Verlagerung werden auf typisierten Beispielnetzen untersucht. Dabei wird der Unterschied des Reisezeitaufwands zwischen einem Verkehrszustand im Nutzeroptimum (NO, Zustand ohne Beeinflussung) und einem Verkehrszustand im Systemoptimum (SO, Zustand mit Beeinflussung) verglichen. Es zeigt sich, dass die Differenz des netzweiten Reisezeitaufwands zwischen NO und SO von drei wesentlichen Randbedingungen abhängig ist:

- Anzahl und Ausprägung der vorhandenen Alternativrouten bzw. Netzmaschen
- Verkehrsnachfrage bzw. Auslastungsgrad des Straßennetzes
- Anteil des beeinflussbaren Straßennetzes (Beispiel Autobahn-Maut)

Gibt es nur eine Route von Quelle zum Ziel, so unterscheidet sich der Reisezeitaufwand im NO und SO logischerweise nicht. Alle Verkehrsteilnehmer wählen die einzige, zur Verfügung stehende Route. Gibt es allerdings zwei Routen von Quelle

zum Ziel, so hängt der Unterschied des Reisezeitaufwands zwischen NO und SO vom Unterschied der Reisezeit, oder allgemeiner vom Unterschied der Routenwiderstände, ab. Im SO werden einige Verkehrsteilnehmer zum Wohle der Gesamtheit, bzw. zur Minimierung des Reisezeitaufwands, auf die langsamere Alternativroute geleitet. Der Anteil der auf die Alternativroute umgelenkten Fahrzeuge sinkt mit sinkender Attraktivität der Alternativroute. Ist die Alternativroute aufgrund ihrer Reisezeit gänzlich unattraktiv, so wird im SO der gesamte Verkehr über die Hauptroute geleitet. Dieser Zusammenhang ist für ein Beispielnetz mit einer Quelle-Ziel-Relation und einer Haupt- und Alternativroute in Bild 73 verdeutlicht. Je mehr unabhängige Netzmaschen zur Verlagerung des Verkehrs zur Verfügung stehen, desto größer werden die in Bild 73 dargestellten Effekte.

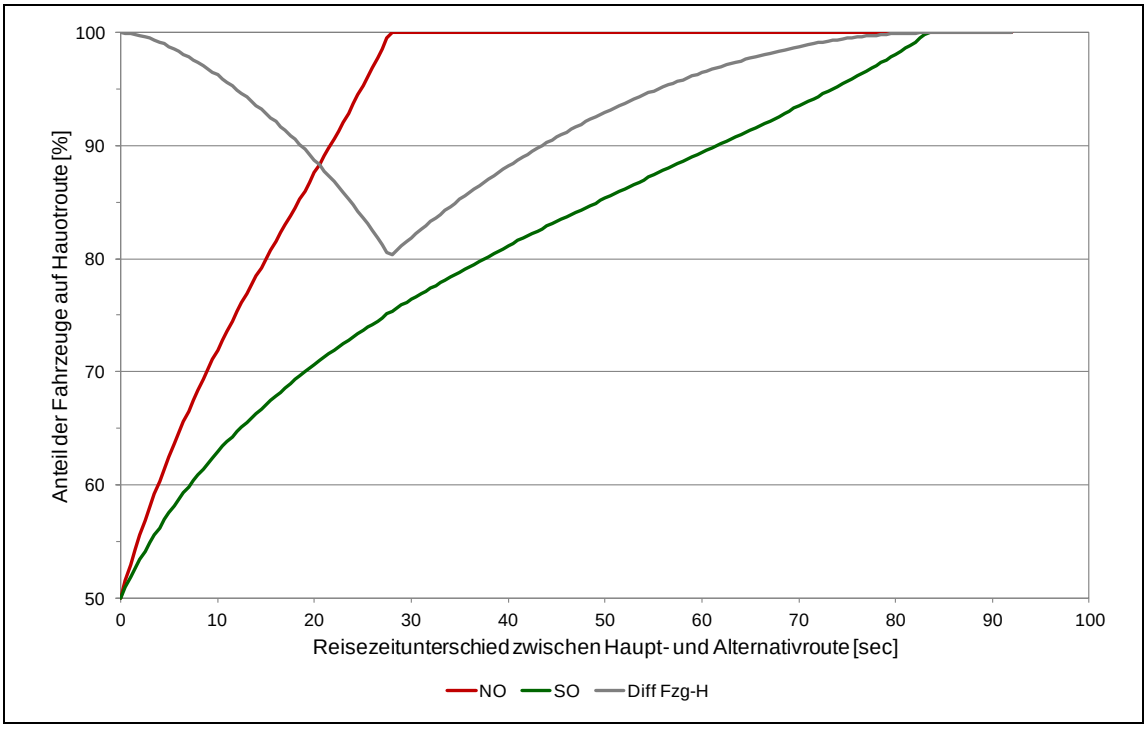


Bild 73: Differenz des netzweiten Reisezeitaufwands zwischen NO und SO in Abhängigkeit der Reisezeitdifferenz zwischen der Haupt- und Alternativroute

Ein ähnlicher Zusammenhang ergibt sich zwischen der Differenz des Reisezeitaufwands und der Auslastung des Straßennetzes. Für geringe Auslastungsgrade sind die Verlagerungswirkungen gering. Mit steigender Verkehrsnachfrage werden größere Anteile der Verkehrsströme auf den Hauptrouten auf die noch freien Alternativrouten verlagert. Bei zu großer Auslastung des Straßennetzes stehen auf den Alternativrouten keine freien Kapazitäten mehr zur Verfügung, so dass kaum Unterschiede zwischen Verteilung der Verkehrsströme im NO und SO bestehen.

Wird in der Praxis eine systemoptimale Verlagerung durch eine Bepreisung oder andersartige Anpassung des Verkehrsangebots vorgenommen, so ist der Anteil des beeinflussbaren Straßennetzes relevant. Je größer der Anteil des beeinflussbaren Straßennetzes ist, desto größer sind die Verlagerungseffekte und demzufolge auch die Differenz des Reisezeitaufwands zwischen NO und SO. Das Beispiel einer Autobahnmaut zeigte für typisierte Beispielnetze eine deutliche Verlagerungswirkung ins nicht bemautete Nebennetz und konnte die netzweiten Reisezeitaufwände generell wenig und im Einzelfall gar nicht reduzieren.

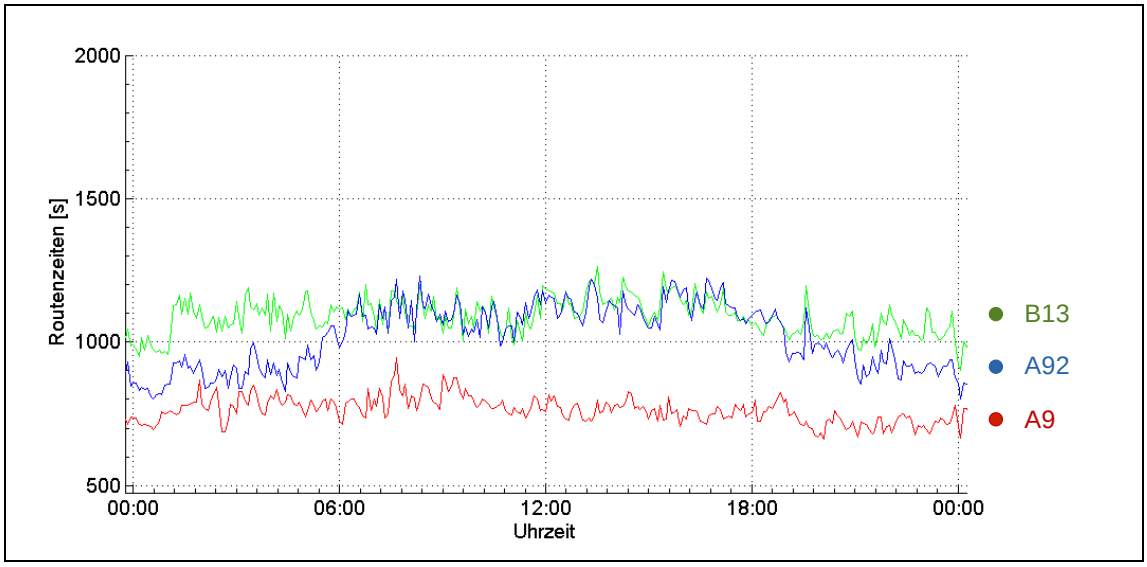


Bild 74: Fahrzeiten im Autobahnnetz ohne Störung

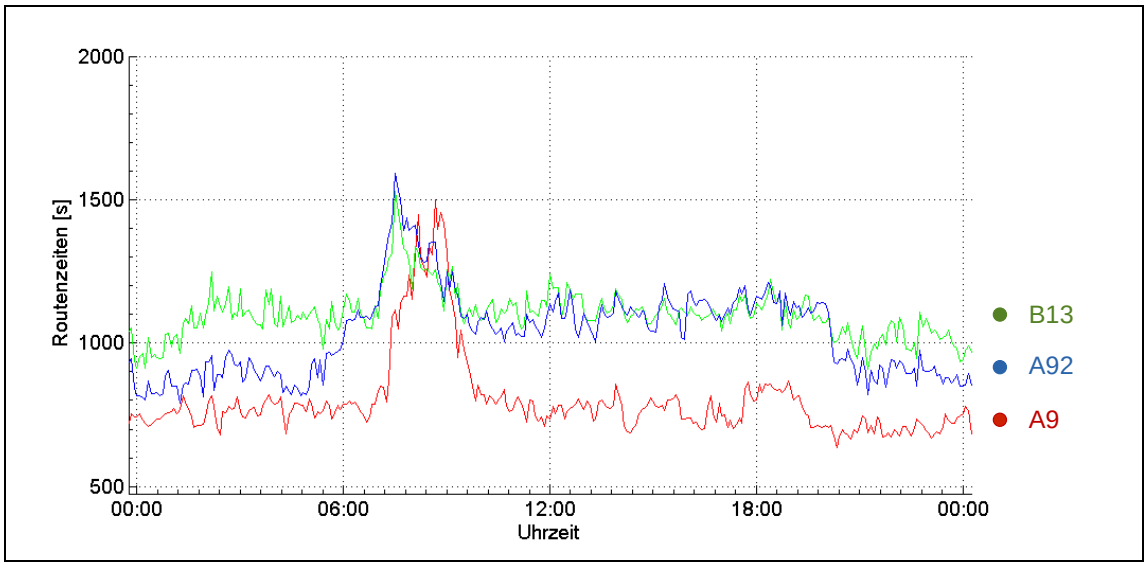


Bild 75: Fahrzeiten im Autobahnnetz ohne Störung

Eine abschließende Überprüfung der gemessenen Reisezeiten (ANPR-Systeme) entlang der wichtigsten Haupt- und Alternativrouten, mit Quelle im nördlichen Umland und Ziel München Zentrum, zeigt, dass im heutigen Zustand eine klare

Hauptroutenpräferenz für die A9 vorherrscht. Bei freiem Verkehr sind die Reisezeiten entlang der A9 deutlich geringer als auf den beiden Alternativrouten entlang der A92 oder B13, siehe Bild 74. Im Falle von Störungen werden die Alternativrouten jedoch zunehmend attraktiver (bzw. ähnlich unattraktiv wie die Hauptroute) und es lässt sich anhand der Erhebungsdaten eine nahezu nutzeroptimale Aufteilung auf die drei Routen beobachten.

3.5.2 Ermittlung von Verkehrszuständen

3.5.2.1 Ableitung typischer Nachfragezustände

Ein typischer Nachfragezustand ist gekennzeichnet durch eine regelmäßig wiederkehrende Nachfragesituation, die die alltäglichen Verkehrsströme abbildet. Verkehrssituationen, die aufgrund unregelmäßiger Störungen wie Baustellen, Unfälle oder Großereignissen wie Messen etc. zustande kommen, gelten nicht als typische Nachfragezustände und werden in dieser Analyse nicht näher betrachtet.

Eine Analyse der Tagesganglinien strategisch wichtiger Querschnitte im Untersuchungsraum zeigt deutlich eine starke Abhängigkeit der Tagesganglinien vom Wochentag. Mit München als monozentrisch angeordnetem Ballungsraum zeigt sich weiterhin ein Wechsel der Hauptstromrichtung vormittags (stadteinwärts) und nachmittags (stadtauswärts).

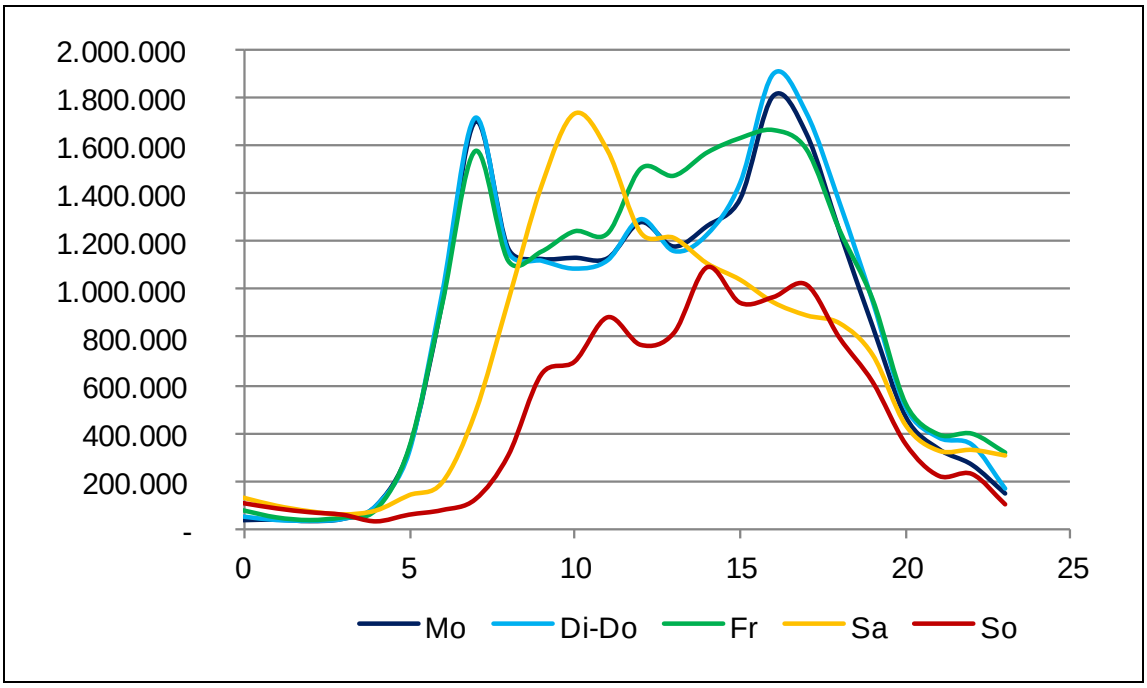


Bild 76: Ganglinien des Gesamtverkehrsaufkommens im erweiterten Untersuchungsraum (PTV VALIDATE) nach Wochentag

Für das Verkehrsmodell des Untersuchungsraums liegen Nachfragematrizen für jede Stunde des Tages vor. Dabei werden zusätzlich verschiedene Tagarten unterschieden (Mo, Di-Do, Fr, Sa, So), so dass in Summe 120 (5x24) Stundenmatrizen verfügbar sind, siehe Bild 76.

Aus diesen Stundenmatrizen werden anhand der folgenden Kenngrößen diejenigen ermittelt, die typische Nachfragezustände repräsentieren:

- Räumliche Lage der Hauptquellen und –ziele
- Gesamtverkehrsaufkommen der betreffenden Stunde
- Belastung der strategisch wichtigen Alternativrouten

Die 12 Nachfragematrizen ließen sich auf acht typische Nachfragezustände reduzieren, die regelmäßiges Verkehrsaufkommen in der Haupt-, Neben- und Schwachverkehrszeit repräsentieren:

- Hauptverkehrszeit: DiDo 7-8Uhr, 17-18Uhr, Fr 7-8Uhr, 14-15Uhr
- Nebenverkehrszeit: DiDo 12-13Uhr, 14-15Uhr, Fr 17-18Uhr
- Schwachverkehrszeit: Fr 21-22Uhr

Tabelle 38: Typische Nachfragesituationen im Ballungsraum

	Verskehrsaufkommen			
Nr.	**Gesamtgebiet**	**A9**	**A92**	**B13**
DiDo7:00	968.215	5.549	2.941	1.183
DiDo12:00	730.403	3.485	1.698	452
DiDo14:00	697.535	3.771	1.786	517
DiDo17:00	987.636	4.039	2.346	706
Fr7:00	879.676	5.158	2.171	907
Fr14:00	888.386	4.274	2.058	592
Fr17:00	897.415	4.259	2.090	609
Fr21:00	226.252	2.148	1.014	175
Σ	**6.275.518**	**32.683**	**16.104**	**5.141**

Andere Wochentage zeigten keine nennenswerten Abweichungen, die für die Analyse einer typischen Nachfragesituation von großer Bedeutung sind. Bild 77 und Bild 78 zeigen einen graphischen Überblick der Kenngrößen am Beispiel der Spitzenstunde von 7:00-8:00 Uhr an einem Dienstag oder Donnerstag.

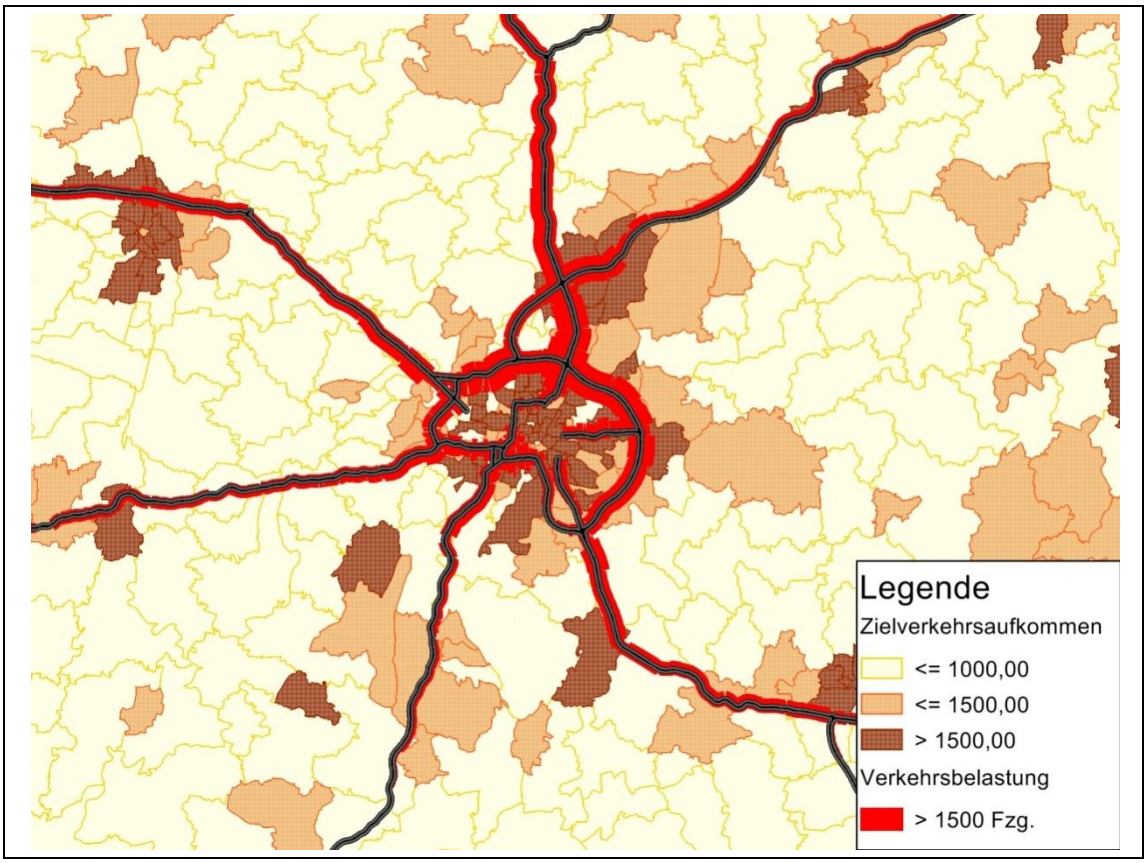


Bild 77: Nachfragesituation mit Zielverkehrsaufkommen, DiDo 7:00-8:00 Uhr

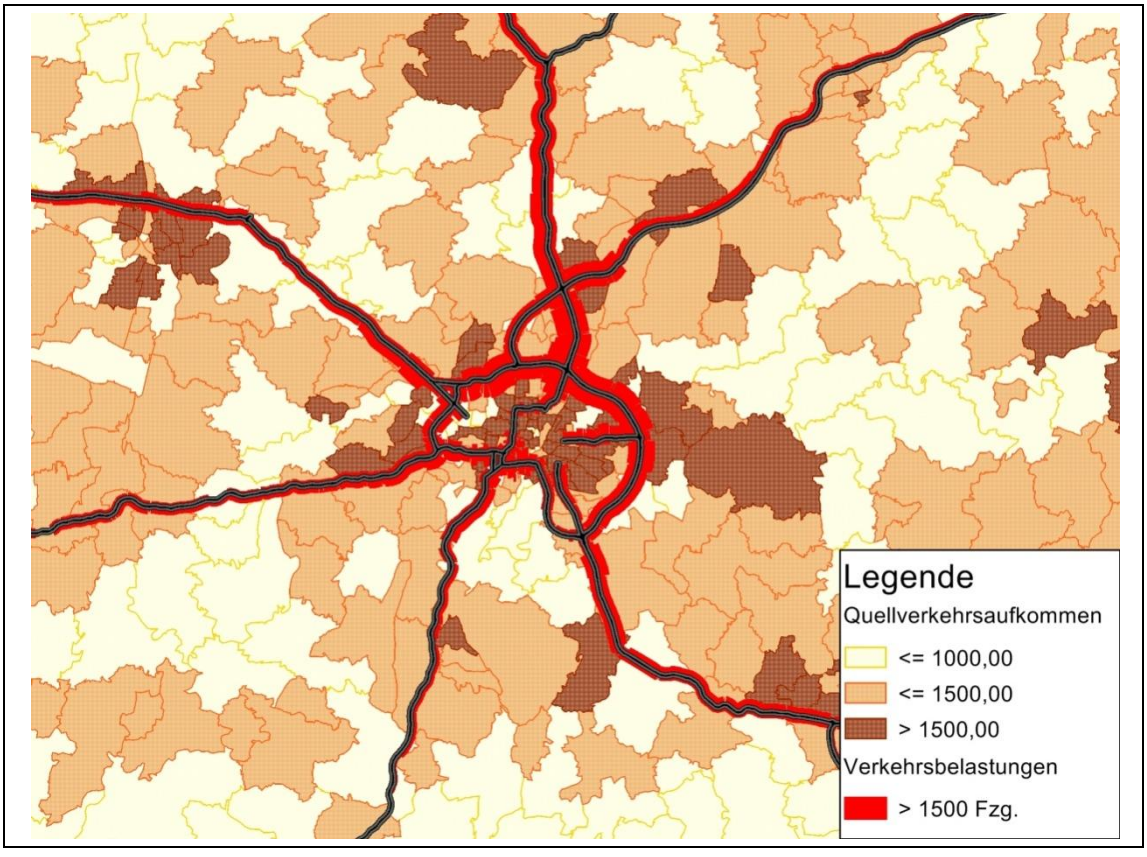


Bild 78: Nachfragesituation mit Quellverkehrsaufkommen Di Do 7:00-8:00 Uhr

Der Berufsverkehr hat eine klar erkennbare Zielrichtung vom Umland nach München Zentrum, gut zu erkennen durch die farbliche Abstufung der Zielverkehrsaufkommen der Bezirke. Das Gesamtverkehrsaufkommen beträgt 960.000 Fahrten und die Verkehrsbelastung auf dem Hauptstraßennetz ist zudem stark richtungsbezogen.

3.5.2.2 Ermittlung der Verkehrszustände für ein theoretisches Optimum, den heutigen Zustand und Zustand mit perfekter Information

Ein Verkehrszustand beschreibt die räumliche und zeitliche Verteilung der Verkehrsnachfrage im Straßennetz. Aufbauend auf den typischen Nachfragesituationen wird nun untersucht, wie sich die Verkehrsnachfrage aufgrund von Information räumlich und zeitlich verlagern lässt und damit zur Reduktion von Fahrzeugstunden und Kraftstoffverbrauch im gesamten Ballungsraum beitragen kann. Dazu werden vier verschiedene Verkehrszustände definiert und verglichen:

- Unbeeinflusster Verkehr ohne Information (OI):
  Verkehrszustand, der sich ergibt, wenn alle Verkehrsteilnehmer ohne Informationen, allein aufgrund ihrer Ortskenntnis ohne die Kenntnis der aktuellen Reisezeiten entscheiden. Dieses Fahrerverhalten wird im makroskopischen Verkehrsmodell mit einer stochastischen Umlegung, basierend auf den üblicherweise gewählten Routen, abgebildet. Die aktuelle belastungsabhängige Reisezeit ist den Fahrern weitestgehend unbekannt.

- Tatsächlich erreichter Zustand (EZ):
  Der erreichte Zustand ist der Verkehrszustand, der während der Erhebung tatsächlich beobachtet wurde. Er entspricht der Referenzverkehrslage, die aus den Daten des AP1 und AP3 bestimmt wurde. Zugrunde liegt das empirisch validierte Routen- und Abfahrtszeitwahlverhalten der Fahrer, das ins Verkehrsmodell übernommen wird. Dabei beruht das Entscheidungsverhalten der Autofahrer auf einer subjektiven Wahrnehmung des Verkehrsangebots, implizitem Wissen aus Erfahrung und unvollständiger Information über die aktuelle Verkehrslage. Dieses Fahrerverhalten wird im Verkehrsmodell mit einer stochastischen Umlegung abgebildet und an der Referenzverkehrslage validiert. Bei einer stochastischen Umlegung werden für die Suche von Routenalternativen die Widerstände (oder Nutzen) der Netzelemente (Reisezeit, Länge etc.) ausgehend vom tatsächlichen Wert innerhalb gesetzter Grenzen zufällig variiert. Die Verteilung auf die Alternativrouten erfolgt nach dem in AP4 geschätzten Routenwahlmodell in Abhängigkeit der Routenwiderstände.

- Theoretisches Optimum (TO):
  Hier wird vorausgesetzt, dass das Routenwahlverhalten aller Fahrer, auch während der Fahrt, beeinflusst werden kann. Innerhalb gewisser Grenzen ist auch der Zeitpunkt des Fahrtantritts beeinflussbar. Fahrer sind nicht mehr nur an der Optimierung ihrer eigenen Fahrt interessiert, sondern verhalten sich für das Kollektiv der Gesamtverkehrsnachfrage optimal. Dieses Fahrerverhalten wird im Verkehrsmodell mit einer systemoptimalen Umlegung umgesetzt, bei der die Zielfunktion als Summe der Fzg-Stunden im gesamten Netz definiert ist. Die Verteilung der Verkehrsnachfrage erfolgt aufgrund aktueller Reisezeiten, wobei einzelne Verkehrsteilnehmer Reisezeitnachteile zum Wohle des Kollektivs hinnehmen müssen. In der Praxis ist dieser Zustand nicht durch reine Verkehrsinformation erreichbar, sondern bedarf anderer Verkehrslenkungsmaßnahmen, wie z. B. Maut.

- Praktisch erreichbares Optimum (PO):
  Das praktisch erreichbare Optimum unterscheidet sich vom theoretischen Optimum dadurch, dass Fahrer in Realität an der Optimierung ihrer persönlichen Fahrt und nicht der Minimierung der Fzg-Stunden des Gesamtkollektivs interessiert sind. Wenn Verkehrsinformationen für den einzelnen Fahrer nicht von Vorteil sind, verlieren sie mittelfristig ihre Wirkung durch sinkende Befolgungsgrade. Da Routen- oder Abfahrtszeitwahlempfehlungen durch Verkehrsinformation für den Fahrer nicht verpflichtend sind, kann Verkehrsinformation im optimalen Falle nur perfekt über die aktuellen Reisezeiten und Verkehrszustände informieren und zu einem nutzeroptimalen Zustand führen. Dabei sind die Reisezeiten auf allen Alternativrouten von einer Quelle zu einem Ziel minimal und gleich. Jeder einzelne Fahrer erlebt also die bestmögliche Reisezeit. Dieses Fahrerverhalten wird im Verkehrsmodell durch ein deterministisches Nutzergleichgewicht abgebildet, in dem alle Reisezeiten im gesamten Netz zu jedem Zeitpunkt bekannt sind und die Verkehrsnachfrage sich so verteilt, dass alle aktuellen Routenwiderstände auf einer Relation gleich sind.

Die Verkehrszustände werden zur besseren Analyse der verkehrlichen Wirkungen für ein Teilnetz des Untersuchungsraums modelliert. Dieses umfasst das strategisch interessante Gebiet um das Münchener Zentrum, siehe Bild 79.

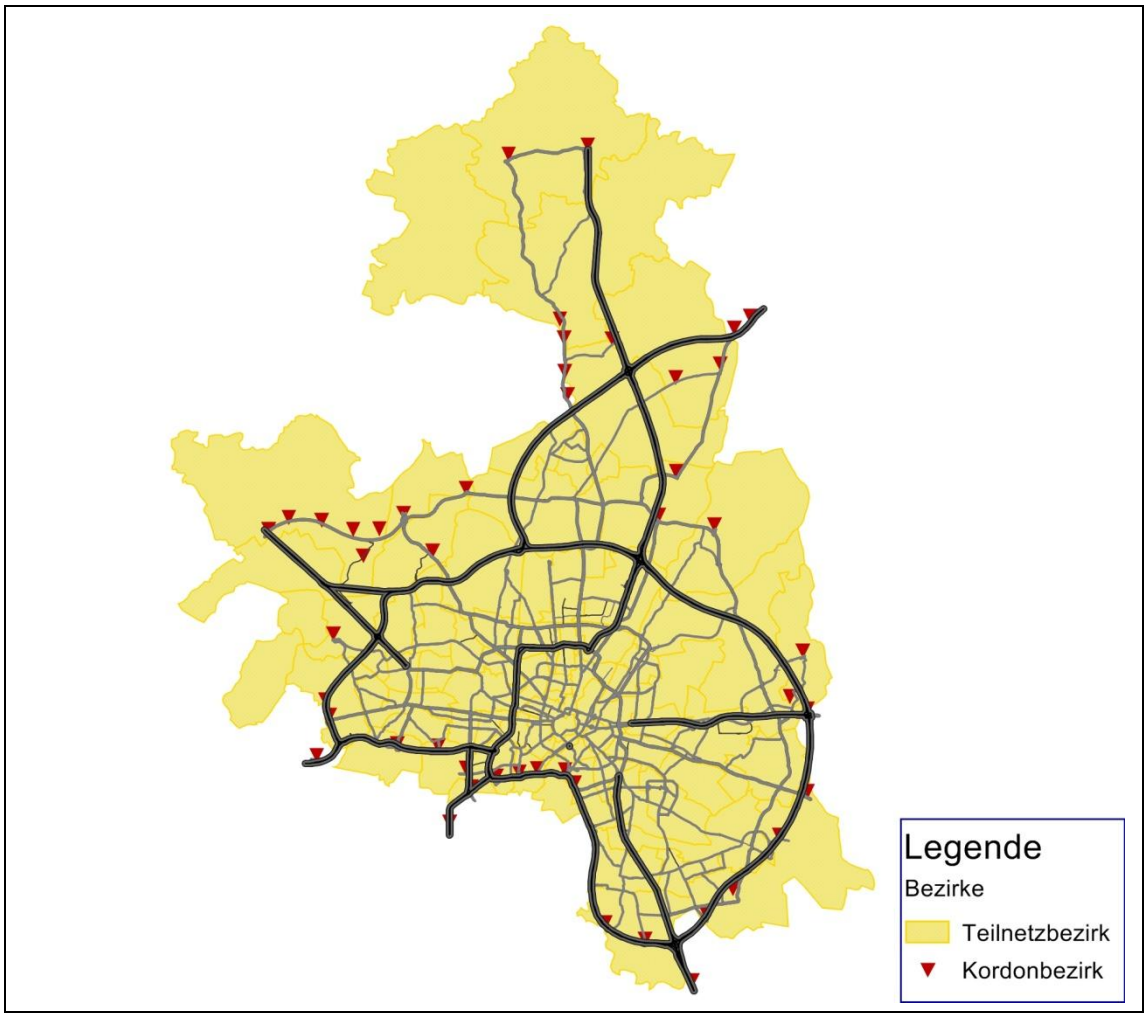


Bild 79: Teilnetz zur Analyse der Verkehrszustände

3.5.3 Quantifizierung der Potentiale bezogen auf den Reisezeitaufwand und den Kraftstoffverbrauch

3.5.3.1 Potentiale zur Reduktion des Reisezeitaufwands

Der Reisezeitaufwand ergibt sich direkt als Ergebnis der Verkehrsumlegung in Fahrzeugstunden (Fzg-H) für das untersuchte Teilnetz. Einen Vergleich der Fahrzeugstunden bei rein räumlicher Verlagerung der Verkehrsnachfrage liefert Bild 80 für alle definierten acht Nachfragesituationen und Verkehrszustände.

Die größten Potentiale zur Reduktion der Fahrzeugstunden durch räumliche Verlagerung bieten die Spitzenstunden DiDo 7:00-8:00, DiDo 17:00-18:00 und Fr 7:00-8:00. Dort hat auch die heutige Verkehrsinformation den größten Nutzen im Vergleich zum Zustand ohne Information mit 2% Reduktion der Fahrzeugstunden. Dass praktisch erreichbare Optimum bei perfekter Information bietet für alle Nachfragesituationen

deutliche Potentiale zur Reduktion der Fahrzeugstunden. Die Potentiale erhöhen sich stark im Falle von unvorhergesehenen Störungen.

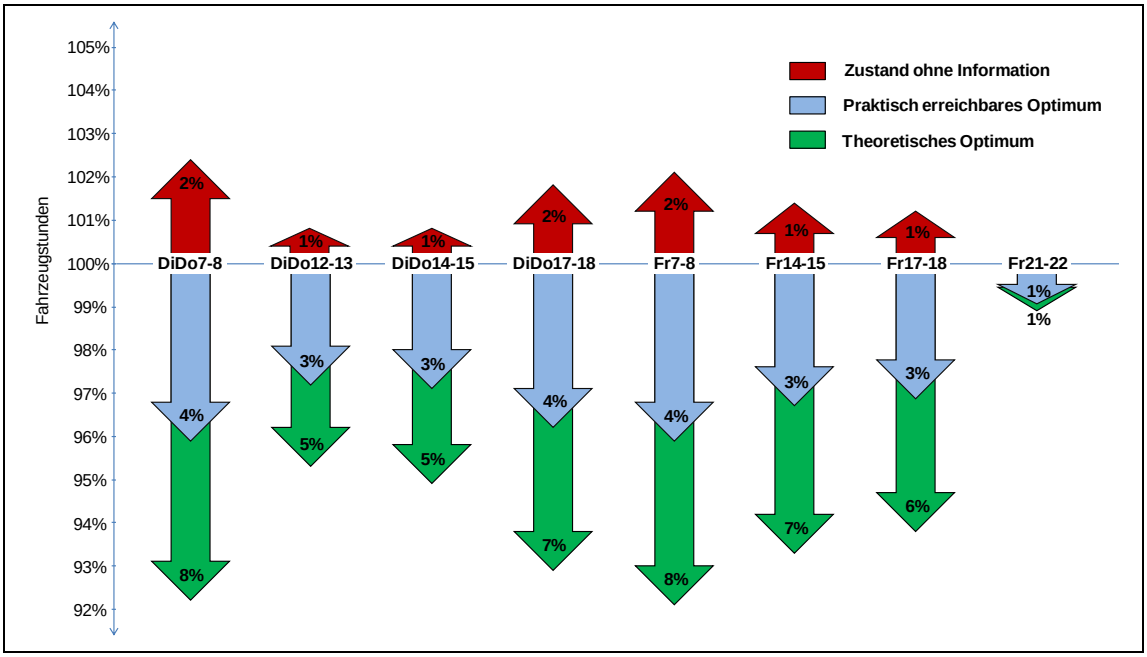


Bild 80: Wirkungen räumlicher Verlagerung der Verkehrsnachfrage als prozentuale Differenz der Fzg-H bezogen auf den tatsächlichen Zustand

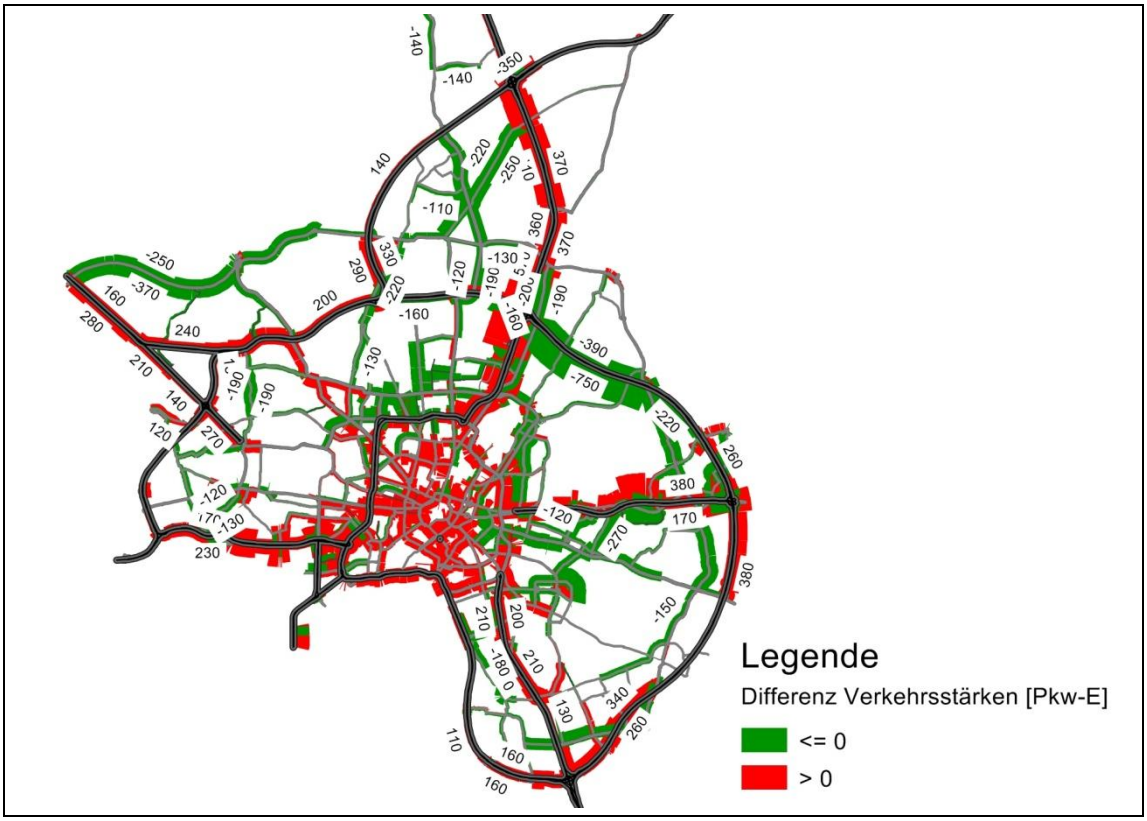


Bild 81: Differenz der Verkehrsbelastung zwischen heutigem Zustand und theoretischem Optimum

Systemoptimale Verlagerung bewirkt zum Teil eine nicht zu vernachlässigende Verlagerung ins Nebennetz, dargestellt als Differenz der Vekehrsbelastungen des heutigen Zustands zum theoretischen Optimum, siehe Bild 81. Dabei werden besonders Verkehre von der Hauptroute A9 auf die Alternativroute B13 verlagert.

Einen Nachweis der absoluten Zahlen der Fahrzeugstunden bei rein räumlicher Verlagerung der Verkehrsnachfrage liefern Tabelle 39 bis Tabelle 46 für alle definierten acht Nachfragesituationen und Verkehrszustände. Die Zahlen belegen, dass systemoptimale räumliche Verlagerung in allen acht Nachfragesituationen zu erhöhten Fahrzeugstunden im Nebennetz führt. Dies steht im Zielkonflikt zur Bündelung des Verkehrs auf Autobahnen und bewirkt auch verringerte Einsparpotentiale des Kraftstoffverbrauchs, siehe folgendes Kapitel. Mit besserer Verteilung der Nachfrage auf die freien Kapazitäten sinken im Allgemeinen die Auslastungsgrade bzw. die resultierenden mittleren Fahrzeiten. Dies wird auch an der mittleren Geschwindigkeit im untersuchten Teilnetz deutlich. Die mittlere Reiseweite reduziert sich für sieben der acht Nachfragesituationen im praktisch erreichbaren Optimum (Zustand mit perfekter Information). Im theoretischen Optimum (mit systemoptimaler Verlagerung) ist die mittlere Reiseweite dagegen etwas höher. Lediglich für Freitag 21:00-22:00 Uhr sind diese Effekte aufgrund zu geringer Auslastungsgrade nicht zu beobachten.

Tabelle 39: Räumliche Verlagerung der Verkehrsnachfrage für DiDo 7:00-8:00 Uhr

Nachfrage-situation	Fzg-H	Fzg-KM	Fzg-KM*	Mittlere Geschw. [km/h]	Mittlere Reisezeit [min]	Mittlere Reiseweite [km]
OI	44.935	2.084.508	879.860	46	28	32
EZ	43.900	2.074.022	865.384	47	28	32
PO	42.088	2.046.077	831.251	49	25	30
TO	40.480	2.057.940	898.441	51	26	31

*nur Straßen im Nebennetz

Tabelle 40: Räumliche Verlagerung der Verkehrsnachfrage für DiDo 12:00-13:00 Uhr

Nachfrage-situation	Fzg-H	Fzg-KM	Fzg-KM*	Mittlere Geschw. [km/h]	Mittlere Reisezeit [min]	Mittlere Reiseweite [km]
OI	19.811	1.340.684	493.110	68	20	30
EZ	19.654	1.338.686	490.829	68	23	33
PO	19.106	1.328.193	480.880	70	19	30
TO	18.724	1.321.596	518.678	71	19	30

*nur Straßen im Nebennetz

Tabelle 41: Räumliche Verlagerung der Verkehrsnachfrage für DiDo 14:00-15:00 Uhr

Nachfrage-situation	Fzg-H	Fzg-KM	Fzg-KM*	Mittlere Geschw. [km/h]	Mittlere Reisezeit [min]	Mittlere Reiseweite [km]
OI	21.670	1.444.069	528.018	67	23	34
EZ	21.502	1.441.726	525.341	67	22	33
PO	20.880	1.430.259	513.072	68	20	30
TO	20.404	1.420.493	560.695	70	22	34

*nur Straßen im Nebennetz

Tabelle 42: Räumliche Verlagerung der Verkehrsnachfrage für DiDo 17:00-18:00 Uhr

Nachfrage-situation	Fzg-H	Fzg-KM	Fzg-KM*	Mittlere Geschw. [km/h]	Mittlere Reisezeit [min]	Mittlere Reiseweite [km]
OI	38.658	2.040.488	831.020	53	26	34
EZ	37.967	2.031.831	818.650	54	25	33
PO	36.512	2.005.407	791.737	55	24	30
TO	35.265	2.006.815	853.613	57	25	34

*nur Straßen im Nebennetz

Tabelle 43: Räumliche Verlagerung der Verkehrsnachfrage für Fr 7:00-8:00 Uhr

Nachfrage-situation	Fzg-H	Fzg-KM	Fzg-KM*	Mittlere Geschw. [km/h]	Mittlere Reisezeit [min]	Mittlere Reiseweite [km]
OI	37.868	1.881.047	784.333	50	37	46
EZ	37.089	1.872.749	771.837	50	26	32
PO	35.583	1.847.671	745.000	52	23	30
TO	34.148	1.860.343	806.568	54	36	47

*nur Straßen im Nebennetz

Tabelle 44: Räumliche Verlagerung der Verkehrsnachfrage für Fr 14:00-15:00 Uhr

Nachfrage-situation	Fzg-H	Fzg-KM	Fzg-KM*	Mittlere Geschw. [km/h]	Mittlere Reisezeit [min]	Mittlere Reiseweite [km]
OI	32.019	1.841.187	714.382	58	25	33
EZ	31.583	1.836.472	705.828	58	25	32
PO	30.529	1.817.468	681.252	60	23	29
TO	29.454	1.816.305	747.629	62	22	30

*nur Straßen im Nebennetz

Tabelle 45: Räumliche Verlagerung der Verkehrsnachfrage für Fr 17:00-18:00 Uhr

Nachfrage-situation	Fzg-H	Fzg-KM	Fzg-KM*	Mittlere Geschw. [km/h]	Mittlere Reisezeit [min]	Mittlere Reiseweite [km]
OI	29.220	1.772.748	662.726	61	25	33
EZ	28.862	1.768.418	655.198	61	23	30
PO	27.973	1.752.735	634.147	63	22	29
TO	27.076	1.746.192	696.518	64	24	34

*nur Straßen im Nebennetz

Tabelle 46: Räumliche Verlagerung der Verkehrsnachfrage für Fr 21:00-22:00 Uhr

Nachfrage-situation	Fzg-H	Fzg-KM	Fzg-KM*	Mittlere Geschw. [km/h]	Mittlere Reisezeit [min]	Mittlere Reiseweite [km]
OI	7.609	642.568	189.012	84	18	32
EZ	7.600	642.487	188.925	85	18	32
PO	7.535	640.712	186.562	85	18	32
TO	7.517	638.830	192.063	85	18	32

*nur Straßen im Nebennetz

Zusätzlich zur rein räumlichen Verlagerung lässt sich das praktisch erreichbare Optimum im Falle einer perfekten Information über Reisezeiten und Abfahrtszeitpunkt ermitteln. Eine Möglichkeit zur aktiven Information über eine optimale Abfahrtszeitwahl als pre-trip Medium besteht bis heute jedoch nicht. Die heute beobachtete Nachfrage mit ihren gewählten Abfahrtszeitpunkten ist stark durch Wegeketten zwischen zeitlich festgelegten Aktivitäten, aber auch Erfahrungen über die Verkehrslage zu bestimmten Tageszeiten bedingt. Ein theoretisches Optimum, als Gleichverteilung der Verkehrsnachfrage über den Tag, ist durch die mangelnde zeitliche Flexibilität der Personen keine sinnvolle Bezugsgröße. Das hier modellierte theoretische Optimum bezieht sich auf eine systemoptimale Abfahrtszeitwahl innerhalb der Flexibilitätsgrenzen der Verkehrsteilnehmer (Systemoptimum auf Basis der Nutzenfunktion der Verkehrsteilnehmer).

Die größten Potentiale zur Reduktion der Fahrzeugstunden durch räumlich und zeitliche Verlagerung bieten die Spitzenstunden DiDo 7:00-8:00 und Fr 7:00-8:00, siehe Bild 82. In den Neben- und Schwachverkehrszeiten sind durch zeitliche Verlagerung keine nennenswerten Reduktionen über die der rein räumlichen Verlagerung hinaus möglich (dargestellt in den hellblauen und hellgrünen Balken). Dies liegt zum einen daran, dass die Auslastungsgrade des Straßennetzes außerhalb der Spitzenstunden zu gering sind, um eine Änderung der Abfahrtszeit zu bewirken, da die möglichen Reisezeitersparnisse in anderen Zeitintervallen zu gering sind. Zum anderen sind vor allem in der ausgedehnten Abendspitze keine hinreichenden Kapazitäten zu angrenzenden Zeitintervallen verfügbar. Die Potentiale der Abfahrtszeitwahl beruhen

auf der in der Befragung ermittelten zeitlichen Flexibilität der Probanden, die das Verhalten auf dem Arbeitsweg untersucht. Für substituierbare Aktivitäten wie Einkaufen, ist die reale Bereitschaft zum Wechseln der Abfahrtszeitwahl jedoch deutlich größer anzunehmen, so dass auch in den Neben- und Schwachverkehrszeiten mit vornehmlich Wegen zu anderen Zielen als dem Arbeitsplatz zeitliche Verlagerungspotentiale bestehen.

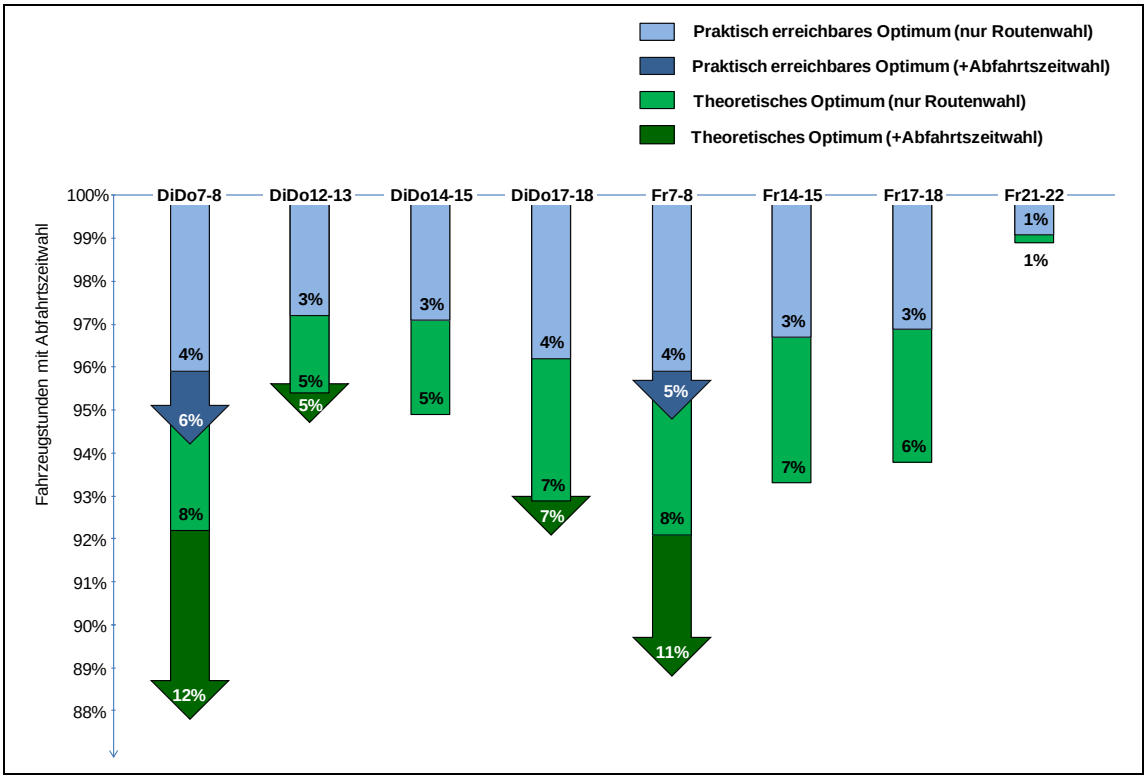


Bild 82: Wirkungen räumlicher und zeitlicher Verlagerung der Verkehrsnachfrage als prozentuale Differenz der Fzg-H bezogen auf den tatsächlichen Zustand

Das Umlegungsergebnis auf dem untersuchten Teilnetz zeigt für eine Unterteilung der ursprünglichen Stundenmatrix in drei 20-Minuten-Matrizen, dass für einen Zustand mit perfekter Information 0,2% der blauen Fahrer (mit Wunschabfahrtszeitpunkt zwischen 7:00 und 7:20 Uhr) um 15 Minuten früher abfahren, um Reisezeitvorteile zu nutzen. 0,1% der roten Fahrer (mit Wunschabfahrtszeitpunkt zwischen 7:40 und 8:00 Uhr) verlagern ihre Abfahrtszeit um 15 Minuten nach hinten und fahren erst zwischen 8:00 und 8:10 Uhr los, siehe Bild 83.

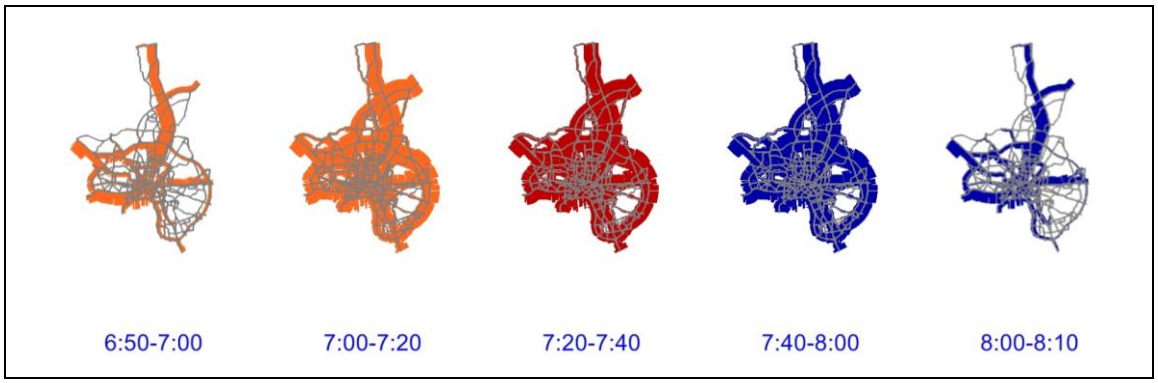


Bild 83: Zeitliche Verlagerung der Verkehrsnachfrage bei perfekter Information mit Wunschabfahrtszeitpunkt zwischen 7:00 und 8:00 Uhr

Einen Vergleich der absoluten Zahlen der Fahrzeugstunden und der verlagerten Fahrten in benachbarte Zeitintervalle bei räumlicher und zeitlicher Verlagerung der Verkehrsnachfrage liefern Tabelle 47 bis Tabelle 50. Ergebnisse sind nur für die Nachfragesituationen DiDo 7:00-8:00, DiDo 12:00-13:00, DiDO 17:00-18:00 und Fr 7:00-8:00 und berechnete Verkehrszustände (praktisch erreichbares Optimum, theoretisches Optimum) gegeben. In allen anderen Nachfragesituationen findet keine zeitliche Verlagerung statt, so dass die Ergebnisse identisch zu rein räumlicher Verlagerung sind. Verlagerte Fahrten sind für die Zeitintervalle -15 Minuten und +15 Minuten vom Wunschabfahrtszeitpunkt gegeben. Eine Verlagerung um mehr als ±15 Minuten findet nicht statt bzw. wird vom Fahrer nicht gewählt. Die Zahlen belegen, dass bereits eine marginale Anzahl verlagerter Fahrten den Reisezeitaufwand im gesamten Untersuchungsraum merklich reduzieren kann. In den morgendlichen Spitzenstunden verlagern sich mehr Pkw-E auf ein 15 Minuten früheres Zeitintervall, da hier freie Kapazitäten zur Verfügung stehen. Umgekehrt verhält es sich in der abendlichen Spitzenstunde.

Tabelle 47: Räumliche und zeitliche Verlagerung der Verkehrsnachfrage für DiDo 7:00-8:00 Uhr

Nachfrage-situation	Fzg-H	Fzg-KM	Verlag. Fahrten 15 früher	Verlag. Fahrten 15 später
PO	41.363	2.041.703	319	235
TO	38.554	2.051.185	976	566

Tabelle 48: Räumliche und zeitliche Verlagerung der Verkehrsnachfrage für DiDo 12:00-13:00 Uhr

Nachfrage-situation	Fzg-H	Fzg-KM	Verlag. Pkw-E 15 früher	Verlag. Pkw-E 15 später
PO*	19.106	1.328.193	0	0
TO	18.611	1.318.445	38	15

* keine zeitliche Verlagerung, Ergebnisse identisch zu rein räumlicher Verlagerung.

Tabelle 49: Räumliche und zeitliche Verlagerung der Verkehrsnachfrage für DiDo 17:00-18:00 Uhr

Nachfrage-situation	Fzg-H	Fzg-KM	Verlag. Fahrten 15 früher	Verlag. Fahrten 15 später
PO*	36.512	2.005.407	0	0
TO	34.951	2.001.924	0	15

* keine zeitliche Verlagerung, Ergebnisse identisch zu rein räumlicher Verlagerung.

Tabelle 50: Räumliche und zeitliche Verlagerung der Verkehrsnachfrage für Fr 7:00-8:00 Uhr

Nachfrage-situation	Fzg-H	Fzg-KM	Verlag. Fahrten 15 früher	Verlag. Fahrten 15 später
PO	35.155	1.843.550	183	171
TO	32.926	1.854.776	802	495

3.5.3.2 Potentiale zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs

Auf Basis der berechneten Verkehrsstärken wird anschließend der Kraftstoffverbrauch mit dem Handbuch für Emissionsfaktoren (HBEFA) berechnet.

Das HBEFA enthält Emissionsfaktoren für definierte Verkehrszusammensetzungen, makroskopische Verkehrssituationen und Verkehrsstärken. Verkehrszusammensetzungen beschreiben die Fahrzeugflotte mit Fahrzeugarten, Bezugsjahren und Ländern. Die ausgewählte Verkehrszusammensetzungsklasse variiert für verschiedene Streckentypen (Erschließungsstraße, Sammelstraße, Hauptverkehrsstraße etc.) und für städtisch bebaute Gebiete oder den ländlichen Raum. Eine Verkehrssituation ist definiert durch einen statischen Anteil, bedingt durch Infrastrukturmerkmale der Strecke (städtisch bebaut oder ländlicher Raum, Streckentyp, Längsneigung) und das gegebene Tempolimit. Die belastungsabhängige Verkehrssituation ergibt sich aus der Kombination der Infrastrukturmerkmale mit dem Level-of-Service basierend auf dem Auslastungsgrad der Strecke. Der Kraftstoffverbrauch ergibt sich als Produkt des Emissionsfaktors mit der Belastung und der Länge der Strecke. Dabei wird die Masse [g] getrennt nach Benzin (mit 075kg/l) und Diesel (mit 0,83kg/l) ausgegeben und anschließend als globaler Vergleichswert in einen Energiewert [kWh] umgerechnet. Ergänzend erfolgt die Berechnung der Kaltstartzuschläge für Quell- und Binnenverkehre von Innerortsbezirken der entsprechenden Verkehrszusammensetzungsklassen.

Einen Vergleich des Kraftstoffverbrauchs bei rein räumlicher Verlagerung der Verkehrsnachfrage liefert Bild 84 für alle definierten acht Nachfragesituationen und Verkehrszustände.

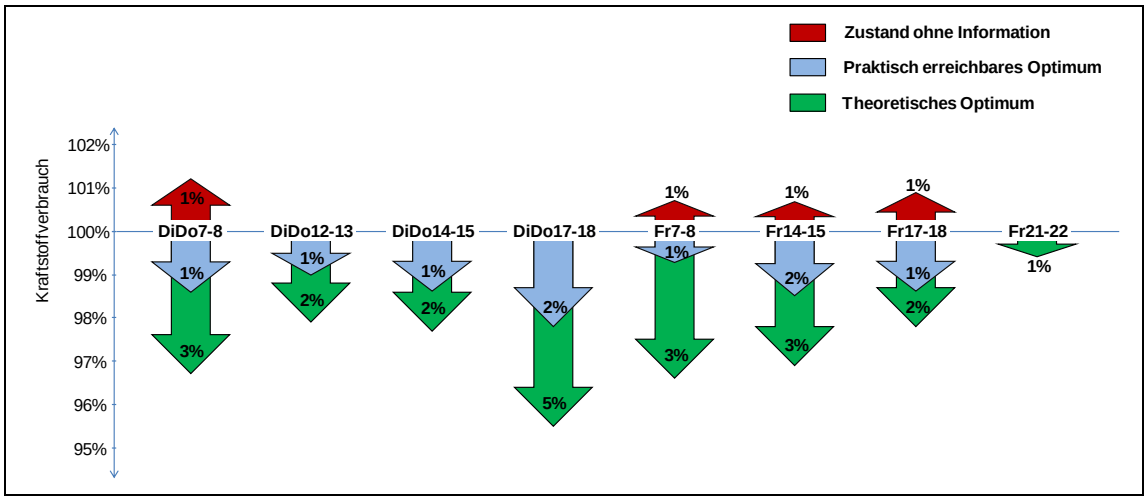


Bild 84: Wirkungen räumlicher Verlagerung der Verkehrsnachfrage als prozentuale Differenz des Kraftstoffverbrauchs bezogen auf den tatsächlichen Zustand

Die größten Potentiale zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs durch räumliche Verlagerung bieten die Spitzenstunden DiDo 7:00-8:00, DiDo 17:00-18:00 und Fr 7:00-8:00. In den Schwachverkehrszeiten sind durch räumliche Verlagerung keine nennenswerten Reduktionen möglich. Die Differenz des Kraftstoffverbrauchs zwischen praktischem Optimum (Nutzergleichgewicht) und theoretischem Optimum (Systemoptimum) sind deutlich kleiner als die der Fahrzeugstunden. Dies liegt an der bereits erwähnten Verlagerung ins Nebennetz, die zwar zur Reduktion der Fahrzeugstunden durch Ausnutzung freier Kapazitäten führt, jedoch den Verkehr in emmissionssensitive Netzbereiche verlagert. Dieser Umstand wird bei der Berechnung der Kraftstoffverbräuche mit HB-EFA berücksichtigt.

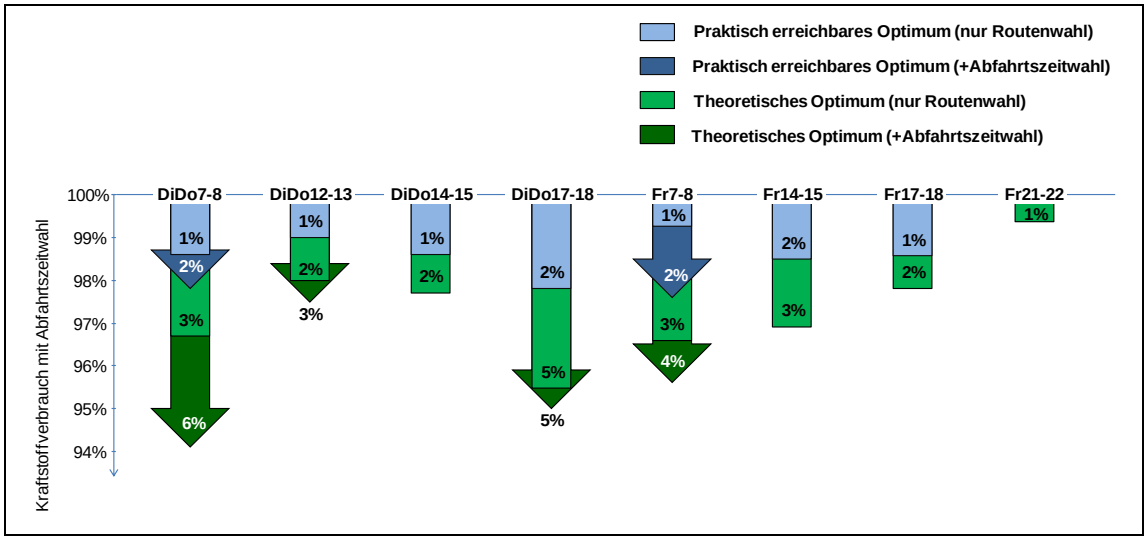


Bild 85: Wirkungen räumlicher und zeitlicher Verlagerung der Verkehrsnachfrage als prozentuale Differenz des Kraftstoffverbrauchs bezogen auf den tatsächlichen Zustand

Die größten Potentiale zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs durch räumliche und zeitliche Verlagerung bieten die Spitzenstunden DiDo 7:00-8:00 und Fr 7:00-8:00. Hier sind durch zeitliche Verlagerung nennenswerte Reduktionen über die der rein räumlichen Verlagerung hinaus möglich.

3.5.4 Ermittlung von Leistungsreserven

Die Leistungsfähigkeit eines städtischen Straßennetzes wird maßgeblich durch die Leistungsfähigkeit der Knotenpunkte bestimmt. Im Autobahnnetz mit planfreien Knotenpunkten können sowohl die Leistungsfähigkeit der Rampen als auch Engpässe auf der freien Strecke für die Leistungsfähigkeit maßgeblich sein. Ziel einer Netzbeeinflussung ist es, vorhandene Kapazitätsreserven zu identifizieren und zu nutzen. Kapazitätsreserve ist die zum jeweiligen Zeitpunkt von einem Streckenquerschnitt oder Netzknoten noch aufnehmbare Verkehrsmenge, ohne dass es hierdurch zu Verkehrsbehinderungen kommt. Räumliche und zeitliche Verlagerungen sind nur dann sinnvoll, wenn entlang der gesamten (Teil-) Route, auf die verlagert werden soll, ausreichend Kapazitätsreserven zur Verfügung stehen. Die Ermittlung der Leistungsreserven erfolgte für das Testfeld im Münchener Norden in den folgenden Schritten:

- Bestimmung der Kapazitäten von Einzelanlagen
- Ermittlung von Kapazitätsreserven von Einzelanlagen
- Bestimmung von Teilrouten mit Kapazitätsreserven

Die Universität Stuttgart übernahm die zeitabhängigen Kapazitäten der Einzelanlagen auf Strecken und Abbiegern in das Verkehrsmodell. Als Ergebnis wurden die modellierten Verkehrsbelastungen und Kapazitätsreserven von Einzelanlagen an die Technische Universität München und die Autobahn Direktion Südbayern zur Bestimmung von Teilrouten mit Kapazitätsreserven und Konzeption von Verkehrsbeeinflussungsstrategien übergeben (vgl. Riess et al. [34]).

3.5.5 Zusammenfassung

Im Rahmen des AP5 wurden zur Bestimmung von Zielen und Zielkonflikten von Beeinflussungsanlagen typisierte Beispielnetze zur Untersuchung der Potentiale von Routenwahl entwickelt. Dabei wurden die Unterschiede zwischen Nutzer- und Systemoptimum in Abhängigkeit von der Anzahl der vorhandenen Alternativrouten, von der Differenz der Routenreisezeiten und von der Verkehrsnachfrage untersucht. Des Weiteren wurde das Potential von Abfahrtszeitwahl untersucht und eine Modellierungsmethodik erarbeitet, die mit Standardverfahren zur dynamischen Umlegung verglichen wurde.

Zur Ermittlung der Leistungsreserven wurden die Kapazitäten für das Autobahnnetz auf Basis der vorhandenen Zählstellen mittels q-v-Diagramm neu bestimmt. An ausgewählten Knotenpunkten wurden die Knotenstromkapazitäten für das städtische Netz ermittelt. Abschließend wurden alle Teilrouten im Netz identifiziert, die Leistungsreserven aufwiesen. Es hat sich gezeigt, dass Verkehrsmanagementstrategien weitestgehend ausgenutzt sind. Der südliche Teil des Münchener Nordens weist zu Hauptverkehrszeiten kaum relevante Leistungsreserven auf, so dass weitere Strategien nicht angewendet werden können.

Zur Abschätzung der Potentiale von Verkehrsbeeinflussungssystemen (räumliche und zeitliche Verlagerung der Nachfrage) bezogen auf die Reduktion der Fahrzeugstunden wurden für das Testfeld verschiedene Verkehrszustände (theoretisches Optimum, heutiger Zustand, Zustand mit perfekter Information) für typische beobachtete Nachfragesituationen mit dem Verkehrsmodell bestimmt und miteinander verglichen.

Zur Ermittlung der Potentiale von Verkehrsbeeinflussungssystemen bezogen auf die Reduktion des Kraftstoffverbrauchs wurde ein zeitabhängiges makroskopisches Emissionsmodell des Untersuchungsraums erstellt. Mit ausgewählten GPS-Trajektorien wurde eine Simulation durchgeführt, um den Kraftstoffverbrauch für die mikroskopische Analyse zu bestimmen, um damit das makroskopische Emissionsmodell aufzuwerten. Im Folgenden wurde ein Gesamtkraftstoffverbrauch für jeden Verkehrszustand ermittelt.

Ziel dieses Arbeitspakets war es, zu untersuchen, in welchem Umfang durch den Einsatz vorhandener Verkehrsbeeinflussungssysteme ein Zustand erreicht werden kann, bei dem Nutzergleichgewicht und Systemoptimum nahezu deckungsgleich ist. Das Potenzial ist dabei als die Menge des Reisezeit- und Kraftstoffaufwands definiert, die durch eine optimierte Routen- und Abfahrtszeitwahl erreicht werden kann. Die größten Potentiale zur Reduktion der Fahrzeugstunden und des Kraftstoffverbrauchs durch räumliche Verlagerung wurden für die Spitzenstunden erreicht. Dort hat auch die heutige Verkehrsinformation den größten Nutzen im Vergleich zum Zustand ohne Information.

3.6 Ableitung von Handlungsempfehlungen

Die Kenntnis von Routen und die Entscheidungen und Beweggründe zur Routenwahl sind Aspekte, die nicht nur den individuellen Verkehrsteilnehmer, sondern auch die Betreiber von Verkehrssystemen betreffen.

Ziel des abschließenden Arbeitspakets ist es, die gesammelten Erkenntnisse zu den Wirkungszusammenhängen von Verkehrsbeeinflussungssystemen so aufzubereiten, dass eine direkte Übernahme in einschlägige Regelwerke möglich wird. Es werden Handlungsempfehlungen zum effektiven und abgestimmten Einsatz von

Verkehrsbeeinflussungssystemen erarbeitet und anhand von Beispielen erläutert. Sie werden so aufgebaut, dass sie nicht nur die Betreibersicht beleuchten, sondern auch Hinweise zu individuellen Informationen über ein Navigationssystem geben.

Die umfassenden empirischen und simulativen Untersuchungen zur Identifizierung der Wirkungszusammenhänge von Verkehrsinformationen und Lenkungsmaßnahmen auf individueller wie kollektiver Ebene liefern die Grundlage zur Ableitung von Empfehlungen für einen abgestimmten und wirkungsvollen Einsatz.

Auch wenn die Untersuchungen im Raum München stattfinden, wird darauf geachtet, allgemeingültige und übertragbare Ergebnisse und Hinweise zu formulieren. Es werden Handlungsalternativen für das Verkehrsmanagement abgeleitet, die die räumlichen Gegebenheiten (Alternativrouten, Umfeld), die verkehrlichen Zustände, sowie Umweltwirkungen einbeziehen, so dass ein effektives sowie effizientes Verkehrsmanagement resultiert.

Erkenntnisse aus anderen Projekten wie MOBINET, Dmotion und Arrive, die die technischen und organisatorischen Aspekte des Verkehrsmanagements fokussieren, werden genutzt und um die differenzierte Kenntnis über die individuellen Entscheidungsabläufe bei der Routenwahl, die in AP4 ermittelt werden, vertieft. Zusammen mit den in AP5 bestimmten Wirkungspotenzialen von Verkehrsbeeinflussungssystemen können dadurch Empfehlungen gegeben werden, wie kollektive und individuelle Maßnahmen kombiniert und abgestimmt eingesetzt werden sollten. Da der gesamte Wirkungsprozess analysiert ist, können Aussagen zu Befolgungsraten, Verlagerungspotenzialen und bevorzugten Leitstrategien gemacht werden, die neben den verkehrlichen Aspekten auch Umweltaspekte durch Betrachtung des Kraftstoffverbrauchs und der Fahrzeugkilometer und –stunden berücksichtigen.

Die Universität Stuttgart war an folgenden Aufgaben beteiligt:

- Übersicht über Verkehrsbeeinflussungssysteme (Unterstützung TUM-VT): Erarbeiten einer Übersicht über unterschiedliche Verkehrsbeeinflussungs- und informationssysteme, Herstellen der Verbindung zu bestehenden Regelwerken und bereits erfolgten prototypischen Umsetzungen im Rahmen von Forschungsarbeiten
- Darstellung der Wirkungszusammenhänge (Unterstützung TUM-VT): Darstellung der Wirkungszusammenhänge und der Wirkungstiefe der einzelnen Maßnahmen und Maßnahmenkombinationen
- Bewertung der Maßnahmen und –kombinationen (Unterstützung TUM-VT): Definition eines Bewertungsschemas, Beurteilung der Maßnahmen anhand des Schemas

- Ableitung von Empfehlungen (Unterstützung TUM-VT): Empfehlungen zum kombiniertem und abgestimmtem Einsatz kollektiver und individueller Maßnahmen, Erläuterung der Empfehlungen anhand von Beispielen, Durchführung eines Expertenworkshops zur Spiegelung der Empfehlungen an den Praxiserfordernissen

Ergebnisse dieses Arbeitspakets finden sich im Einzelbericht der Technischen Universität München (vgl. Busch et al. [13]).

4 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertungsplan

Im Rahmen des Projekts *wiki* wurden von der Universität Stuttgart folgende wesentliche Beiträge geleistet und Ergebnisse erzielt:

Die Universität Stuttgart lieferte für das Testfeld eine umfassende Prüfung der Qualität heute verfügbarer Verkehrslageinformationen. Dazu wurden unterschiedliche Aspekte wie die Verlässlichkeit und Prognosequalität als auch die Verständlichkeit einzelner Informationsmedien und deren Nutzung aus verschiedensten Datenquellen analysiert. Detaillierte Untersuchungen zu Wechselwirkung der Informationsmedien, im Besonderen der Steigerung des Befolgungsgrades von Routenempfehlungen durch kombinierten Einsatz von individueller Navigation und straßenseitigen Wechselwegweisungen, konnten nachgewiesen werden.

In *wiki* wurden nicht nur die objektiven Verkehrsverhältnisse untersucht, sondern auch subjektive Entscheidungsgründe der Routenwahl behandelt. Die dazu notwendige Betrachtung des Individuums wurde durch Rekrutierung und Befragung einer umfassenden Anzahl von 300 Probanden erreicht. Auf Basis der empirischen Daten konnten die Wirkungen von Verkehrsbeeinflussungssystemen auf die Routen- und Abfahrtszeitwahl ermittelt werden. Die Analysen zeigten statistisch signifikante Zusammenhänge zwischen zur Verfügung stehenden Verkehrsinformationen und dem Verhalten der Autofahrer. Dabei zeigte sich, dass die Darstellung der aktuellen Verkehrslage über eine Level-of-Service-Karte und die Verkehrsmeldungen im Verkehrsfunk das Routenwahlverhalten maßgebend beeinflussen. Für das Abfahrtszeitwahlverhalten der Berufspendler wurde ein starker Zusammenhang zwischen der möglichen Reisezeitersparnis und der Bereitschaft zum Wechseln der üblichen Abfahrtszeitwahl ermittelt.

Die Optimierungspotenziale von Verkehrsbeeinflussungssystemen konnten für den gesamten Untersuchungsraum anhand eines makroskopischen Verkehrsmodells berechnet werden. Obwohl sich Verkehrsinformationen nur bedingt zur systemoptimalen Verlagerung der Verkehrsnachfrage eignen, konnte ein nennenswertes Potential zur Reduktion der netzweiten Fahrzeugstunden und des Kraftstoffverbrauch vor allem in den Spitzenstunden identifiziert werden.

5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Ergebnisse und Veröffentlichungen im Themenfeld Routenwahl aus anderen Projekten (z. B. Do-IT) wurden gesichtet und in *wiki* berücksichtigt. Die Literaturanalyse hat gezeigt, dass im Bearbeitungszeitraum keine vergleichbaren Untersuchungen bei anderen Stellen durchgeführt wurden.

6 Veröffentlichungen von Projektergebnissen

6.1 Partner übergreifende Veröffentlichungen

Fachzeitschriften:

Busch, F., Friedrich, M., Schiller, C., Bakircioglu, I., Belzner, H., Fiedler, I., Mandir, E., Koller-Matschke, I., Pillat, J., Riess, S., Snethlage, M., Winkler, C., Zimmermann, F. (2012): Wirkungen individueller und kollektiver Verkehrsinformation in Straßennetzen, *Straßenverkehrstechnik, Kirschbaum Verlag*, Bonn (in Vorbereitung).

Konferenzberichte:

Mandir, E., Pillat, J., Friedrich, M., Schiller, C., (2010): Choice Set Generation and Model Identification for Route Choice Using GPS-Data from Smart Phones, *Proceedings of ITM (3. Innovations in Travel Modeling),* Tempe, Arizona, USA.

Datenarchive:

wiki Daten (2012a): Metadaten zur Routenwahl- und Fahrverhalten von Pkw-Pendlern, *DLR Clearingstelle Verkehr, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Verkehrsforschung,* Berlin.

wiki Daten (2012b): Metadaten zur Routenwahl- und Fahrverhalten von Pkw-Pendlern, GESIS - Leibniz-Institut für Sozialwissenschaften, Abteilung Datenarchiv für Sozialwissenschaften, Köln.

6.2 Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik

Fachzeitschriften:

Pillat, J., Mandir, E., Friedrich, M. (2011): Dynamic Choice Set Generation based on a Combination of GPS Trajectories and Stated Preference Data, *Transportation Research Record, Heft 2231, S. 18-26.*

Konferenzberichte:

Pillat, J., Mandir, E. (2011): Choice Set Generierung für makroskopische Umlegung in großen Netzen für PTV Vision VISUM, *Tagungsbericht des 17. PTV Vision Anwenderseminars*, Dresden.

Mandir, E. (2011): Potenziale von Verkehrsinformation zur Beeinflussung der Routen- und Abfahrtszeitwahl, in: Institut für Straßen- und Verkehrswesen (ed.), *Kurzfassungen der Vorträge zum 11. Fachkolloquium Straße und Verkehr 2011*, Stuttgart.

Mandir, E., Pillat, J. (2011): Choice set generation for macroscopic traffic assignment in large-scale networks for PTV Vision VISUM, *Proceedings of 21. PTV Vision User Group Meeting,* New York City, USA.

Pillat, J. Mandir, E., Friedrich, M. (2011): Dynamic Choice Set Generation based on a Combination of GPS Trajectories and Stated Preference Data, *TRB 90th Annual Meeting Compendium of Papers, Transportation Research Board of the National Academies,* Washington, D.C., USA.

Friedrich, M., Mandir, E., Pillat, J. (2010): Observing and Modeling Route Choice in Road Networks, *Proceedings of the 5th International Symposium "Networks for Mobility" (FOVUS),* Stuttgart.

Mandir, E. (2009): Wirkungen individueller und kollektiver Verkehrsbeeinflussung, *Tagungsband zur Universitätstagung Verkehrswesen 2009*, Schwerte.

Sonstiges:

Mandir, E. (2009): Einfluss von Verkehrsinformation auf die Routenwahl im Pendlerverkehr, Kurzfassung des Vortrags beim Fortbildungsseminar des VSVI Baden-Württemberg am 14.05.2009, Mitgliederzeitschrift des VSVI Baden-Württemberg, S. 16.

Mandir, E. (2010): Makroskopische Modellierung der Verkehrsinformation in Routen- und Abfahrtszeitwahl, *Seminar Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme, ETH*, Zürich.

7 Glossar

7.1 Netzobjekte

Knoten

Punkt in einem Verkehrsnetz, i.d.R. eine Kreuzung oder Einmündung.

Strecke

Verknüpfung zweier Knoten.

Streckenzug

Folge von Strecken auf derselben Straße.

7.2 Routen und Ortsveränderungen

Startknoten

Bezeichnung für einen beliebigen Knoten im Verkehrsnetz, an dem eine Netz-Relation beginnt.

Endknoten

Bezeichnung für einen beliebigen Knoten im Verkehrsnetz, an dem eine Netz-Relation endet.

Quellknoten

Knoten, an dem eine Ortsveränderung einer Person beginnt (Quelladresse).

Zielknoten

Knoten, an dem eine Ortsveränderung einer Person endet (Zieladresse).

Relation

Eine Relation ist eine gerichtete Verknüpfung zweier Orte (Knoten) im Verkehrsnetz.

Quelle-Ziel-Relation

Eine Relation, die an einem Quellknoten beginnt und an einem Zielknoten endet. Quelle- und Zielknoten sind Orte, an denen die Verkehrsteilnehmer ihre Aktivitäten durchführen. Quell- und Zielknoten werden durch eine oder mehrere Personenfahrtrouten verbunden.

Netz-Relation

Eine Relation zwischen einem beliebigen Start- und einem beliebigen Endknoten im Verkehrsnetz, z. B. zwischen zwei Autobahnkreuzen. Start- und Endknoten werden durch eine oder mehrere Netzrouten verbunden.

(Personen-) Fahrt

Ortsveränderung einer Person von einem Quellknoten zu einem Zielknoten.

Route

Oberbegriff für eine Folge von Knoten und Strecken in einem Verkehrsnetz.

Personenfahrtroute

Route einer Person von einem Quellknoten zu einem Zielknoten als Ergebnis einer Wahlentscheidung.

Teilpersonenfahrtroute

Teil einer Personenfahrtroute.

Netzroute

Route zwischen zwei beliebigen Knoten im Verkehrsnetz.

Teilnetzroute

Teil einer Netzroute.

Alternativroute

Eine Möglichkeit innerhalb einer Menge von Alternativen. Alternativrouten kann es sowohl für Quelle-Ziel-Relationen als auch für Netz-Relationen geben.

Netzmasche

Eine Netzmasche beschreibt eine Menge von Netzelementen (Knoten und Strecken) und ist einem Start- und Zielknoten zugeordnet. Die enthaltenen Netzelemente beschreiben dabei einen geschlossenen Pfad. Innerhalb einer Netzmasche gibt es genau zwei Netzrouten, die sich nur am Anfangs- und Endknoten der Masche treffen.

Trajektorie

Weg-Zeit-Diagramm für eine Route und einen Abfahrtszeitpunkt.

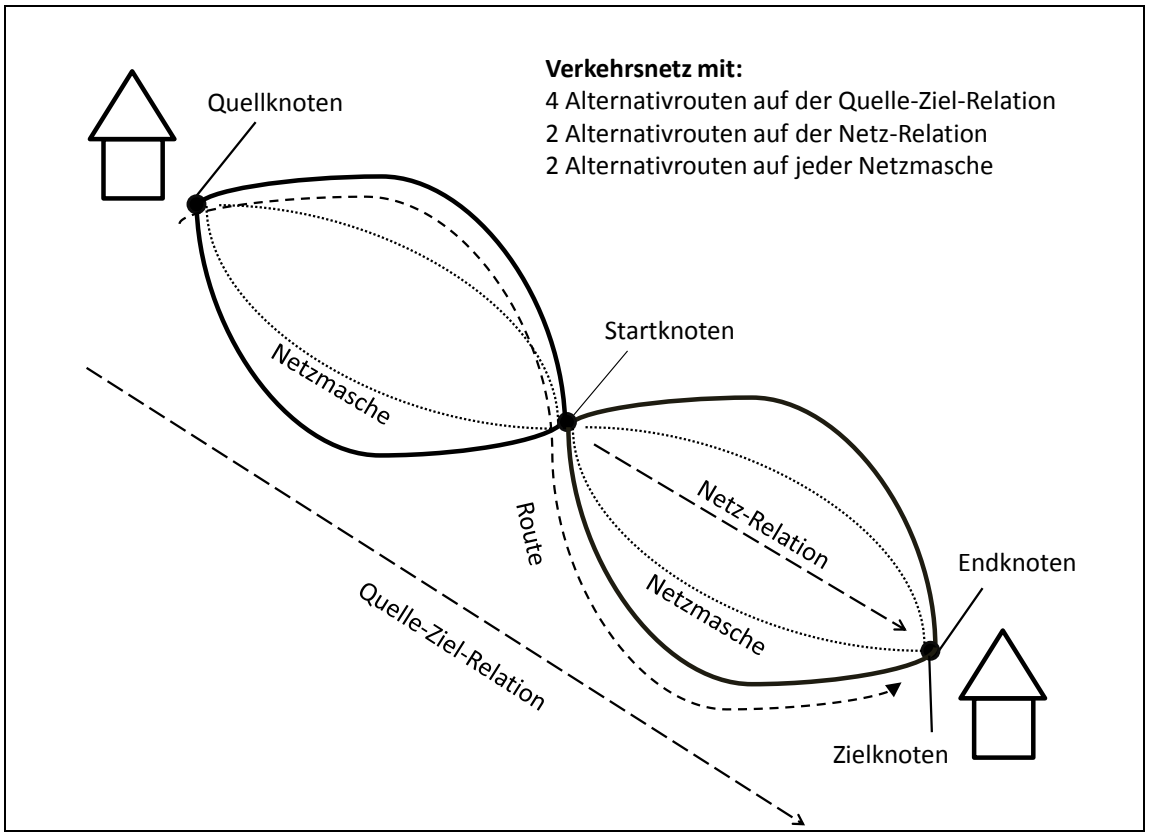


Bild 86: Netzobjekte, Routen, Ortsveränderungen

7.3 Maßnahmen und Strategien

Situation

Verkehrszustand zu einem Zeitpunkt. Der Verkehrszustand umfasst die Verkehrsnachfrage (Fahrtwünsche), das Verkehrsangebot (verfügbare Kapazitäten, Berücksichtigung von Kapazitätsänderungen aufgrund von Störungen) und die Netzbelastungen bzw. Netzauslastungen zu einem bestimmten Zeitpunkt.

Maßnahme

Möglichkeit zur Veränderung des Ist-Zustands, z. B. Ändern des Schaltzustands einer Wechselwegweisung.

Strategie

Vorab festgelegtes Handlungskonzept für das Ergreifen von Maßnahmen (-bündeln) zur Verbesserung einer definierten Ausgangssituation.

Szenario

Kombination aus einer Situation und einer für diese Situation entwickelten Strategie.

7.4 Dynamische Daten

FCD

Floating Car Daten (FCD) bezeichnen im Gegensatz zu lokalen Verkehrsdaten aus stationären Detektoren einen kontinuierlichen Zeit-Weg-Verlauf eines Fahrzeugs im Verkehrsstrom. Das Fahrzeug agiert dabei als mobiler Detektor und liefert Positionskoordinaten und Geschwindigkeiten zu festen Zeitpunkten, z. B. jede Sekunde.

Kfz-GPS

Fahrzeugbezogene GPS-Trajektorien aus der Erfassung im Pkw.

Personen-GPS

Personenbezogene GPS-Trajektorien aus der Erfassung mit portablen GPS-Loggern.

Schaltzustand

Zustand der Wechselwegweisungs- und Streckenbeeinflussungsanlagen.

Lokale Detektordaten

Lokale Detektoren (Induktionsschleifen, etc.) messen die Verkehrsstärke und die Geschwindigkeit eines Streckenquerschnitts. Sie werden kontinuierlich und automatisch erfasst.

Meldungsdaten

Verkehrsmeldungen aus unterschiedlichen Quellen: Freiwillige Staumelder, Polizei, Verkehrswarndienst, ADAC etc. Sie werden unregelmäßig und nicht automatisch erfasst.

Verkehrslagedaten

Verkehrslagedaten werden durch Fusion der Daten aus einer oder mehrerer Datenquellen generiert. Kenngrößen der Verkehrslage können auf eine Strecke (LOS, Reisezeit, Verlustzeit, Verkehrsstärke, Staulänge) oder eine Relation (LOS, Reisezeit, Verlustzeit, Staulänge) bezogen sein.

Verkehrsinformationsdaten

Informationen über die Verkehrslage, die an die Verkehrsteilnehmer weiter gegeben werden (Verkehrsfunk, RDS-TMC, Internet, straßenseitige Informationen).

Attributierung

Die Versorgung von Netzobjekten (Strecke, Streckenzug, Route) mit Attributen wird als Attributierung bezeichnet. Dabei können die Attribute statisch, d.h. über die Zeit unveränderlich sein (Länge, Fahrzeit im unbelasteten Netz etc.), oder dynamisch, d.h. über die Zeit veränderlich sein (aktuelle Fahrzeit, Level-of-Service etc.).

7.5 Netze

INTREST-Datenmodell

Georeferenzierungs- und Austauschplattform für verkehrsrelevante Daten.

Lokalisierungsnetz

INTREST-Feinnetz mit vollständigem Verkehrsnetz aus Navteq Roadelementen zur Lokalisierung der GPS-Daten.

Projektnetz

Reduktion des Lokalisierungsnetzes. Strategisches bzw. maßnahmenrelevantes Verkehrsnetz. Datenhaltung der Verkehrslagedaten.

Vereinfachtes Projektnetz

Abstraktion des Projektnetzes ohne aufgelöste Knotenpunkte. Geringer Detailierungsgrad zur Routensuche und Erzeugung des Alternativensatzes.

Map-Matching

Mit Map Matching wird ein Verfahren bezeichnet, welches die durch eine Ortung gemessene Position eines Objektes mit den Ortsinformationen einer digitalen Karte abgleicht.

7.6 Entscheidungsmodelle

Aufwand

Der Aufwand entspricht den generalisierten Kosten und lässt sich als Kombination einzelner Kenngrößen formulieren.

Nutzenfunktion

Die Nutzenfunktion beschreibt den Zusammenhang und Einfluss der einzelnen Kenngrößen über die Funktion V = f(x1, x2). V entspricht dem messbaren (deterministischen, objektiven) Anteil des subjektiven Nutzens U.

Bewertungsfunktion

Die Bewertungsfunktion B(·) beschreibt die abnehmende Bereitschaft zur Auswahl einer Alternative, wenn der Aufwand zunimmt und modelliert die subjektive Einschätzung der Aufwände der Verkehrsteilnehmer. Beispiele sind die e-Funktion, die EVA-Funktion etc. Die Bewertungsfunktion bildet den stochastischen Anteil ε des subjektiven Nutzens U ab. Verlauf und Varianz der Bewertungsfunktion bestimmen das Korrelationsmuster der Kenngrößen.

Bewerteter Nutzen

Der subjektive Nutzen U ergibt sich als Bewertung der Nutzenfunktion V, z. B. U = e(V).

Wahrscheinlichkeit einer Alternative

Die Wahrscheinlichkeit der Wahl einer Alternative j innerhalb einer Menge zur Auswahl stehender Alternativen ermittelt sich aus dem Verhältnis des Nutzens Uj zu den Nutzen aller anderen Alternativen, z. B.:

$$P_j = e^{V_j} / \sum_i e^{Vi}$$

Elastizität

Die Elastizität ist ein Zahlenwert, der angibt, wie stark sich die abhängige Größe ändert, wenn sich die unabhängige Größe ändert und stellt demnach die „Empfindlichkeit“ der Verkehrsteilnehmer bezüglich einer Aufwandsänderung dar.

8 Literatur

[1] Abdel-Aty, M. A., Kitamura, R., Jovanis, P. P. (1997): Using stated preference data for studying the effect of advanced traffic information on drivers' route choice, *Transportation Research C*, Band 5, Heft 1, S. 39-50.

[2] Axhausen, K.W., Sammer, G. (2001): Stated responses: Überblick, Grenzen, Möglichkeiten, *Internationales Verkehrswesen*, Heft 5/2001, S. 274-278, Deutscher Verkehrs-Verlag, Hamburg.

[3] Axhausen, K.W. (2003): Befragungsmethoden für hypothetische Märkte. *In: Steierwald, G., Kuhne, H.-D., Vogt, W. (Hrsg.): Stadtverkehrsplanung*, S. 133 – 139. Arbeitsbericht 199, Verkehrs- und Raumplanung, Zürich.

[4] Azevedo, J., Costa, M.S., Madeira, J.S., Martins, E.V. (1993): An algorithm for the ranking of shortest paths, *European Journal of Operational Research*, Heft 1993/1, S. 97-106., Elsevier, London, U.K..

[5] Balz, W. (1995): Wirkungen kollektiver Verkehrsbeeinflussungsanlagen, *Straßenverkehrstechnik*, Heft, 7/1995, S. 301 - 307, Kirschbaum Verlag, Bonn.

[6] BASt. (2008): Erhebungskonzepte für eine Analyse der Nutzung von alternativen Routen in übergeordneten Straßennetzen, *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen - Unterreihe Verkehrstechnik*, Heft V 169, nw-Verlag, Bergisch Gladbach.

[7] Beckmann, K. J., Serwill, D., Wehmeier, T. (2001): Verkehrstechnische Effekte kollektiver und individueller Zielführung, *Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik" des Bundesministerium für Verkehr-, Bau- und Wohnungswesen*, Heft 815, Bonn.

[8] Beckmann, K. J., Serwill, D., Wehmeier, T. (2001): Aspekte zum Zusammenwirken von Zielführungssystemen und Netzbeeinflussungsanlagen, *Straßenverkehrstechnik*, Heft 4/2001, S. 168 - 177, Kirschbaum Verlag, Bonn.

[9] Ben-Akiva, M., Bergman, M., Daly, A., Ramaswamy, R. (1984): Modeling inter urban route choice behavior, *Ninth International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, VNU Science Press, Utrecht, Niederlande.

[10] BMVBS (2006): Leitfaden Verkehrstelematik, Hinweise zur Planung und Nutzung in Kommunen und Kreisen, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin.

[11] BMVBS (1997): RWVA - Richtlinien für Wechselverkehrszeichenanlagen an Bundesfernstraßen, Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Straßenbau. Verkehrsblattverlag, Dortmund.

[12] Brilon W., Schnabel, W. (2003): Bewertung der Qualität des Verkehrsablaufs auf Hauptverkehrsstraßen, *Straßenverkehrstechnik*, Heft 1/2003, S. 21 - 26, Kirschbaum Verlag, Bonn.

[13] Busch, F., Fiedler, I. (2012): *wiki* – Wirkungen von individueller und kollektiver ontrip Verkehrsbeeinflussung auf den Verkehr in Ballungsräumen, *Schlussbericht der Technischen Universität München*, Forschungsbericht Förderkennzeichen 19 P 7048 F unterstützt und gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), verfügbar bei der Technischen Informationsbibliothek und Universitätsbibliothek Hannover.

[14] de la Barra, T., Perez, B., Anez, J. (1993): Multidimensional path search and assignment, *Proceedings of the 21st PTRC Summer Meeting*, Manchester, UK.

[15] Cascetta, E. (2001): Transportation Systems Engineering: Theory and Methods, Kluver Academic Publishers*,* Dordrecht, Niederlande.

[16] Conquest, L., Spyridakis, J., Haselkorn, M., Barfield, W. (1993): The effect of Motorist Information on Commuter Behavior: Classification of Drivers into Commuter Groups, *Transportation Research C*, Band 1, Heft 2, S. 183-201.

[17] Dijkstra, E.W. (1959): A note on two problems in connection with graphs, *Numerische Mathematik*, Heft 1/1959, S. 269-271, Springer Verlag, Berlin.

[18] Dugge, B. (2006): Ein simultanes Erzeugungs-, Verteilungs-, Aufteilungs- und Routenwahlmodell, *Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsplanung und Straßenverkehr*, Technische Universität Dresden, Heft 9/2006, Dresden.

[19] FGSV (2005), Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) Ausgabe 2001, Fassung 2005, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV Verlag, Köln.

[20] Friedrich, M., Lohmiller, J.(2011): Zeitabhängige Verbindungsqualität in Straßennetzen, *Schlussbericht zum FE 18.0019/2007 (BASt)*, Institut für Verkehr und Stadtbauwesen, Technische Universität Braunschweig, Lehrstuhl Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik, Universität Stuttgart.

[21] Friedrich, M., Hofsäss, I., Wekeck, S. (2001): Timetable-based transit assignment using branch and bound, *Transportation Research Record*, Heft 1752, S. 100-107, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C..

[22] Galster, M. (2009): Modellierung von Anbindungen in Verkehrsplanungsmodellen, *Dissertation, Veröffentlichungen aus dem Institut für Straßen- und Verkehrswesen*, Universität Stuttgart, Heft 40, Stuttgart.

[23] Hu, T., Mahmassani, H. S. (1997): Day-to-day evolution of network flows under real-time information and reactive signal control, *Transportation Research C*, Band 5, Heft 1, S. 51-69.

[24] Infas, DLR (2008): Mobilität in Tabellen – Webanwendung zur Auswertung der Erhebung Mobilität in Deutschland 2008 (MiD 2008), im Auftrag des Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn und Berlin.

[25] Kerner, B. S. (2009): Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control, The Long Road to Three-Phase Theory, Springer Verlag, Berlin.

[26] Koller-Matschke, I., Belzner, H. (2012): *wiki* – Wirkungen von individueller und kollektiver ontrip Verkehrsbeeinflussung auf den Verkehr in Ballungsräumen, *Schlussbericht der BMW AG*, Forschungsbericht Förderkennzeichen 19 P 7048 A unterstützt und gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), verfügbar bei der Technischen Informationsbibliothek und Universitätsbibliothek Hannover.

[27] Kühne, R., Gertung, Haag, G., Hugo, J., Moosmayer, Neumann, L., Pischner, T., Schaaf, B. (1998): Auswirkungen von telematischer Beeinflussung verkehrsinfrastruktureller Kapazitäten auf die volkswirtschaftliche Rentabilität von Projekten der Bundesverkehrswegeplanung*, DLR-Interner Bericht*, Bonn, 1998.

[28] Matschke, I. (2007): Einfluss dynamischer Navigation auf das Verkehrsgeschehen in städtischen Straßennetzen,. *Dissertation am Institut für Verkehrswirtschaft*, Straßenwesen und Städtebau der Leibniz Universität Hannover, Hannover.

[29] Miller, E., Mahmassani, H., Ziliaskopoulos, A. (1994): Path search techniques for transportation networks with time-dependent, stochastic arc costs, *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Humans, Information and Technology*, New York, USA.

[30] Prato, C.G., Bekhor, S. (2006): Applying branch-and-bound technique to route choice set generation, *Transportation Research Record*, Heft 1985, S. 19-28, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.

[31] Prognos AG, Keller, H. (2001): Wirkungspotentiale der Verkehrstelematik zur Verbesserung der Verkehrsinfrastruktur und Verkehrsmittelnutzung, *Schlussbericht der Prognos AG*, Forschungsbericht Förderkennzeichen 96.584/1999 im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVBS).

[32] Ramming, M.S. (2002): Network knowledge and route choice, *Ph.D. Thesis*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA.

[33] Rehborn, H., Palmer, J. (2008). ASDA/FOTO based on Kerner's three-phase traffic theory in North Rhine-Westphalia and its integration into vehicles, *in E. U. Technology (Ed.), IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, S. 186-191, Eindhoven, Niederlande.

[34] Riess, S., Immet, B. (2012): *wiki* – Wirkungen von individueller und kollektiver ontrip Verkehrsbeeinflussung auf den Verkehr in Ballungsräumen, *Schlussbericht der Autobahndirektion Südbayern*, Forschungsbericht Förderkennzeichen 19 P 7048 C unterstützt und gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), verfügbar bei der Technischen Informationsbibliothek und Universitätsbibliothek Hannover.

[35] Schiller, C., Winkler, C., Zimmermann, F. (2012): *wiki* – Wirkungen von individueller und kollektiver ontrip Verkehrsbeeinflussung auf den Verkehr in Ballungsräumen, *Schlussbericht der Technischen Universität Dresden*, Forschungsbericht Förderkennzeichen 19 P 7048 D unterstützt und gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), verfügbar bei der Technischen Informationsbibliothek und Universitätsbibliothek Hannover.

[36] Schlaich, J., Friedrich, M. (2008): Staumeldungen und Routenwahl in Autobahnnetzen, Teil 1: Analyse von Staumeldungen, *Straßenverkehrstechnik*, Heft 10/2008, S. 621 - 627, Kirschbaum Verlag, Bonn.

[37] Schlaich, J., Friedrich, M. (2008): Staumeldungen und Routenwahl in Autobahnnetzen, Teil 2: Routenwahl in Autobahnnetzen, *Straßenverkehrstechnik*, Heft 11/2008, S. 706 - 712, Kirschbaum Verlag, Bonn.

[38] Schlaich, J. (2009): Nutzung von Mobilfunkdaten für die Analyse der Routenwahl, *Dissertation, Veröffentlichungen aus dem Institut für Straßen- und Verkehrswesen*, Universität Stuttgart, Heft 42, Stuttgart.

[39] Schüssler, N., Axhausen, K.W. (2008), Processing raw data from global positioning systems without additional information, *Transportation Research Record*, Heft 2105, S. 28-36*,* Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C..

[40] Schüssler, N., Balmer, M., Axhausen, K.W. (2010), Route choice sets for very high-resolution data, *paper presented at the 89th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C..

[41] Snethlage, M., Ortgiese, M. (2012): *wiki* – Wirkungen von individueller und kollektiver ontrip Verkehrsbeeinflussung auf den Verkehr in Ballungsräumen, *Schlussbericht der PTV AG*, Forschungsbericht Förderkennzeichen 19 P 7048 E unterstützt und gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), verfügbar bei der Technischen Informationsbibliothek und Universitätsbibliothek Hannover.

[42] Statistika GmbH (2009): Durchschnittliche Fahrleistung in Kilometern pro Jahr, AXA Verkehrssicherheits-Report 2009, www.statistika.com, Stand 28.10.2010.

[43] Steinauer, B., Offermann, F., Wienert, A., Gericke, S., Feldges, M. (2001): Weiterentwicklung von Modellen zur Alternativroutensteuerung unter besonderer Berücksichtigung vermaschter Netze; *“ des Bundesministerium für Verkehr-, Bau- und Wohnungswesen*, Heft 817, Bonn.

[44] Tsavachidis, M. (2002): Modellierung und empirische Untersuchung des Routenwahlverhaltens in einem multivarianten Entscheidungskontext, *Dissertation, Schriftenreihe des Fachgebiets Verkehrstechnik und Verkehrsplanung*, Technische Universität München, München.

[45] Tsavachidis, M., Roßmann, R., Brosius, H.-B., Von Michel, A. (2000): Nutzung und Akzeptanz aktueller Verkehrsinformation – Entwicklung und Erprobung eines graphischen Verkehrsinformationsdienstes auf DAB-Basis, *MOBINET B Projektbericht*, Förderprojekt Bundesministerium für Bildung und Forschung, Bonn.

[46] Wardman, M., Bonsall, P.W., Shires, J.D. (1997): Driver response to variable message sings: a stated preference investigation, *Transportation Research Record C*, Volume 5, No. 6, S. 389 – 405., Elsevier, London, U.K.

[47] Zackor, H., Keller, H., Bogenberger, K., Lindenbach, A., Tsavachidis, M. (1999): Entwurf und Bewertung von Verkehrsinformations- und –leitsystemen unter Nutzung neuer Technologien, *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen - Unterreihe Verkehrstechnik*, Heft V 70, nw-Verlag, Bergisch Gladbach.

9 Abbildungsverzeichnis

Bild 1: Aufbau und Zusammenhang der Arbeitspakete 11
Bild 2: Route für Qualitätsanalyse der prognostizierten Reisezeit 16
Bild 3: Verteilung der Differenz aus prognostizierter (ASDA/FOTO) und gemessener (ANPR) Reisezeit 17
Bild 4: Einschätzung der Verlässlichkeit von Verkehrsinformationsmedien 19
Bild 5: Routenwahl für unterschiedliche Informationsmedien aus 3.228 Entscheidungssituationen des Stated Preference Experiments 20
Bild 6: Ablauf einer Erhebungswelle 23
Bild 7: Routenanfragen und Abrufe der LOS-Karte während der Feldphase 25
Bild 8: Übersicht über Entscheidungssituation Routenwahl 31
Bild 9: Entscheidungssituation für Verkehrszustand 1, Informationsmedium 2 32
Bild 10: Kartographische Verkehrslagedarstellung mit farblicher Darstellung des Level of Service (LOS) 33
Bild 11: Verkehrsfunk im Radio mit Angabe der Kilometer Stau und stockender Verkehr 34
Bild 12: Substitutive dWiSta-Tafel mit Angabe der Kilometer Stau und stockender Verkehr und Empfehlung einer Route 34
Bild 13: Reisezeit-Tafel mit Angabe der Reisezeiten in Minuten für bekannte Routenabschnitte 34
Bild 14: Konkrete Entscheidungssituation Abfahrtszeitwahl 37
Bild 15: Angaben zum Haushalt 41
Bild 16: Angaben zum Fahrzeug 42
Bild 17: Angaben zum Verhalten auf Arbeitsweg 44
Bild 18: Angaben zur beruflichen Tätigkeit 45
Bild 19: Angabe wöchentlicher Aktivitäten 46
Bild 20: Gesamte Wahlhäufigkeit der einzelnen Routen 48
Bild 21: SP-Experimentabhängige Qualität der Routenwahl 49
Bild 22: Probandenabhängige Qualität der Routenwahl 50
Bild 23: Aufbereitung der GPS-Trajektorien 51
Bild 24: Verlauf der Umwegigkeit und der Geschwindigkeiten einer Trajektorie 54
Bild 25: Verkehrsaufkommen differenziert nach Wochentag 55
Bild 26: Benannte und zusätzlich identifizierte Aktivitätenorte 57
Bild 27: Verkehrsaufkommen nach Aktivitätenpaaren (Wege pro Tag und Proband) 57
Bild 28: Tagesganglinien differenziert nach Aktivitätenpaaren 58
Bild 29: Tagesganglinien zwischen den Aktivitäten Wohnen und Arbeiten 59
Bild 30: Untersuchungsgebiet mit GPS-Trajektorien und Aktivitätenorten 60
Bild 31: Fahrtweiten- und Fahrtzeitenverteilung vor und nach dem Filtern 61
Bild 32: Vervollständigen der Wegeenden 64
Bild 33: Zugangsknoten an Wegeenden 65
Bild 34: Kategorien der Anbindungen in Abhängigkeit der Lage 66

Bild 35: Transformation vom Lokalisierungsnetz ins Projektnetz 67
Bild 36: Methodik zum Aufbau des Verkehrsmodells 68
Bild 37: Detaillierte Kapazitätsbetrachtung auf Autobahnen 70
Bild 38: Detaillierte Kapazitätsbetrachtung im Norden Münchens 71
Bild 39: Standstreifenfreigabe und Wechselwegweisung 71
Bild 40: Netzauflösung Validate-Netz und Projektnetz 72
Bild 41: An das Validate-Netz angepasstes Umlegungsergebnis für Morgenspitzenstunde 73
Bild 42: Anpassen der Kapazitäten und CR-Kurven 74
Bild 43: An Detektorwerte angepasstes Umlegungsergebnis für Morgenspitzenstunde, DiDo 7:00 - 8:00 Uhr 75
Bild 44: Vergleich der Geschwindigkeiten aus der Referenzverkehrslage und aus dem Projektnetz 76
Bild 45: Informiertheit der Autofahrer über heutige Verkehrssituation 80
Bild 46: Nutzung von Navigation je Fahrzweck aus Online-Befragung 83
Bild 47: Straßennetz stromabwärts der Wechselwegweisung Neufahrn 85
Bild 48: Befolgungsgrad für unterschiedliche Arten der Routenempfehlung 88
Bild 49: Befolgungsgrad in Abhängigkeit vom Informationsmedium, Auswertung der TU Dresden 89
Bild 50: Anzahl Routen auf Relationen 91
Bild 51: Anzahl Routen zwischen Wohnort und Arbeitsplatz 92
Bild 52: Befahrene und genannte Routen zwischen Wohnort und Arbeitsplatz 93
Bild 53: Methode zur Erzeugung der Alternativrouten 95
Bild 54: Vereinfachung komplexer Knotenpunkte 96
Bild 55: Kriterien für Umwegigkeit in Maschen verschiedener Größe 100
Bild 56: Ableiten der Parameter für zulässige Umwegfaktoren 101
Bild 57: Parameter für zulässige Umwegfaktoren 102
Bild 58: Beispiel Routenbaum 103
Bild 59: Rücktransformation der generierten Routen 104
Bild 60: Beispiel räumliches Choice Set 106
Bild 61: Anzahl der Routen je Relation differenziert nach Luftlinienlänge der Relation 108
Bild 62: Datenmodell der Choice Sets 109
Bild 63: Setzen der dynamischen Attribute am Beispiel Reisezeit und LOS (angelehnt an Friedrich et al. [20]) 111
Bild 64: Flexibilität der Routenwahl von Probanden auf dem morgendlichen Arbeitsweg 115
Bild 65: Hauptroutenpräferenz von Probanden auf dem morgendlichen Arbeitsweg 116
Bild 66: Gründe für das Verlassen der Hauptroute 117
Bild 67: Abfahrtszeitwahl in Abhängigkeit der Arbeitszeitmodelle der Probanden 122
Bild 68: Abfahrtszeitwahl in Abhängigkeit der vorgeschlagenen Änderung der üblichen Abfahrtszeit in Bezug zur üblichen Wunschabfahrtszeit 123

Bild 69: Abfahrtszeitwahl in Abhängigkeit der prognostizierten Reisezeitersparnis 123
Bild 70: Abfahrtszeitwahl in Abhängigkeit der Zuverlässigkeit der Prognose 124
Bild 71: Abfahrtszeitwahl in Abhängigkeit des Startpunkts der Fahrt 124
Bild 72: Modellierung der Abfahrtszeitwahl durch Zeitintervalle 127
Bild 73: Differenz des netzweiten Reisezeitaufwands zwischen NO und SO in Abhängigkeit der Reisezeitdifferenz zwischen der Haupt- und Alternativroute 136
Bild 74: Fahrzeiten im Autobahnnetz ohne Störung 137
Bild 75: Fahrzeiten im Autobahnnetz ohne Störung 137
Bild 76: Ganglinien des Gesamtverkehrsaufkommens im erweiterten Untersuchungsraum (PTV VALIDATE) nach Wochentag 138
Bild 77: Nachfragesituation mit Zielverkehrsaufkommen, DiDo 7:00-8:00 Uhr 140
Bild 78: Nachfragesituation mit Quellverkehrsaufkommen Di Do 7:00-8:00 Uhr..... 140
Bild 79: Teilnetz zur Analyse der Verkehrszustände 143
Bild 80: Wirkungen räumlicher Verlagerung der Verkehrsnachfrage als prozentuale Differenz der Fzg-H bezogen auf den tatsächlichen Zustand 144
Bild 81: Differenz der Verkehrsbelastung zwischen heutigem Zustand und theoretischem Optimum 144
Bild 82: Wirkungen räumlicher und zeitlicher Verlagerung der Verkehrsnachfrage als prozentuale Differenz der Fzg-H bezogen auf den tatsächlichen Zustand 148
Bild 83: Zeitliche Verlagerung der Verkehrsnachfrage bei perfekter Information mit Wunschabfahrtszeitpunkt zwischen 7:00 und 8:00 Uhr..... 149
Bild 84: Wirkungen räumlicher Verlagerung der Verkehrsnachfrage als prozentuale Differenz des Kraftstoffverbrauchs bezogen auf den tatsächlichen Zustand 151
Bild 85: Wirkungen räumlicher und zeitlicher Verlagerung der Verkehrsnachfrage als prozentuale Differenz des Kraftstoffverbrauchs bezogen auf den tatsächlichen Zustand 151
Bild 86: Netzobjekte, Routen, Ortsveränderungen 165
Bild 87: Übersicht über Entscheidungssituation Routenwahl 188
Bild 88: Verkehrszustand 1 (Leichte Störung auf Hauptroute des Probanden), Informationsmedium Verkehrslagedarstellung 189
Bild 89: Verkehrszustand 1 (Leichte Störung auf Hauptroute des Probanden), Informationsmedium Verkehrsfunk 189
Bild 90: Verkehrszustand 1 (Leichte Störung auf Hauptroute des Probanden), Informationsmedium dWiSta-Tafel 190
Bild 91: Verkehrszustand 1 (Leichte Störung auf Hauptroute des Probanden), Informationsmedium Reisezeit-Tafel 190
Bild 92: Verkehrszustand 2 (Störung auf Hauptroute und erster Alternativroute des Probanden), Informationsmedium Verkehrslagedarstellung 191
Bild 93: Verkehrszustand 2 (Störung auf Hauptroute und erster Alternativroute des Probanden), Informationsmedium Verkehrsfunk 191

Bild 94: Verkehrszustand 2 (Störung auf Hauptroute und erster Alternativroute des Probanden), Informationsmedium dWiSta-Tafel 192
Bild 95: Verkehrszustand 2 (Störung auf Hauptroute und erster Alternativroute des Probanden), Informationsmedium Reisezeit-Tafel 192
Bild 96: Verkehrszustand 3 (Störung auf Hauptroute und zweiter Alternativroute des Probanden), Informationsmedium Verkehrslagedarstellung 193
Bild 97: Verkehrszustand 3 (Störung auf Hauptroute und zweiter Alternativroute des Probanden), Informationsmedium Verkehrsfunk 193
Bild 98: Verkehrszustand 3 (Störung auf Hauptroute und zweiter Alternativroute des Probanden), Informationsmedium dWiSta-Tafel 194
Bild 99: Verkehrszustand 3 (Störung auf Hauptroute und zweiter Alternativroute des Probanden), Informationsmedium Reisezeit-Tafel 194

10 Tabellenverzeichnis

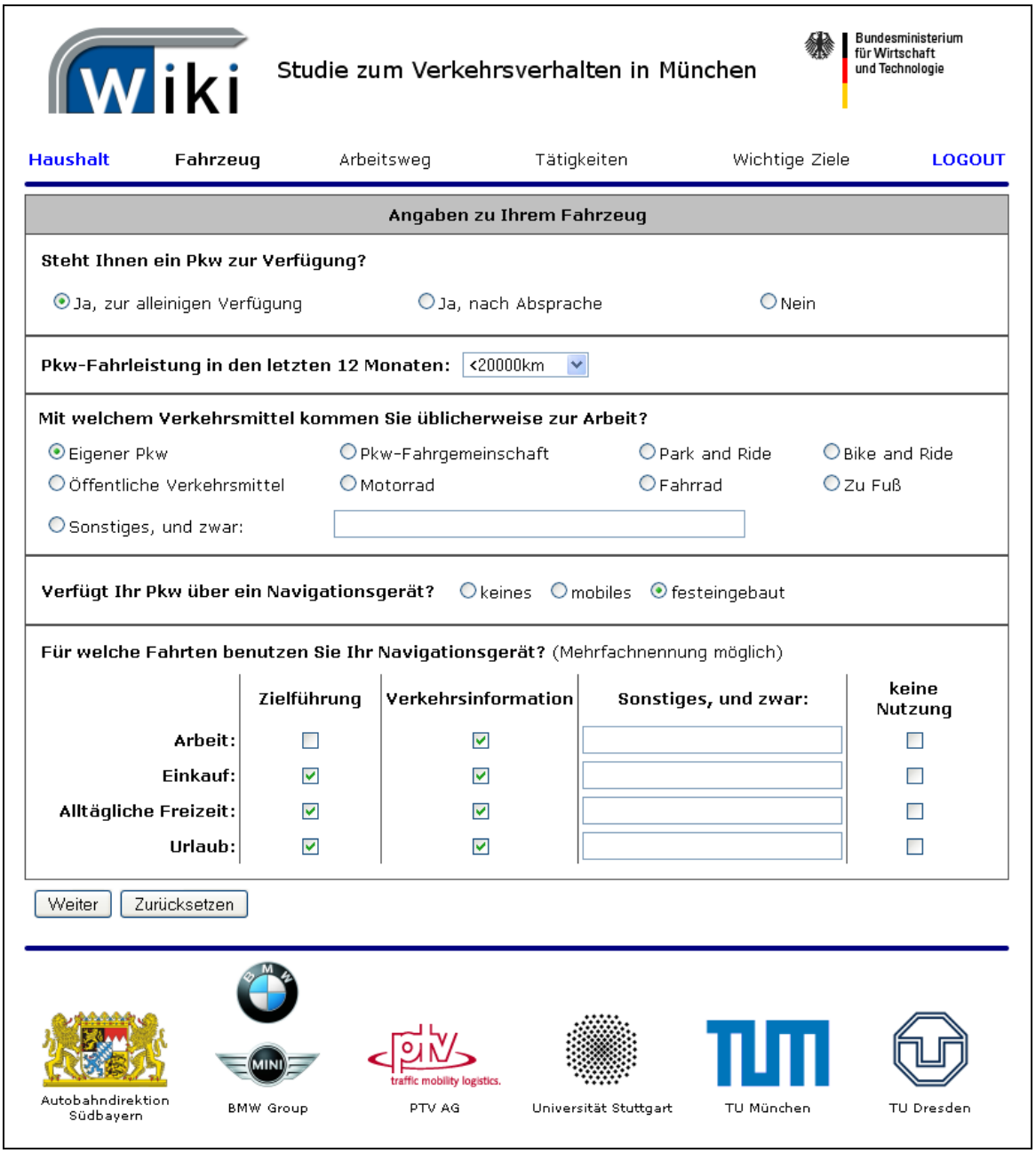
Tabelle 1: Reisezeitersparnis im Falle von Befolgung der Routenempfehlung per Navigation im Vergleich zu der aktuell schnellsten, der historisch schnellsten und der gewählten Route 18
Tabelle 2: Erfasstes GPS-Datenvolumen 25
Tabelle 3: Erfragte Attribute 26
Tabelle 4: Entscheidungssituationen für Routenwahl 30
Tabelle 5: Routengruppen für Kombination von Haupt- und Alternativrouten 35
Tabelle 6: Erhöhung der Reisezeiten für betrachtete Störungsfälle 36
Tabelle 7: Ausprägungen der Variablen für Abfahrtszeitwahl 38
Tabelle 8: Angaben zum täglichen Arbeitsweg 43
Tabelle 9: Angaben zu regelmäßigen Zielen 46
Tabelle 10: Attribute der angegebenen Routen 47
Tabelle 11: Qualität der Routenwahl in Abhängigkeit vom Verkehrszustand 48
Tabelle 12: Qualität der Routenwahl in Abhängigkeit von der Experimentengruppe 51
Tabelle 13: Wirksamkeit der Kriterien 54
Tabelle 14: Identifizierte Wege 55
Tabelle 15: Vollständigkeit der Wegeketten 59
Tabelle 16: Filterkriterien für Wege 61
Tabelle 17: Resultierendes Mengengerüst 62
Tabelle 18: Anbindungen 63
Tabelle 19: Fahrzeugkilometer nach Ergänzung der Wegeenden 65
Tabelle 20: Anteile der Fahrzeugkilometer auf Lokalisierungsnetz und Projektnetz .. 68
Tabelle 21: Enthaltene Bezirke und Anbindungen 72
Tabelle 22: Fahrten und Aktivitäten aus GPS-Daten 81
Tabelle 23: Nutzung des Navigationsdienstes für beobachtete GPS-Fahrten 82
Tabelle 24: Nutzung der Level-of-Service-Karte für beobachtete GPS-Fahrten 82
Tabelle 25: GPS-Fahrten mit Routenempfehlung durch Navigation und/oder Wechselwegweisung 87
Tabelle 26: Nutzungshäufigkeiten der Routen 91
Tabelle 27: Überdeckung befahrener und genannter Routen 93
Tabelle 28: Mengenbilanz der Projektnetzvereinfachung 98
Tabelle 29: Vergleich der Reisezeiten der Kurzwege aller Relationen zwischen originalem und vereinfachtem Projektnetz 98
Tabelle 30: Beispiel Struktur räumliches Choice Set 106
Tabelle 31: Mengengerüst und Zusammensetzung der räumlichen Choice Sets 107
Tabelle 32: Mittlere Anzahl von Routen differenziert nach Lage 108
Tabelle 33: Übersicht der Routenattribute 109
Tabelle 34: Übersicht der definierten Tageszeiten 112
Tabelle 35: Ergebnisse der dynamischen Choice Set Generierung 113

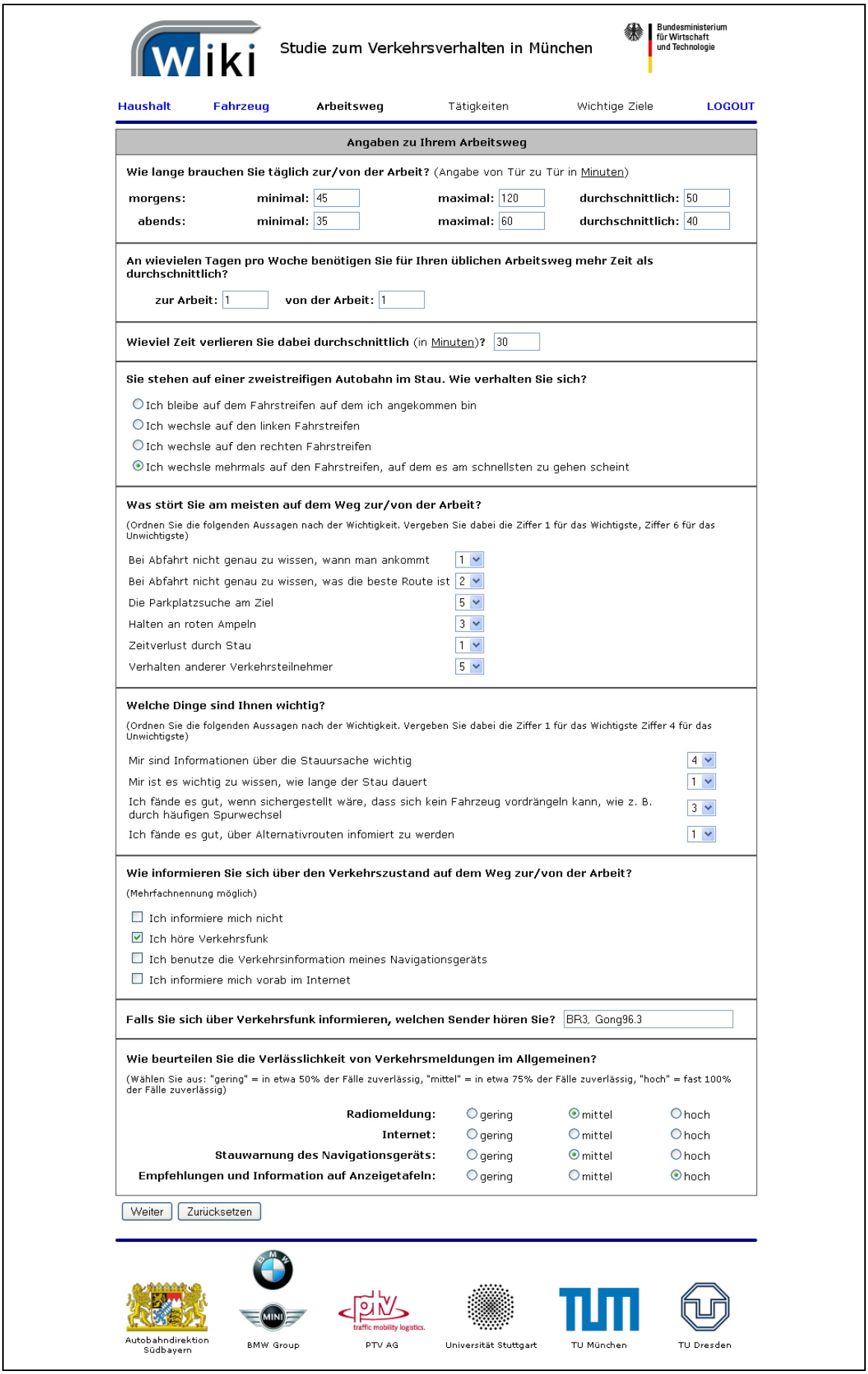
Tabelle 36: Gründe für die Wahl der Hauptroute auf dem morgendlichen Arbeitsweg 116
Tabelle 37: Vergleich der Haupt- und Alternativrouten vom Wohnort zum Arbeitsplatz 117
Tabelle 38: Typische Nachfragesituationen im Ballungsraum 139
Tabelle 39: Räumliche Verlagerung der Verkehrsnachfrage für DiDo 7-8 Uhr 145
Tabelle 40: Räumliche Verlagerung der Verkehrsnachfrage für DiDo 12-13 Uhr 145
Tabelle 41: Räumliche Verlagerung der Verkehrsnachfrage für DiDo 14-15 Uhr 146
Tabelle 42: Räumliche Verlagerung der Verkehrsnachfrage für DiDo 17-18 Uhr 146
Tabelle 43: Räumliche Verlagerung der Verkehrsnachfrage für Fr 7-8 Uhr 146
Tabelle 44: Räumliche Verlagerung der Verkehrsnachfrage für Fr 14-15 Uhr 146
Tabelle 45: Räumliche Verlagerung der Verkehrsnachfrage für Fr 17-18 Uhr 147
Tabelle 46: Räumliche Verlagerung der Verkehrsnachfrage für Fr 21-22 Uhr 147
Tabelle 47: Räumliche und zeitliche Verlagerung der Verkehrsnachfrage für DiDo 7-8 Uhr 149
Tabelle 48: Räumliche und zeitliche Verlagerung der Verkehrsnachfrage für DiDo 12-13 Uhr 149
Tabelle 49: Räumliche und zeitliche Verlagerung der Verkehrsnachfrage für DiDo 17-18 Uhr 150
Tabelle 50: Räumliche und zeitliche Verlagerung der Verkehrsnachfrage für Fr 7-8 Uhr 150

11 Anhang

11.1 Online Befragung

Wiki
Studie zum Verkehrsverhalten in München
Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
Haushalt
Fahrzeug
Arbeitsweg
Tätigkeiten
Wichtige Ziele
LOGOUT
Angaben zum Haushalt
Anzahl fahrbereiter Fahrzeuge im Haushalt:
Pkw: 2
Fahrräder: 4
Motorräder, Mofas, Mopeds: 3
Personen im Haushalt: (Tragen Sie bitte Ihre eigenen Daten als erstes ein.)
Personen-Nr
Geschlecht
Geburtsjahr
Führerschein
Zeitkarte für den öffentlichen Verkehr
1. (Ihre Daten) männlich 1956 ja nie
2. weiblich 1961 ja nie
3. männlich 1993 nein eingeschränkt
4. männlich 1996 nein eingeschränkt
5.
6.
7.
8.
Weiter
Zurücksetzen
Autobahndirektion Südbayern
BMW Group
PTV AG
traffic mobility logistics.
Universität Stuttgart
TU München
TU Dresden


wiki
Studie zum Verkehrsverhalten in München
Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
Haushalt
Fahrzeug
Arbeitsweg
Tätigkeiten
Wichtige Ziele
LOGOUT
Angaben zu Ihrem Fahrzeug
Steht Ihnen ein Pkw zur Verfügung?
Ja, zur alleinigen Verfügung
Ja, nach Absprache
Nein
Pkw-Fahrleistung in den letzten 12 Monaten:
<20000km
Mit welchem Verkehrsmittel kommen Sie üblicherweise zur Arbeit?
Eigener Pkw
Pkw-Fahrgemeinschaft
Park and Ride
Bike and Ride
Öffentliche Verkehrsmittel
Motorrad
Fahrrad
Zu Fuß
Sonstiges, und zwar:
Verfügt Ihr Pkw über ein Navigationsgerät?
keines
mobiles
festeingebaut
Für welche Fahrten benutzen Sie Ihr Navigationsgerät? (Mehrfachnennung möglich)
Zielführung
Verkehrsinformation
Sonstiges, und zwar:
keine Nutzung
Arbeit:
Einkauf:
Alltägliche Freizeit:
Urlaub:
Weiter
Zurücksetzen
Autobahndirektion Südbayern
BMW Group
PTV AG
traffic mobility logistics.
Universität Stuttgart
TU München
TU Dresden



wiki

Studie zum Verkehrsverhalten in München

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie

Haushalt | Fahrzeug | **Arbeitsweg** | Tätigkeiten | Wichtige Ziele | LOGOUT

Angaben zu Ihrem Arbeitsweg

Wie lange brauchen Sie täglich zur/von der Arbeit? (Angabe von Tür zu Tür in Minuten)

morgens:	**minimal:**	45	**maximal:**	120	**durchschnittlich:**	50
abends:	**minimal:**	35	**maximal:**	60	**durchschnittlich:**	40

An wievielen Tagen pro Woche benötigen Sie für Ihren üblichen Arbeitsweg mehr Zeit als durchschnittlich?

zur Arbeit: 1 **von der Arbeit:** 1

Wieviel Zeit verlieren Sie dabei durchschnittlich (in Minuten)**?** 30

Sie stehen auf einer zweistreifigen Autobahn im Stau. Wie verhalten Sie sich?

- ○ Ich bleibe auf dem Fahrstreifen auf dem ich angekommen bin
- ○ Ich wechsle auf den linken Fahrstreifen
- ○ Ich wechsle auf den rechten Fahrstreifen
- ◉ Ich wechsle mehrmals auf den Fahrstreifen, auf dem es am schnellsten zu gehen scheint

Was stört Sie am meisten auf dem Weg zur/von der Arbeit?

(Ordnen Sie die folgenden Aussagen nach der Wichtigkeit. Vergeben Sie dabei die Ziffer 1 für das Wichtigste, Ziffer 6 für das Unwichtigste)

Bei Abfahrt nicht genau zu wissen, wann man ankommt	1
Bei Abfahrt nicht genau zu wissen, was die beste Route ist	2
Die Parkplatzsuche am Ziel	5
Halten an roten Ampeln	3
Zeitverlust durch Stau	1
Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer	5

Welche Dinge sind Ihnen wichtig?

(Ordnen Sie die folgenden Aussagen nach der Wichtigkeit. Vergeben Sie dabei die Ziffer 1 für das Wichtigste Ziffer 4 für das Unwichtigste)

Mir sind Informationen über die Stauursache wichtig	4
Mir ist es wichtig zu wissen, wie lange der Stau dauert	1
Ich fände es gut, wenn sichergestellt wäre, dass sich kein Fahrzeug vordrängeln kann, wie z. B. durch häufigen Spurwechsel	3
Ich fände es gut, über Alternativrouten infomiert zu werden	1

Wie informieren Sie sich über den Verkehrszustand auf dem Weg zur/von der Arbeit?

(Mehrfachnennung möglich)

- ☐ Ich informiere mich nicht
- ☑ Ich höre Verkehrsfunk
- ☐ Ich benutze die Verkehrsinformation meines Navigationsgeräts
- ☐ Ich informiere mich vorab im Internet

Falls Sie sich über Verkehrsfunk informieren, welchen Sender hören Sie? BR3, Gong96.3

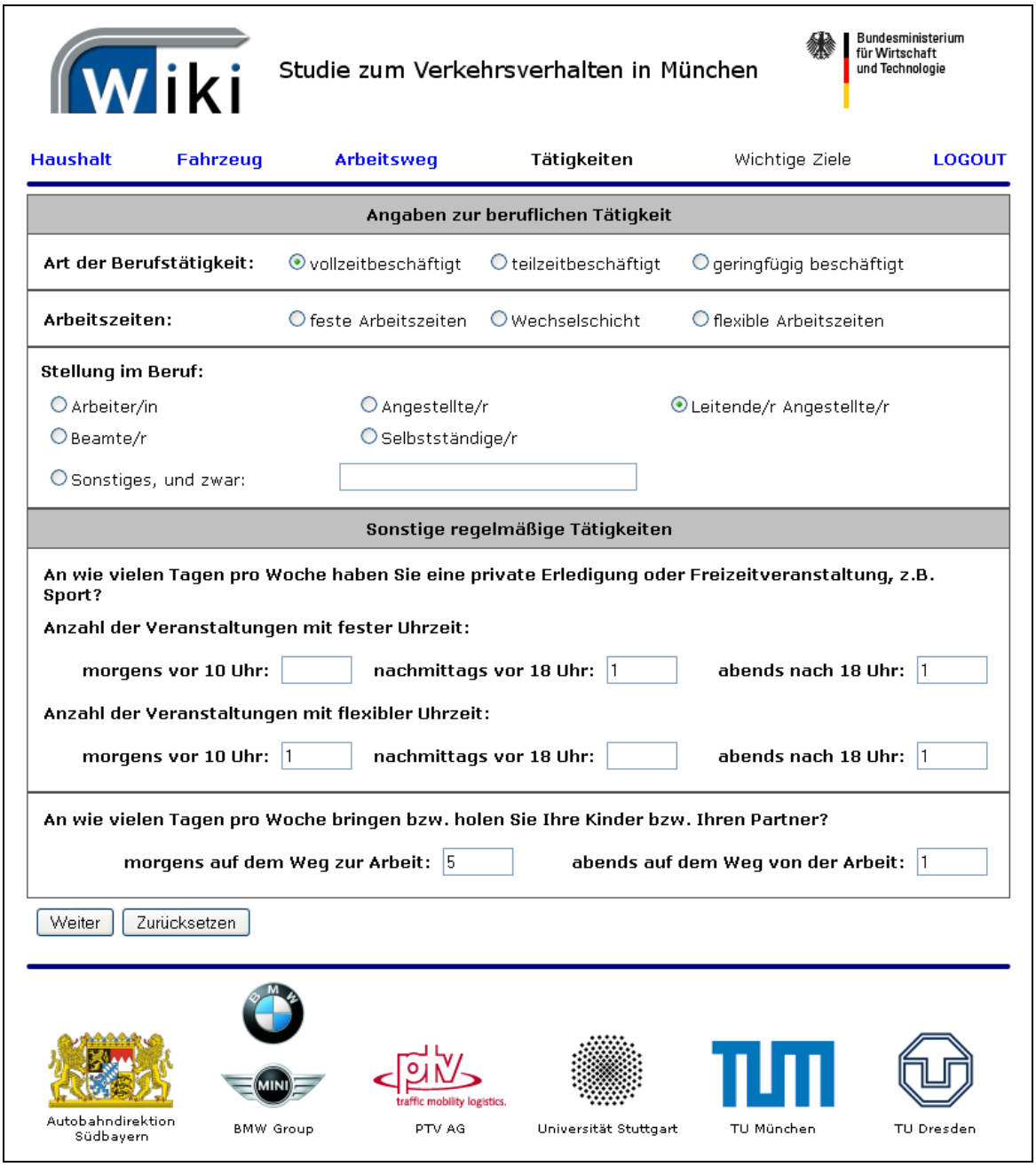
Wie beurteilen Sie die Verlässlichkeit von Verkehrsmeldungen im Allgemeinen?

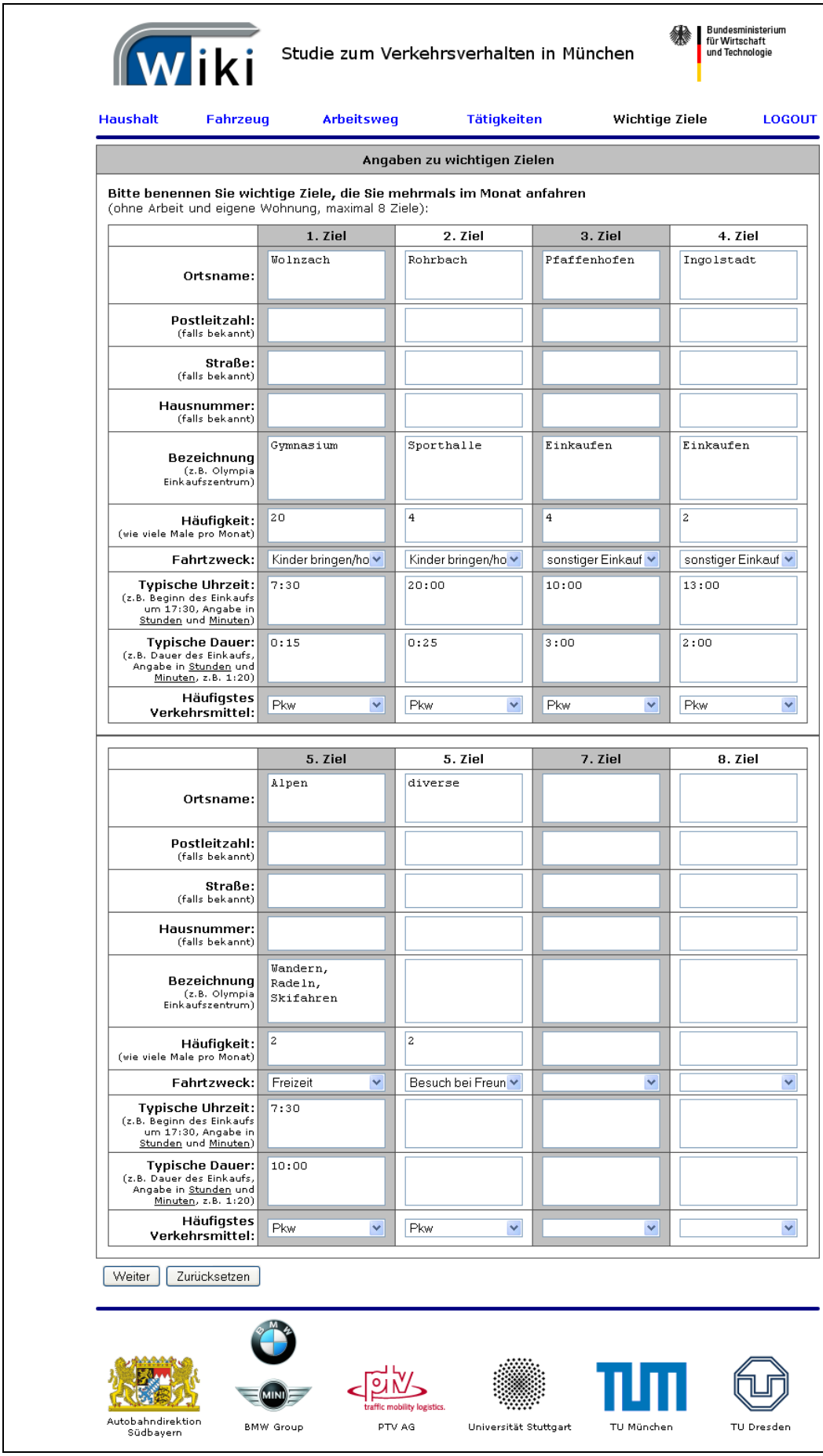
(Wählen Sie aus: "gering" = in etwa 50% der Fälle zuverlässig, "mittel" = in etwa 75% der Fälle zuverlässig, "hoch" = fast 100% der Fälle zuverlässig)

Radiomeldung:	○ gering	◉ mittel	○ hoch
Internet:	○ gering	○ mittel	○ hoch
Stauwarnung des Navigationsgeräts:	○ gering	◉ mittel	○ hoch
Empfehlungen und Information auf Anzeigetafeln:	○ gering	○ mittel	◉ hoch

Weiter | Zurücksetzen

Autobahndirektion Südbayern | BMW Group | PTV AG | Universität Stuttgart | TU München | TU Dresden


wiki
Studie zum Verkehrsverhalten in München
Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
Haushalt
Fahrzeug
Arbeitsweg
Tätigkeiten
Wichtige Ziele
LOGOUT
Angaben zur beruflichen Tätigkeit
Art der Berufstätigkeit:
vollzeitbeschäftigt
teilzeitbeschäftigt
geringfügig beschäftigt
Arbeitszeiten:
feste Arbeitszeiten
Wechselschicht
flexible Arbeitszeiten
Stellung im Beruf:
Arbeiter/in
Angestellte/r
Leitende/r Angestellte/r
Beamte/r
Selbstständige/r
Sonstiges, und zwar:
Sonstige regelmäßige Tätigkeiten
An wie vielen Tagen pro Woche haben Sie eine private Erledigung oder Freizeitveranstaltung, z.B. Sport?
Anzahl der Veranstaltungen mit fester Uhrzeit:
morgens vor 10 Uhr:
nachmittags vor 18 Uhr: 1
abends nach 18 Uhr: 1
Anzahl der Veranstaltungen mit flexibler Uhrzeit:
morgens vor 10 Uhr: 1
nachmittags vor 18 Uhr:
abends nach 18 Uhr: 1
An wie vielen Tagen pro Woche bringen bzw. holen Sie Ihre Kinder bzw. Ihren Partner?
morgens auf dem Weg zur Arbeit: 5
abends auf dem Weg von der Arbeit: 1
Weiter
Zurücksetzen
Autobahndirektion Südbayern
BMW Group
PTV AG
traffic mobility logistics.
Universität Stuttgart
TU München
TU Dresden



wiki

Studie zum Verkehrsverhalten in München

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie

Haushalt | Fahrzeug | Arbeitsweg | Tätigkeiten | Wichtige Ziele | LOGOUT

Angaben zu wichtigen Zielen

Bitte benennen Sie wichtige Ziele, die Sie mehrmals im Monat anfahren
(ohne Arbeit und eigene Wohnung, maximal 8 Ziele):

	1. Ziel	2. Ziel	3. Ziel	4. Ziel
Ortsname:	Wolnzach	Rohrbach	Pfaffenhofen	Ingolstadt
Postleitzahl: (falls bekannt)				
Straße: (falls bekannt)				
Hausnummer: (falls bekannt)				
Bezeichnung (z.B. Olympia Einkaufszentrum)	Gymnasium	Sporthalle	Einkaufen	Einkaufen
Häufigkeit: (wie viele Male pro Monat)	20	4	4	2
Fahrtzweck:	Kinder bringen/ho	Kinder bringen/ho	sonstiger Einkauf	sonstiger Einkauf
Typische Uhrzeit: (z.B. Beginn des Einkaufs um 17:30, Angabe in Stunden und Minuten)	7:30	20:00	10:00	13:00
Typische Dauer: (z.B. Dauer des Einkaufs, Angabe in Stunden und Minuten, z.B. 1:20)	0:15	0:25	3:00	2:00
Häufigstes Verkehrsmittel:	Pkw	Pkw	Pkw	Pkw

	5. Ziel	5. Ziel	7. Ziel	8. Ziel
Ortsname:	Alpen	diverse		
Postleitzahl: (falls bekannt)				
Straße: (falls bekannt)				
Hausnummer: (falls bekannt)				
Bezeichnung (z.B. Olympia Einkaufszentrum)	Wandern, Radeln, Skifahren			
Häufigkeit: (wie viele Male pro Monat)	2	2		
Fahrtzweck:	Freizeit	Besuch bei Freun		
Typische Uhrzeit: (z.B. Beginn des Einkaufs um 17:30, Angabe in Stunden und Minuten)	7:30			
Typische Dauer: (z.B. Dauer des Einkaufs, Angabe in Stunden und Minuten, z.B. 1:20)	10:00			
Häufigstes Verkehrsmittel:	Pkw	Pkw		

Weiter | Zurücksetzen

Autobahndirektion Südbayern | BMW Group | PTV AG traffic mobility logistics. | Universität Stuttgart | TU München | TU Dresden

Wiki
Studie zum Verkehrsverhalten in München
Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
Haushalt
Fahrzeug
Arbeitsweg
Tätigkeiten
Wichtige Ziele
LOGOUT
Sie sind mit Ihrem Fragebogen fertig.
Vielen herzlichen Dank für Ihre Teilnahme am Forschungsprojekt Wiki!
Ihre Mitarbeit ist für uns sehr wichtig und liefert neue Erkenntnisse über das Verkehrsverhalten. Mit Ihrer Hilfe soll die Verkehrssituation im Münchener Raum verbessert werden.
Während der Erhebung können Sie uns jederzeit gerne per
email: projekt.wiki.hotline@ptv.de
oder
telefonisch: (0800) 788 2400
erreichen.
Herzliche Grüße
Ihr Forschungsteam Wiki
Autobahndirektion Südbayern
BMW Group
PTV AG
Universität Stuttgart
TU München
TU Dresden

Wiki
Studie zum Verkehrsverhalten in München
Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
Sie sind ausgeloggt!
Zum Login
Autobahndirektion Südbayern
BMW Group
PTV AG
Universität Stuttgart
TU München
TU Dresden

11.2 Stated Preference Befragung zur Routenwahl

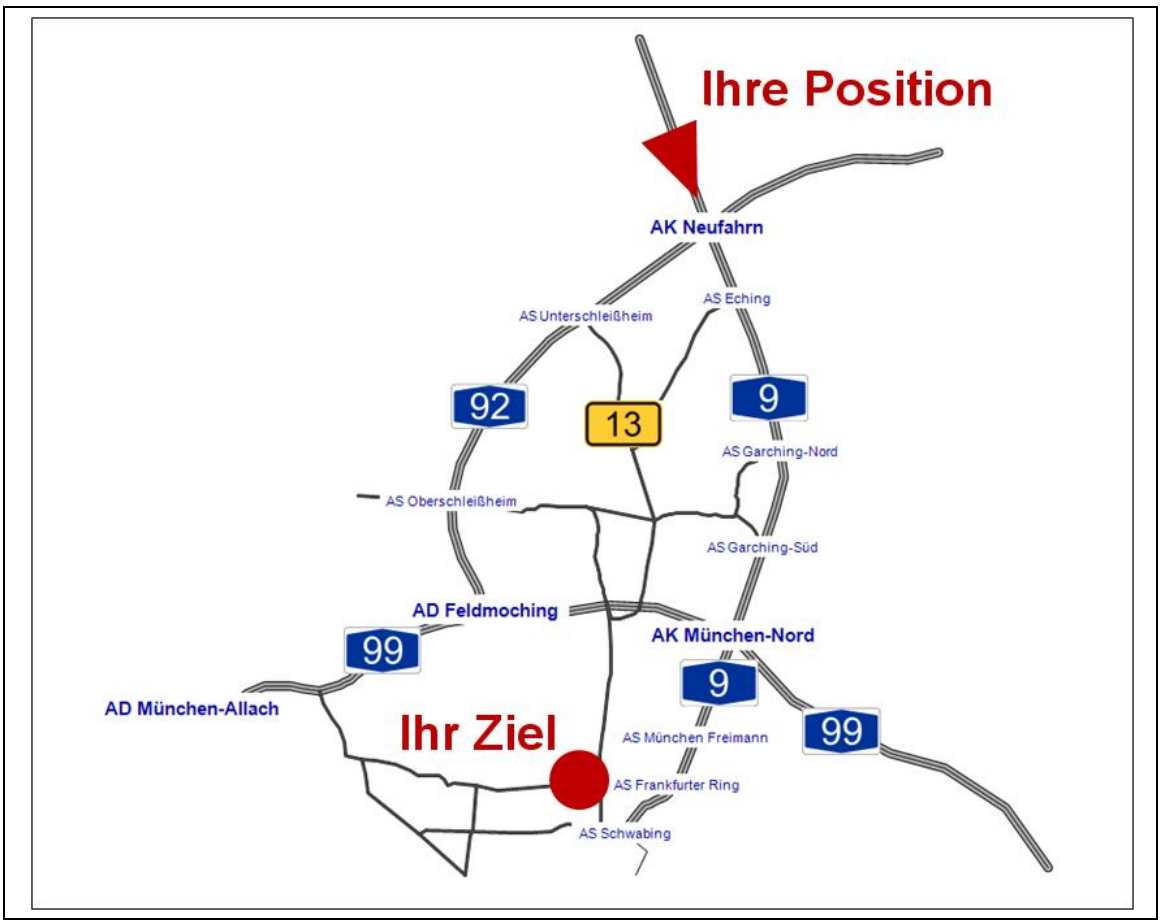


Bild 87: Übersicht über Entscheidungssituation Routenwahl

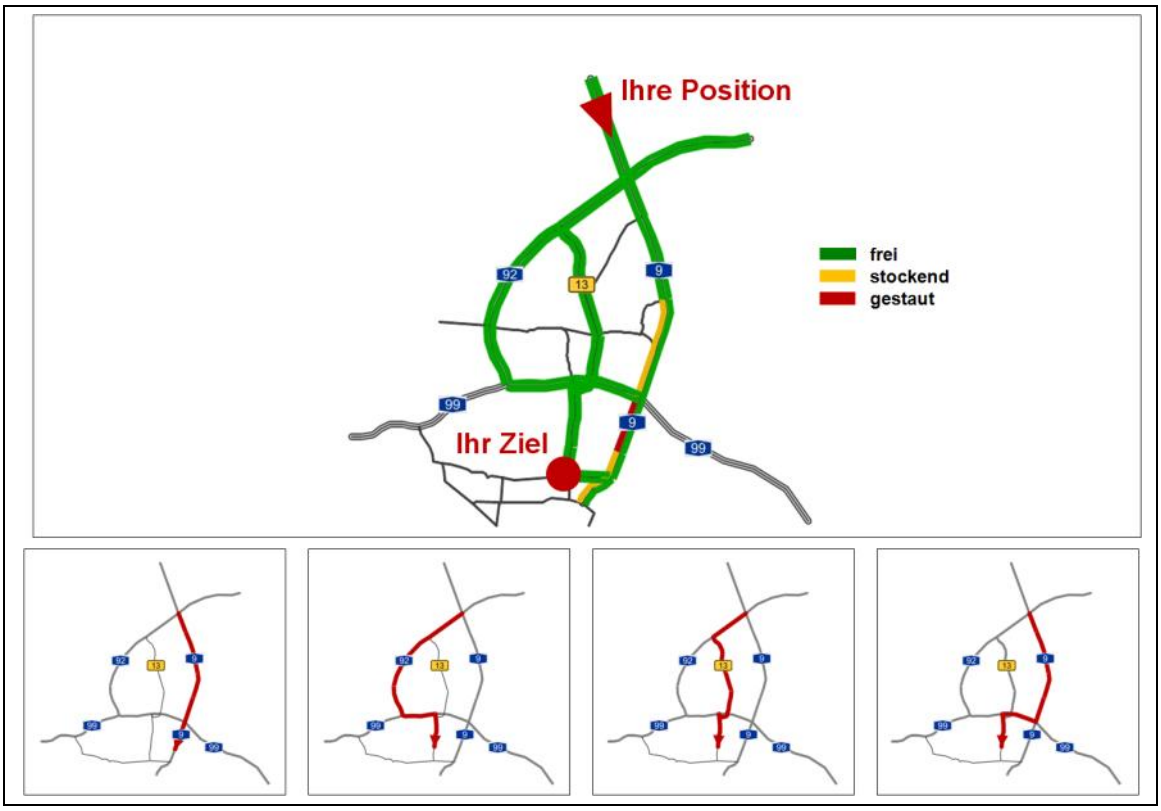


Bild 88: Verkehrszustand 1 (Leichte Störung auf Hauptroute des Probanden), Informationsmedium Verkehrslagedarstellung

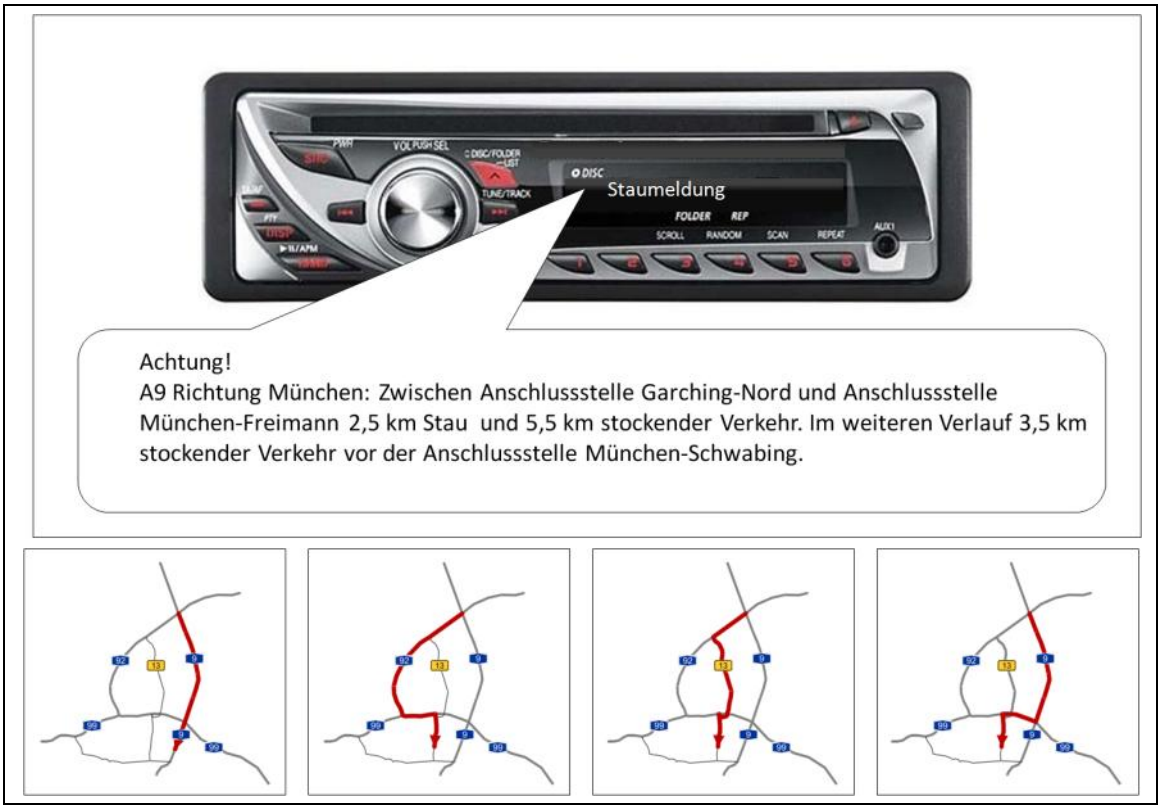


Bild 89: Verkehrszustand 1 (Leichte Störung auf Hauptroute des Probanden), Informationsmedium Verkehrsfunk

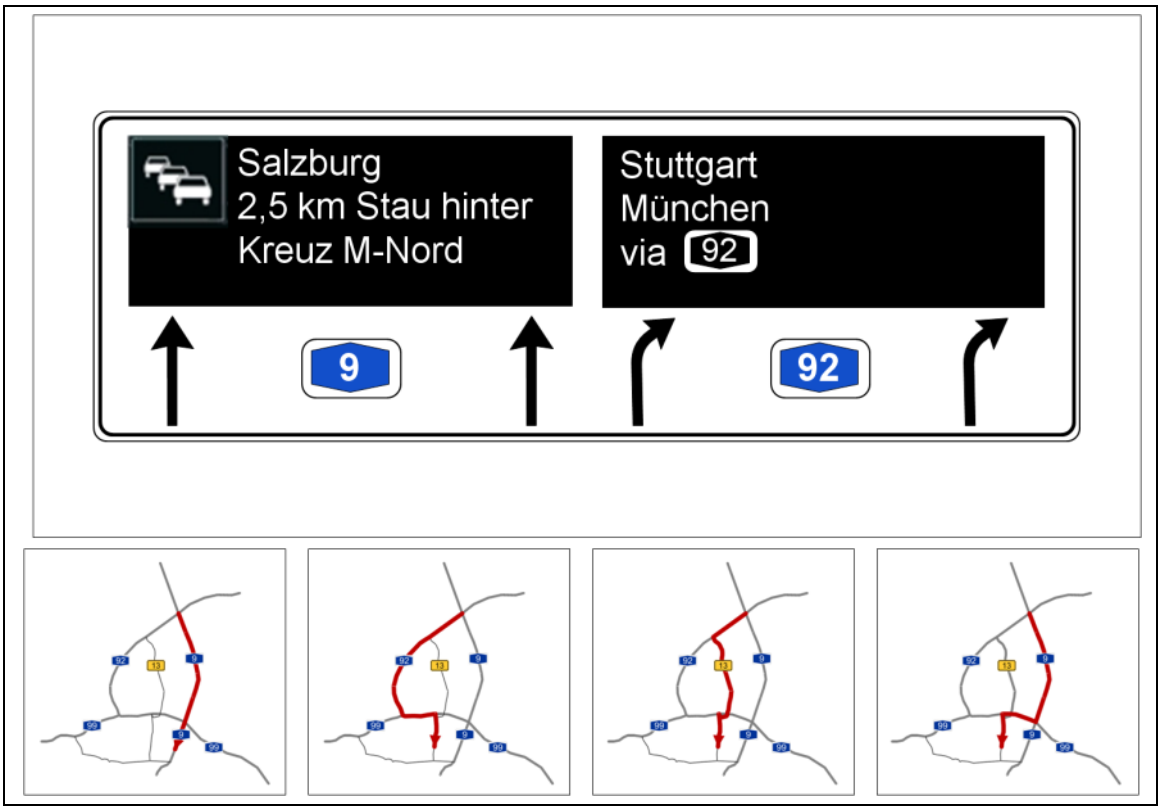


Bild 90: Verkehrszustand 1 (Leichte Störung auf Hauptroute des Probanden), Informationsmedium dWiSta-Tafel

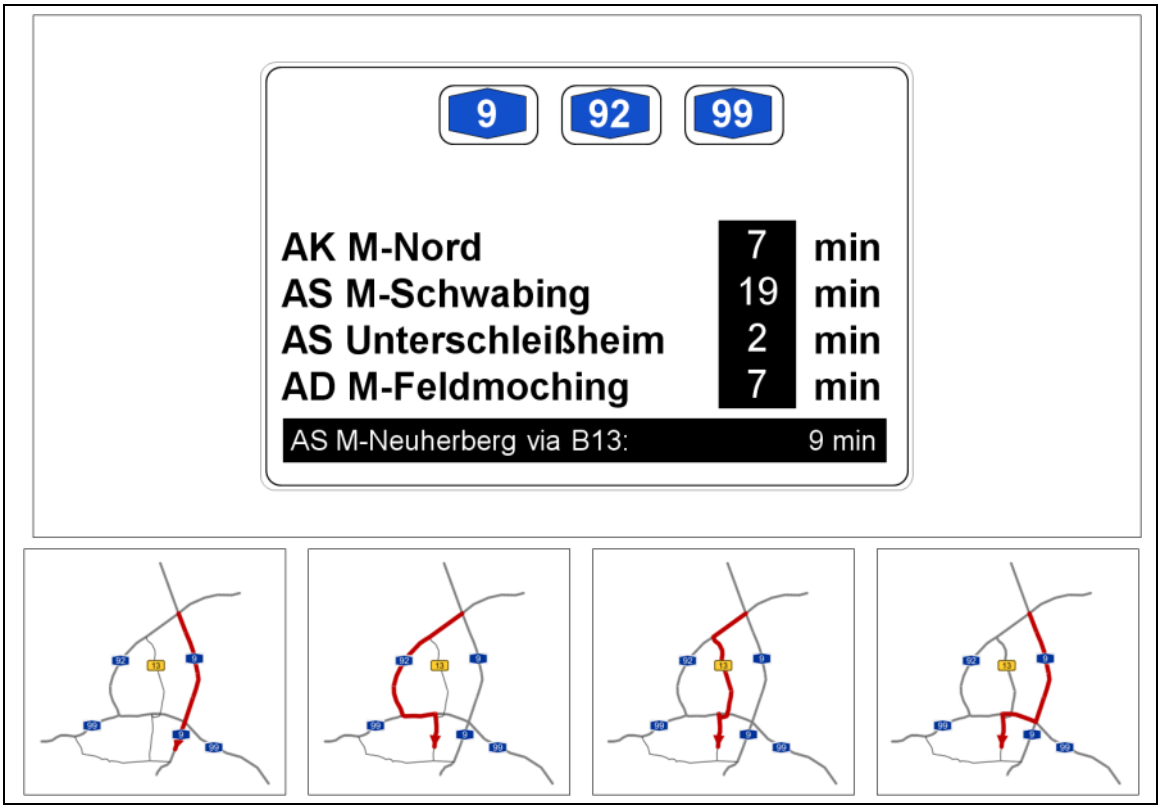


Bild 91: Verkehrszustand 1 (Leichte Störung auf Hauptroute des Probanden), Informationsmedium Reisezeit-Tafel

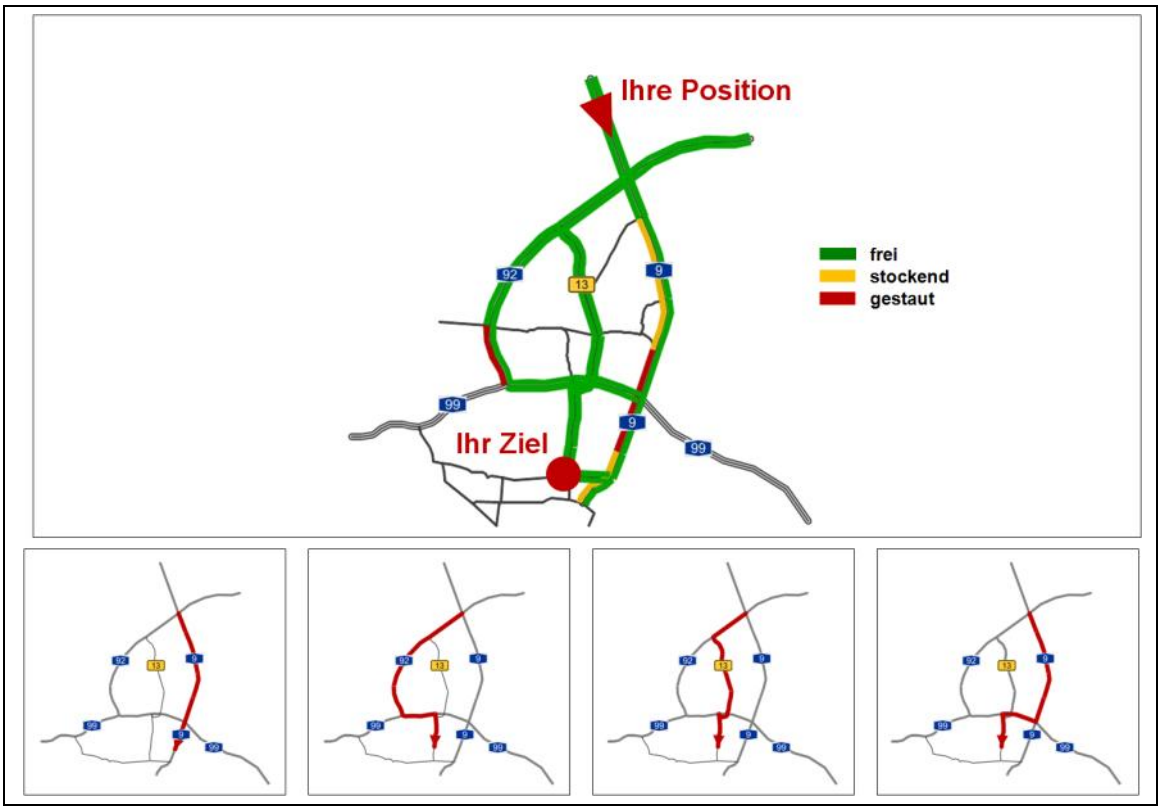


Bild 92: Verkehrszustand 2 (Störung auf Hauptroute und erster Alternativroute des Probanden), Informationsmedium Verkehrslagedarstellung

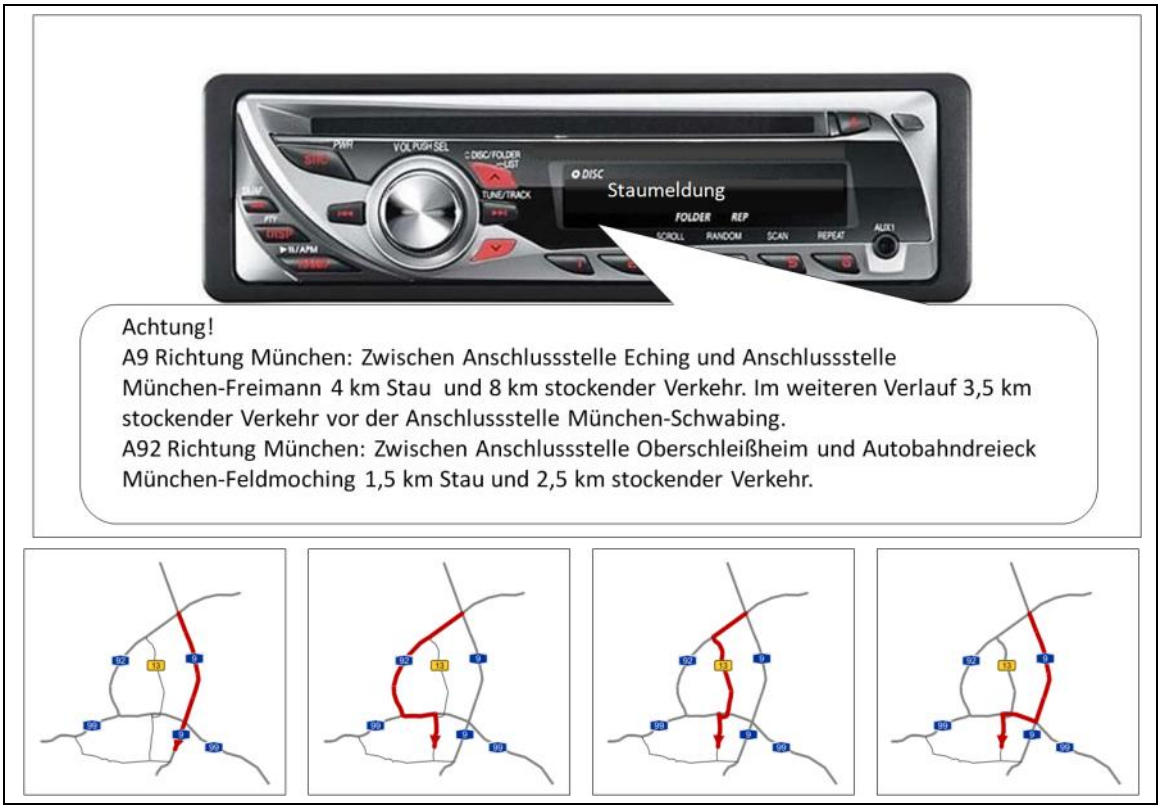


Bild 93: Verkehrszustand 2 (Störung auf Hauptroute und erster Alternativroute des Probanden), Informationsmedium Verkehrsfunk

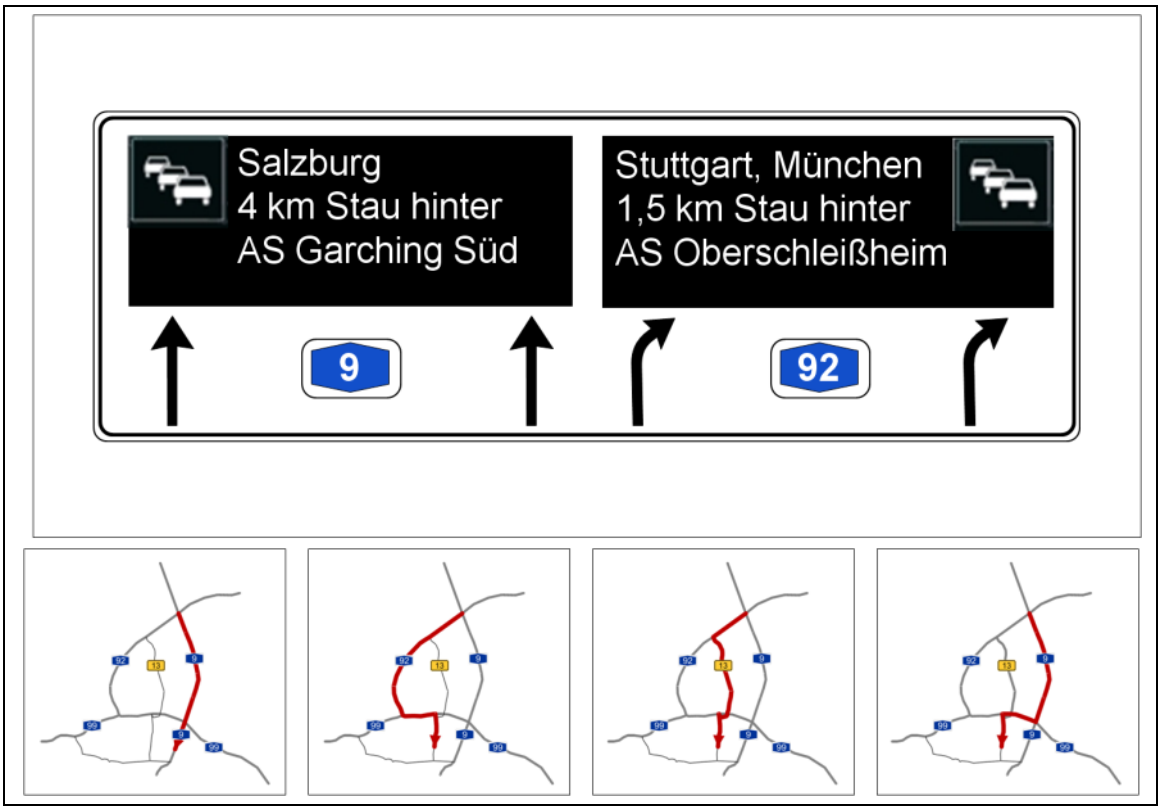


Bild 94: Verkehrszustand 2 (Störung auf Hauptroute und erster Alternativroute des Probanden), Informationsmedium dWiSta-Tafel

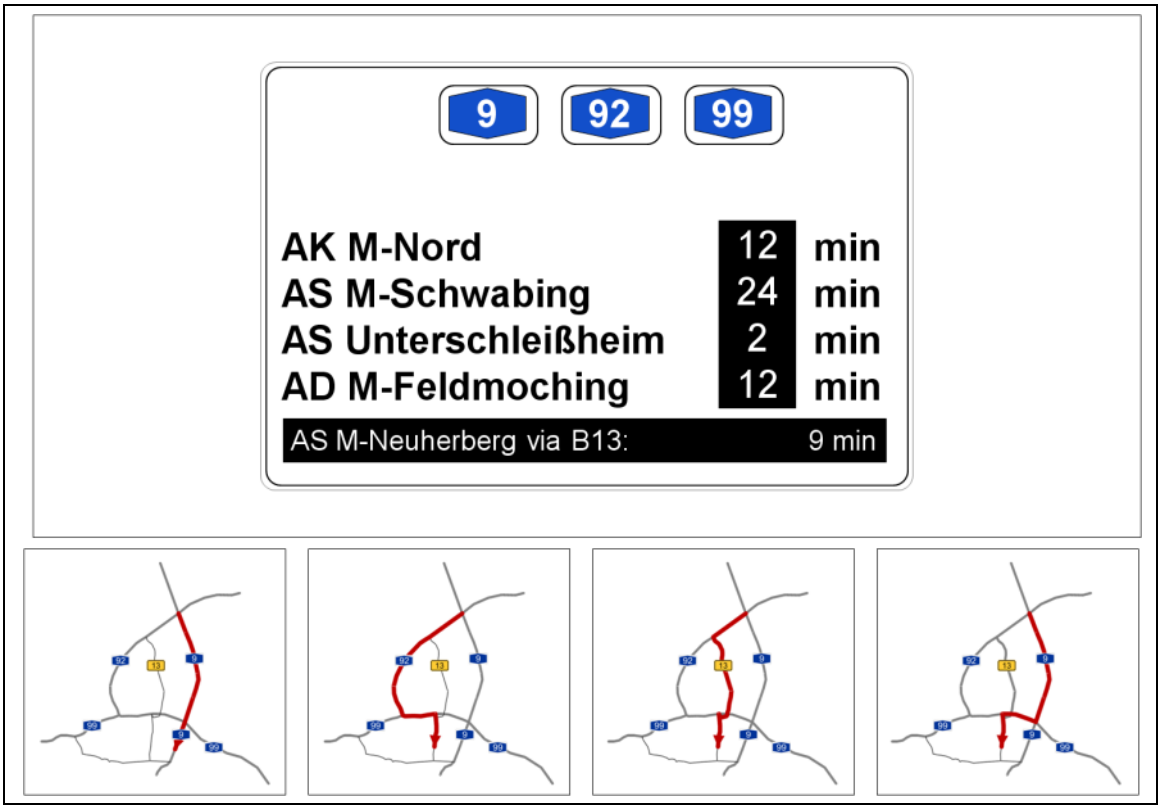


Bild 95: Verkehrszustand 2 (Störung auf Hauptroute und erster Alternativroute des Probanden), Informationsmedium Reisezeit-Tafel

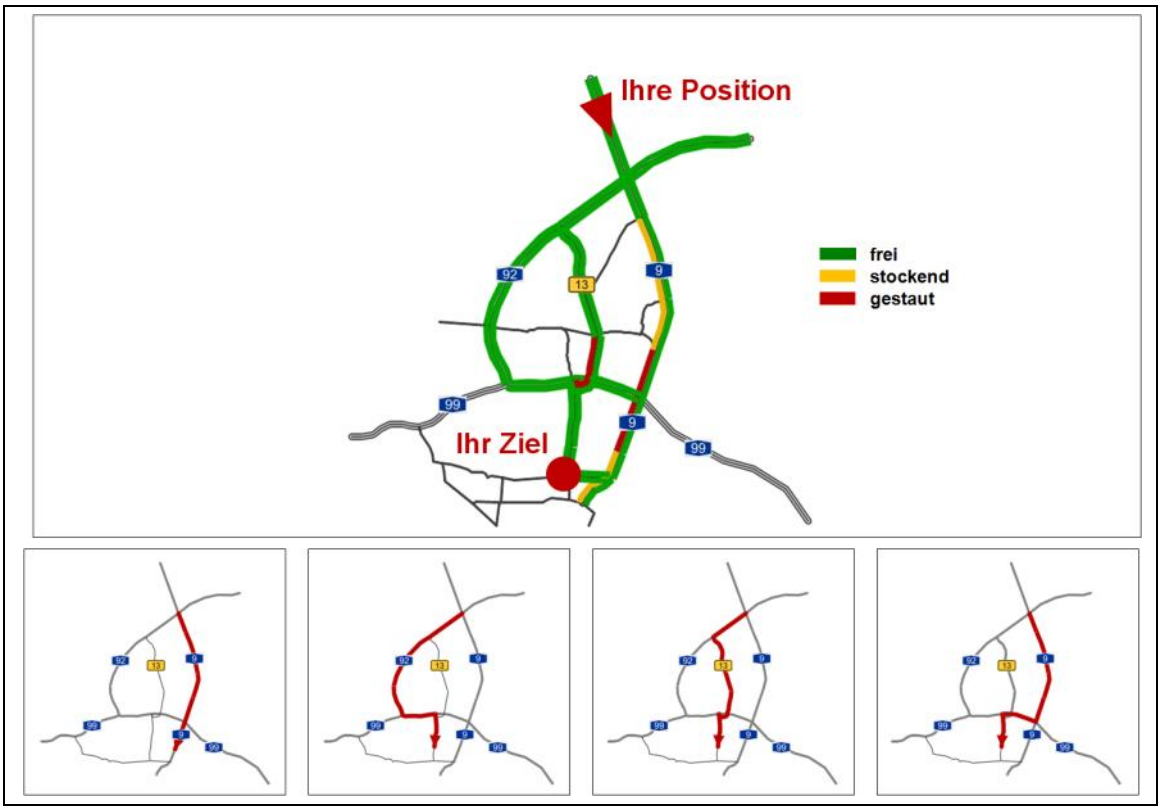


Bild 96: Verkehrszustand 3 (Störung auf Hauptroute und zweiter Alternativroute des Probanden), Informationsmedium Verkehrslagedarstellung

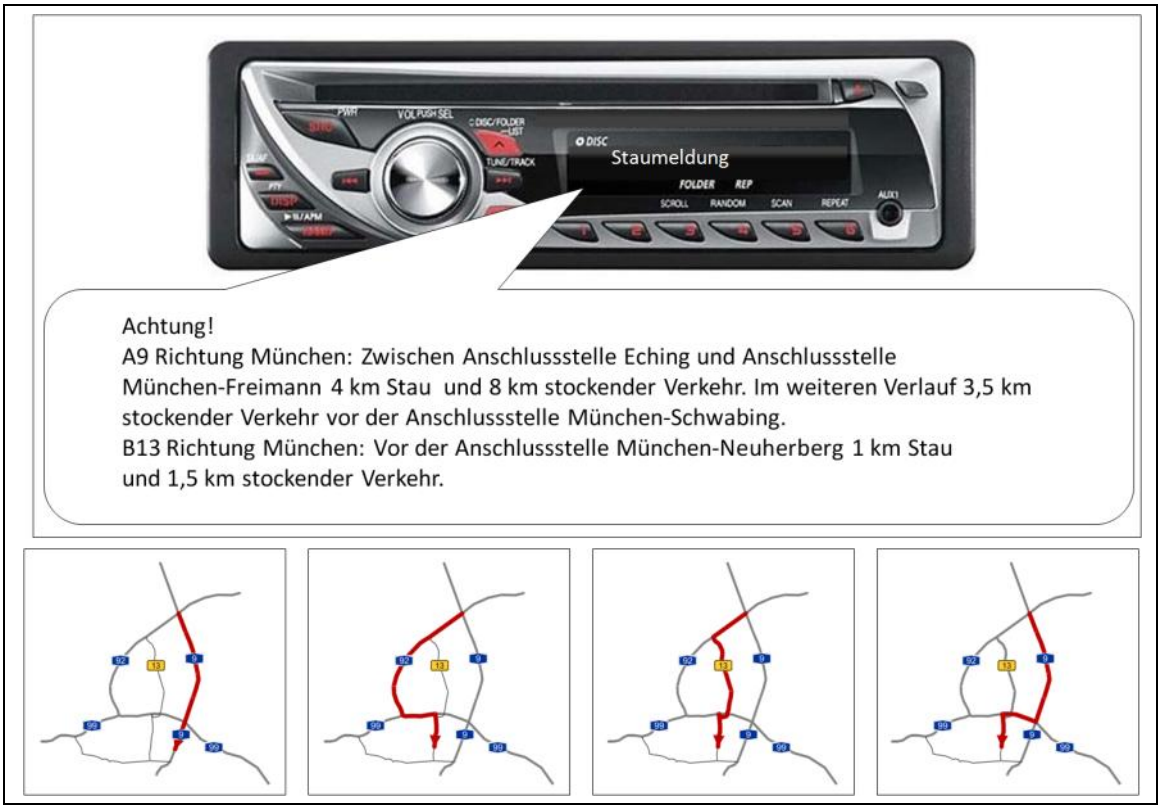


Bild 97: Verkehrszustand 3 (Störung auf Hauptroute und zweiter Alternativroute des Probanden), Informationsmedium Verkehrsfunk

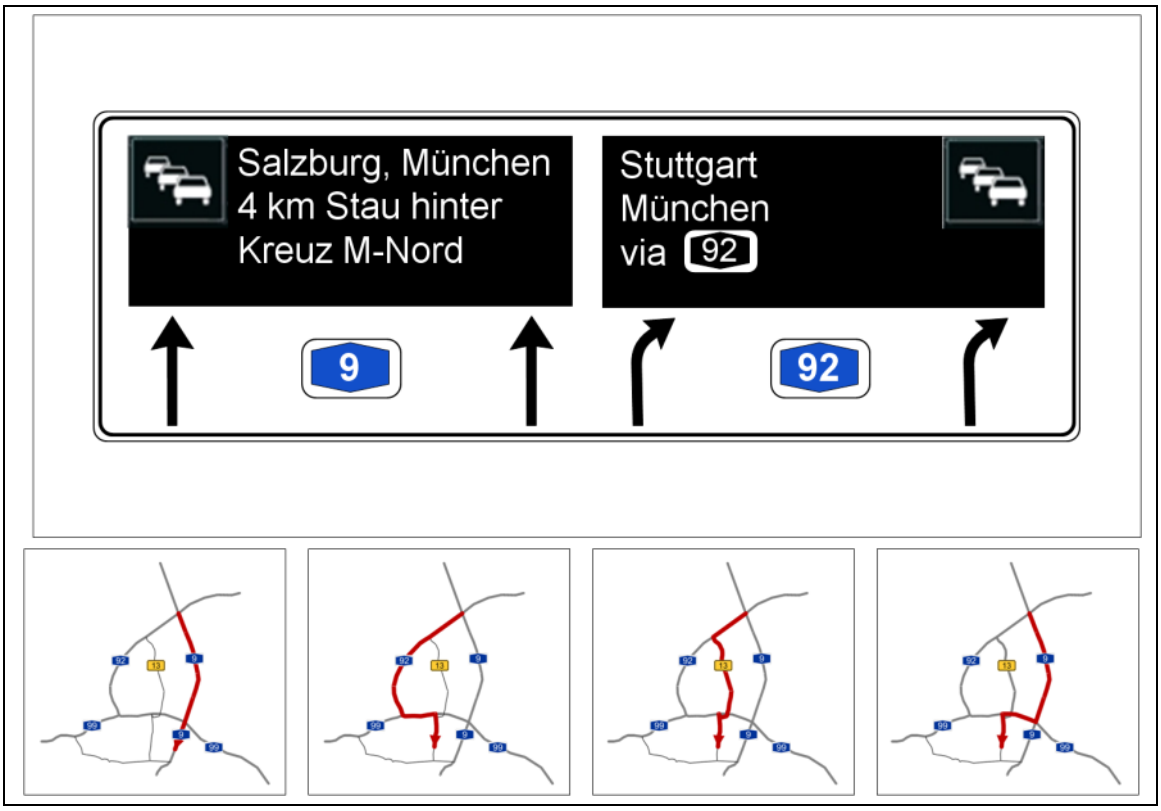


Bild 98: Verkehrszustand 3 (Störung auf Hauptroute und zweiter Alternativroute des Probanden), Informationsmedium dWiSta-Tafel

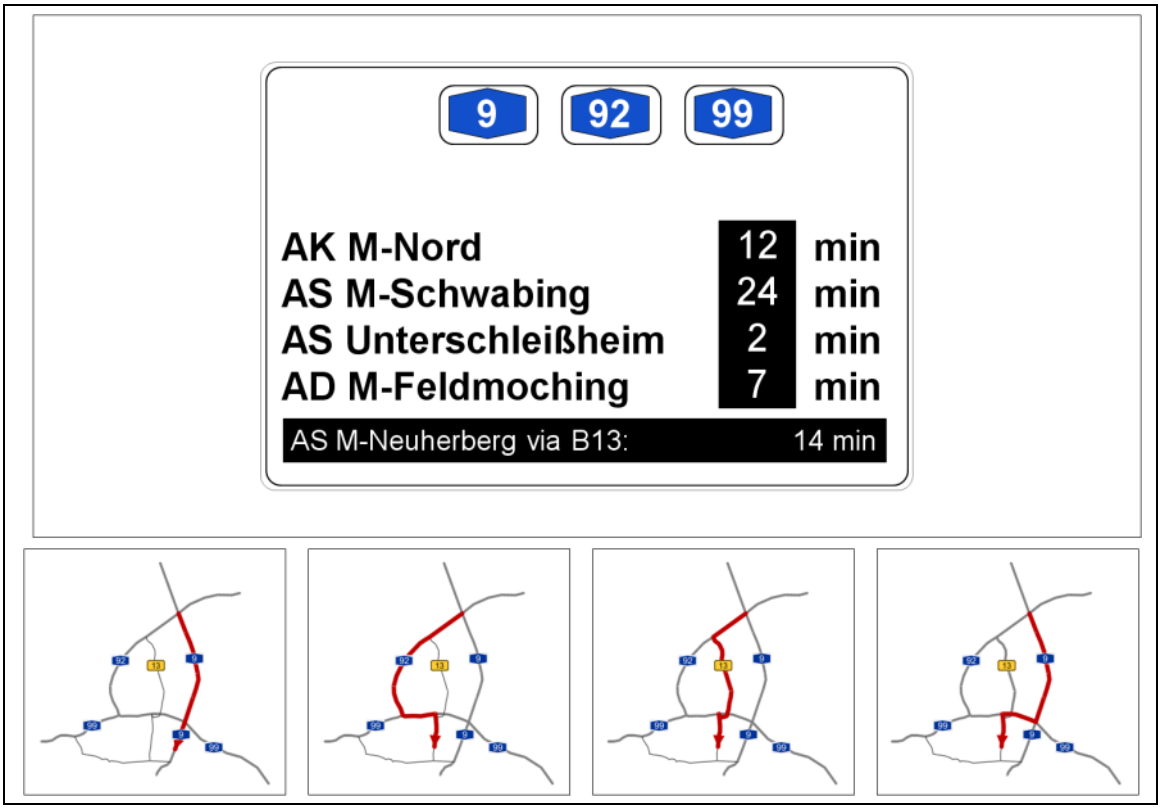


Bild 99: Verkehrszustand 3 (Störung auf Hauptroute und zweiter Alternativroute des Probanden), Informationsmedium Reisezeit-Tafel

11.3 Beispiel Datenbericht

Auswertung

Analyse Verkehrsverhalten

Proband mit *wiki*-Nr. 40

Studie zum Verkehrsverhalten in München -
Forschungsvorhaben *wiki*

Autobahndirektion Südbayern

BMW Group

Universität Stuttgart

Technische Universität München

PTV AG

Technische Universität Dresden

Dankeschön!

An dieser Stelle möchte Ihnen das *wiki* -Team nochmals recht herzlich für Ihre Teilnahme danken. Durch Ihre Mithilfe konnte das Projekt entscheidend vorangetrieben werden und der Grundstein zur Gewinnung neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse wurde gelegt. Als kleines Dankeschön wurde für Sie die folgende, persönliche Mobilitätsauswertung erstellt.

Statistik der erfassten Daten

Die nachstehende Tabelle gibt eine Übersicht über die Daten, die Sie für uns eingefahren haben. Enthalten sind ausschließlich Daten, die von uns zwischen dem 16.06.2009 und dem 30.07.2009 erfasst wurden.

Tabelle 1: Statistik der erfassten Daten

Kenngröße	**Werte**
Zeitraum der Erfassung	16.06.2009 bis 30.07.2009
Dauer des erfassten Zeitraumes	44 Tage
Erfasste Gesamtlänge	2.925 km
Erfasste Gesamtzeit	1 Tage, 19 h, 17 min
Mittlere Routenlänge	31,8 km
Mittlere Routendauer	28 min
Mittlere Geschwindigkeit	68 km/h
Anzahl der Tage an denen Routen erfasst wurden	38
Anzahl der erfassten Routen	92
Durchschnittlich erfasste Routenanzahl pro Tag	2

Ihre Arbeitswege

In den folgenden zwei Tabellen sind die Daten ausgewertet, welche auf Routen zwischen Ihrem Arbeitsort und Ihrer Wohnumgebung erfasst wurden. Zum Vergleich: Im Jahr 2002 legte der durchschnittliche Deutsche werktags 17,7 km vom Wohnort zur Arbeit mit dem PKW zurück, benötigte dafür ca. 24 min und erreichte somit eine mittlere Geschwindigkeit von 43,5 km/h auf dem Arbeitsweg.

Tabelle 2: Statistik der erfassten Wege mit dem Ziel Arbeitsplatz

Kenngröße	**Werte**
Durchschnittliche Länge des Weges zur Arbeit	38, 9km
Verhältnis aus tatsächlichem Weg und Luftlinie	1,3
Durchschnittliche Dauer des Weges zur Arbeit	37 min
Maximale Dauer des Weges zur Arbeit (Datum)	42 min (23.06.2009)
Minimale Dauer des Weges zur Arbeit (Datum)	32 min (30.07.2009)
Durchschnittliche Geschwindigkeit auf dem Weg zur Arbeit	64 km/h

Tabelle 3: Statistik der erfassten Wege mit Startpunkt am Arbeitsplatz

Kenngröße	**Werte**
Durchschnittliche Länge des Weges von der Arbeit	39,9 km
Verhältnis aus tatsächlichem Weg und Luftlinie	1,3
Durchschnittliche Dauer des Weges von der Arbeit	31 min
Maximale Dauer des Weges von der Arbeit (Datum)	50 min (15.07.2009)
Minimale Dauer des Weges von der Arbeit(Datum)	26 min (20.07.2009)
Durchschnittliche Geschwindigkeit des Weges von der Arbeit	78 km/h

Darüber hinaus zeigen Ihnen die vier nachstehenden Diagramme den Verlauf der Geschwindigkeiten aufgetragen über der Reisezeit jeweils für eine langsame und eine schnelle Fahrt zur bzw. von der Arbeit.

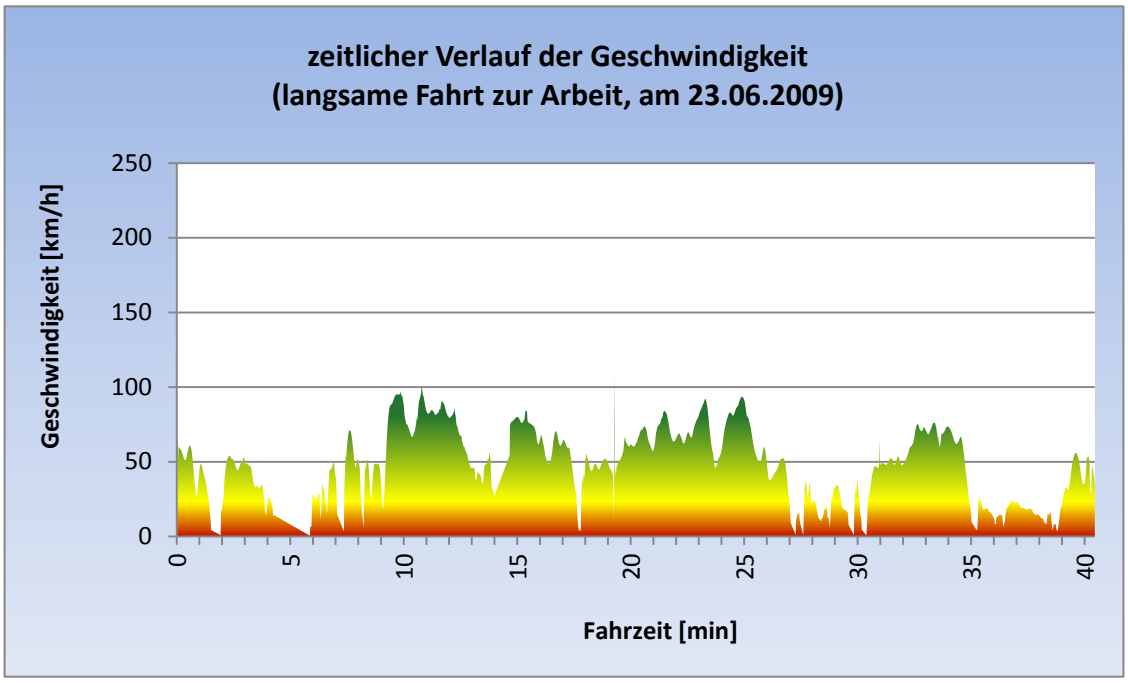


Abbildung 1: Geschwindigkeitsverlauf einer langsamen Fahrt zur Arbeit

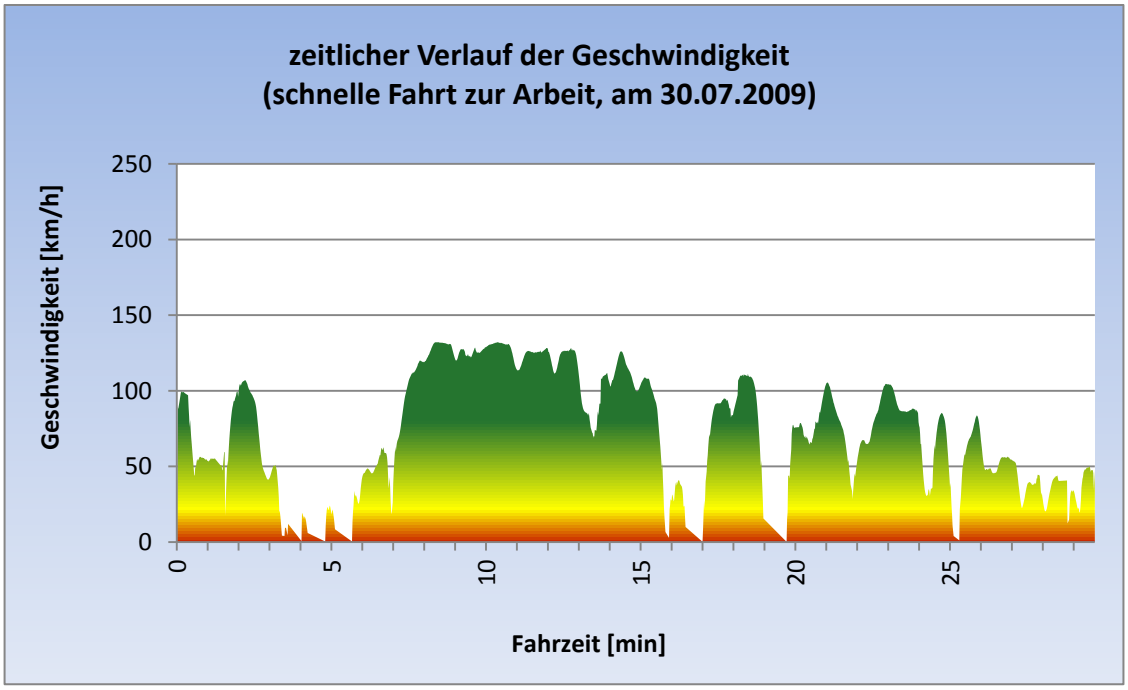


Abbildung 2: Geschwindigkeitsverlauf einer schnellen Fahrt zur Arbeit

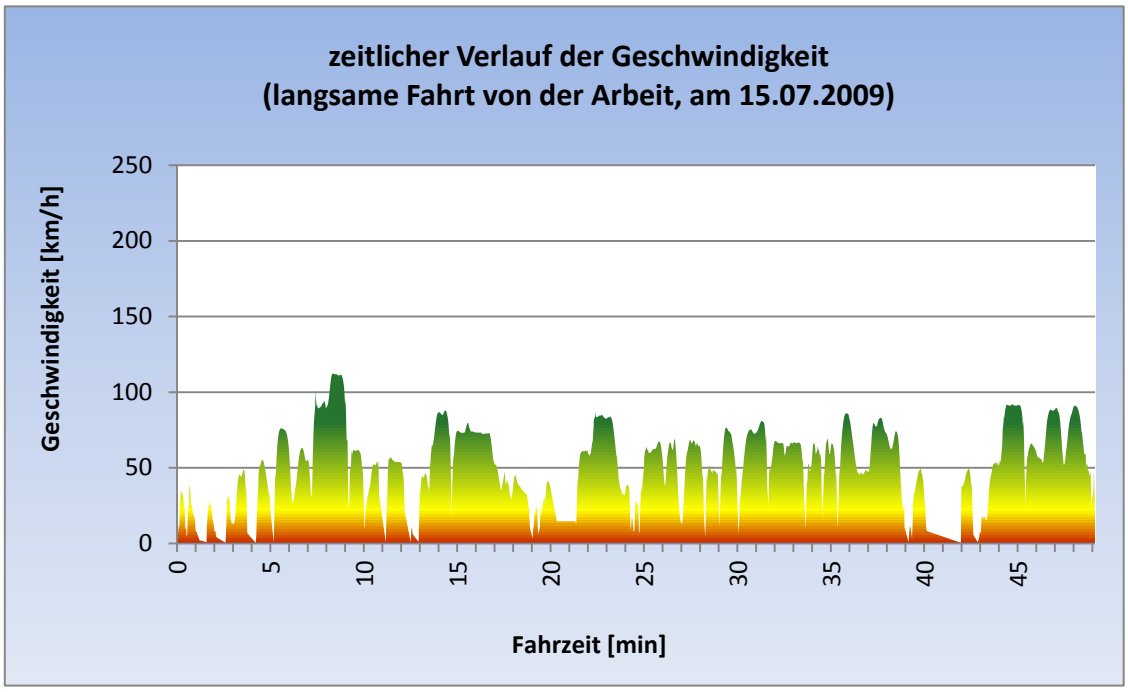


Abbildung 3: Geschwindigkeitsverlauf einer langsamen Fahrt von der Arbeit

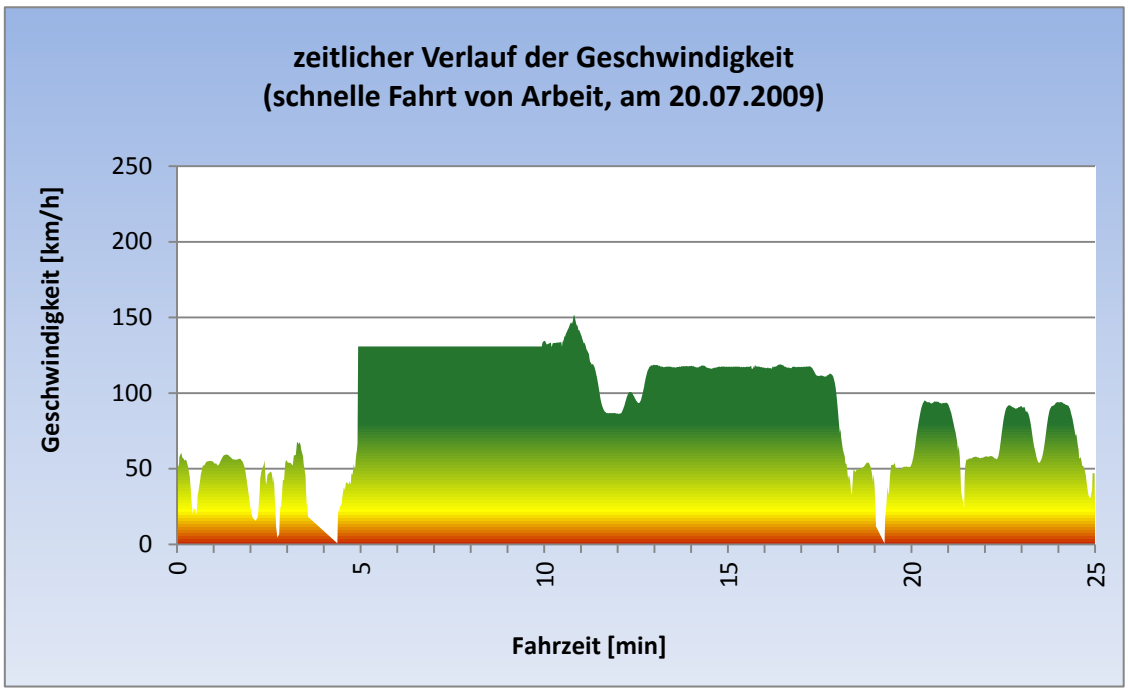


Abbildung 4: Geschwindigkeitsverlauf einer schnellen Fahrt von der Arbeit

Verkehrsqualität Ihrer Wege

Mit Hilfe des folgenden Diagramms können Sie die Qualität der von Ihnen gewählten Routen hinsichtlich der Reisezeit ermitteln. Die für diese Bewertung geeignete Kenngröße ist die Luftliniengeschwindigkeit. Sie ergibt sich aus dem Quotienten von Luftlinienentfernung und Reisezeit. Auf diese Weise sind sowohl die Entfernung als auch die verschiedenen gefahrenen Geschwindigkeiten auf Ihrer Route implizit berücksichtigt. Im Diagramm ist die Luftliniengeschwindigkeit über der Luftlinienentfernung aufgetragen, außerdem sind die Bereiche der Qualitätsstufen erkennbar, welche in folgender Tabelle näher beschrieben sind.

Tabelle 4: Erläuterung der Stufen der Angebotsqualität (SAQ)

SAQ	Beschreibung
A	Ausgezeichnete Qualität
B	Gute Qualität
C	Befriedigende Qualität
D	Ausreichende Qualität
E	Mangelhafte Qualität
F	Unzureichende Qualität

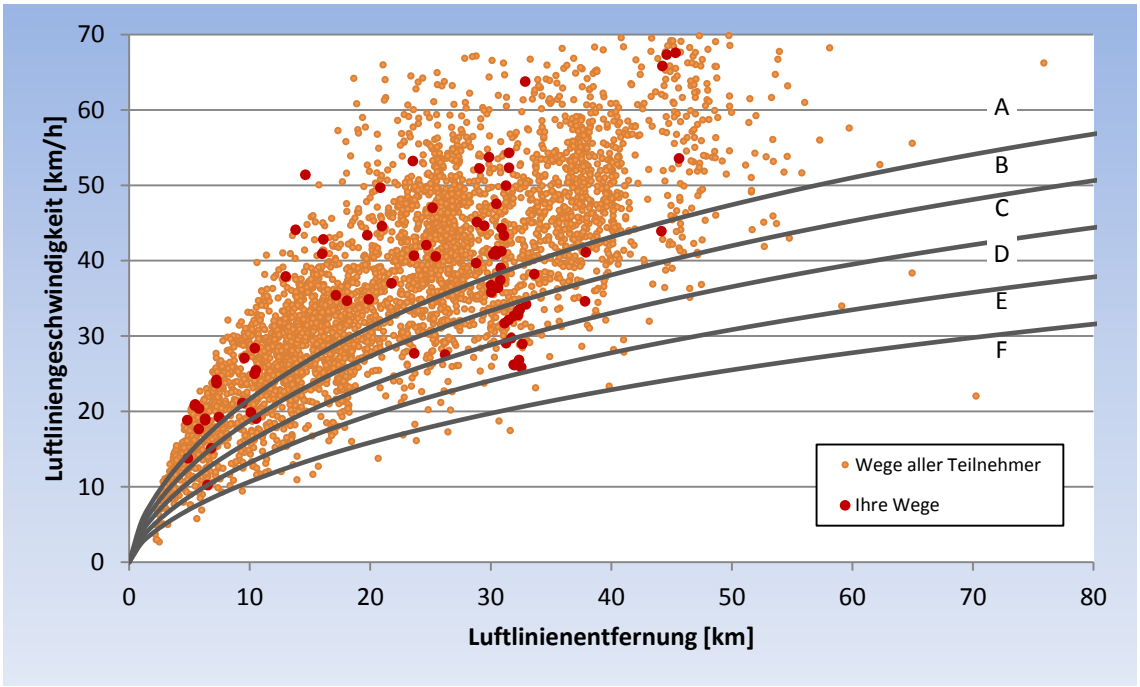


Abbildung 5: Routenqualität im Vergleich zu anderen Teilnehmern

Die kleinen orangenen Punkte sind die aufgezeichneten Wege aller Teilnehmer, die etwas größeren roten Punkte stellen Ihre Wege dar. Die sich ergebende Häufung der

bei ca. 33 km Luftlinienentfernung resultiert aus Ihren Arbeitswegen. Die Luftlinienentfernung ist konstant, während die Luftliniengeschwindigkeit wegen der unterschiedlichen Reisezeiten variiert. Je länger die Reisezeit umso niedriger die Luftliniengeschwindigkeit, woraus wiederum eine schlechtere Verkehrssqualität folgt. Die Mehrzahl Ihrer Wege liegt allerdings im Bereich der Qualitätsstufe B, also von guter Qualität.

Beispielhafte Visualisierung

Die folgenden Abbildungen 6 bis 9 zeigen den rot eingefärbten, räumlichen Verlauf der langsamsten bzw. schnellsten Fahrt zu ihrem Arbeitsplatz bzw. ausgehend von ihrem Arbeitsplatz.

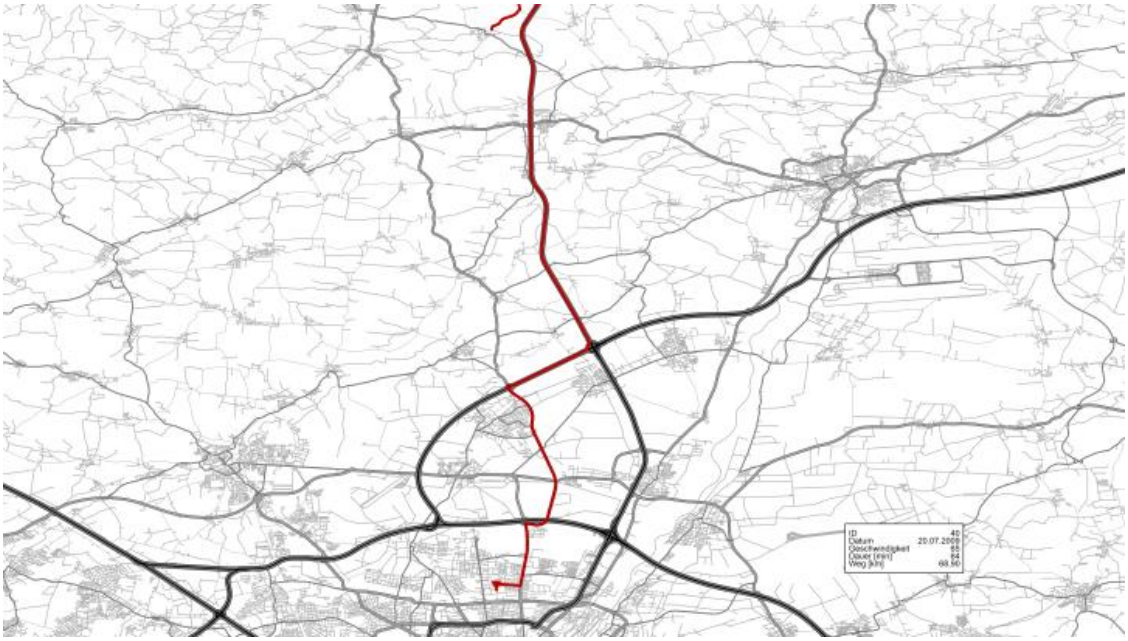


Abbildung 6: Verlauf der langsamsten Fahrt zur Arbeit

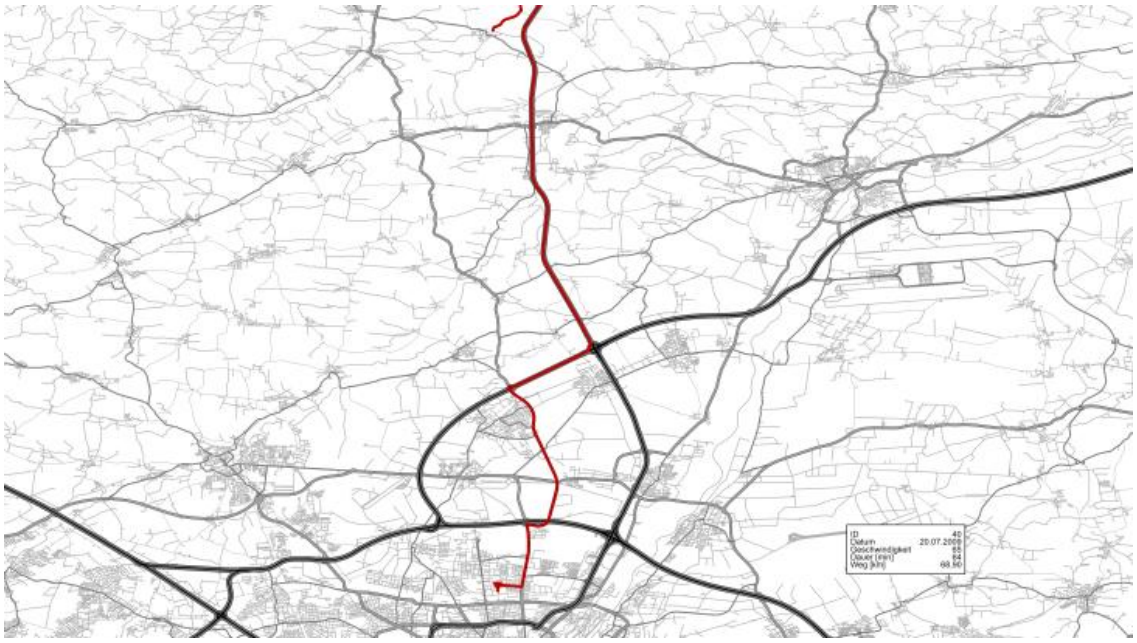


Abbildung 7: Verlauf der schnellsten Fahrt zur Arbeit

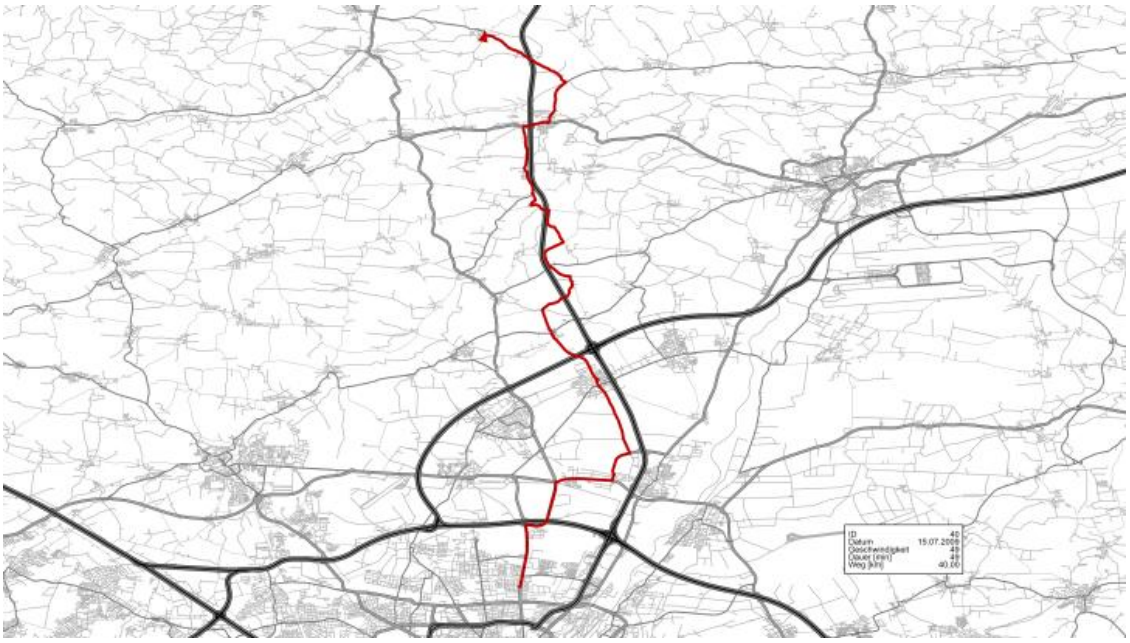


Abbildung 8: Verlauf der langsamsten Fahrt von der Arbeit weg

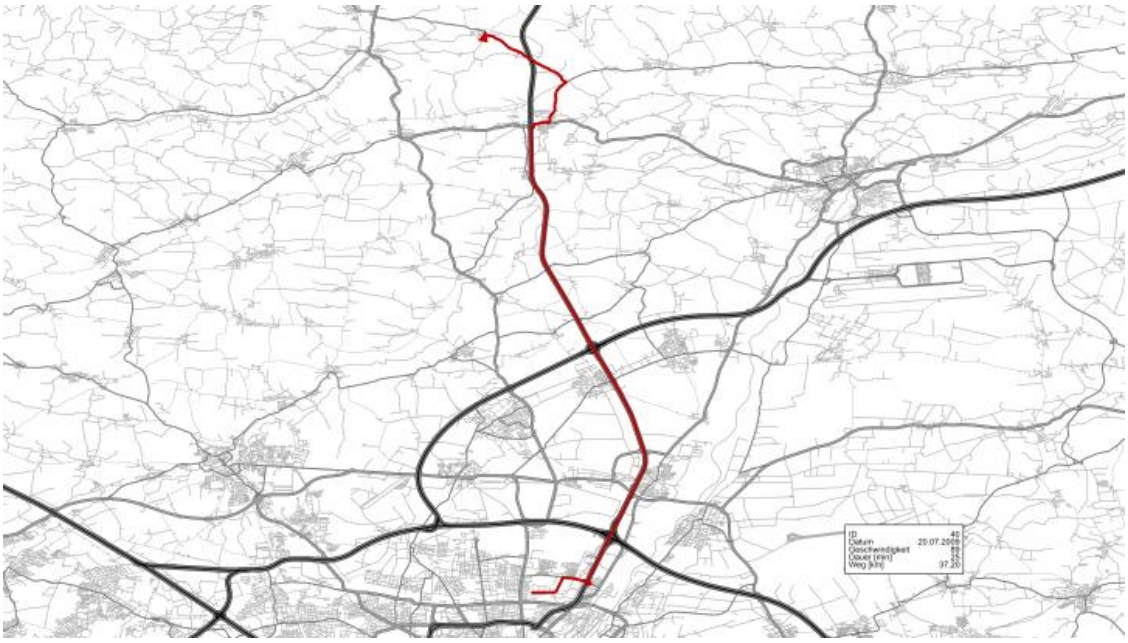


Abbildung 9: Verlauf der schnellsten Fahrt von der Arbeit weg

In Abbildung 10 sind diejenigen Strecken im Raum München rot eingefärbt, auf denen wir ein GPS-Signal von Ihnen erfasst haben. Je breiter der rote Balken desto öfter haben Sie diesen Abschnitt überfahren.

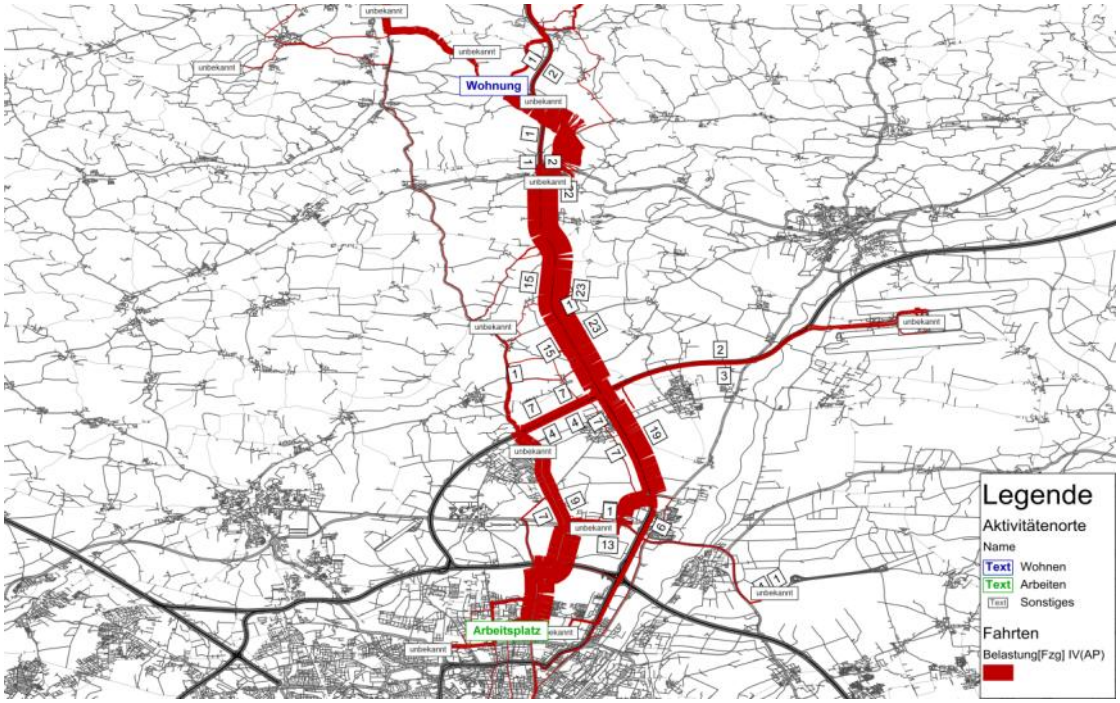


Abbildung 10: Übersicht über die von Ihnen überfahrenden Strecken