Modellierung des Zeitwahlverhaltens im Personenverkehr

von der Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Christoph Hecht

aus München

Hauptberichter:	Prof. Dr.-Ing. Wolfram Ressel
Mitberichter:	Prof. Dr. rer. pol. Frank C. Englmann

Mündliche Prüfung: 21.2.2001

Institut für Straßen- und Verkehrswesen der Universität Stuttgart

2001

Vorwort

Die hier veröffentlichte Dissertation habe ich während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Straßen- und Verkehrswesen der Universität Stuttgart verfaßt.

Meinen besonderen Dank möchte ich Herrn Professor Dr.-Ing. Wolfram Ressel aussprechen, der nach langer Vakanz am Institut die volle Verantwortung für die laufenden Forschungsprojekte und wissenschaftlichen Arbeiten übernommen hat und sich in kurzer Zeit in das hier behandelte Thema einarbeiten mußte. In gleichem Maße gebührt mein Dank Herrn Professor Dr. rer. pol. Frank C. Englmann für seine unendliche Geduld im Forschungsprojekt 'Wege zu einer umweltverträglichen Mobilität – am Beispiel der Region Stuttgart' und die Übernahme des Koreferats für diese Arbeit.

Weiterhin bedanke ich mich bei den zahlreichen Kolleginnen und Kollegen des Instituts für die vielen fachlichen und nicht-fachlichen Anregungen und Diskussionen. Besondere Erwähnung verdienen Henrik Schwarz für die pragmatische Hilfe und Geduld beim Zuhören sowie Rüdiger Bächtle für die informationstechnische Umsetzung des Modellkonzepts.

Ich möchte diese Arbeit meiner Frau Ines und unserer in Stuttgart geborenen Tochter Veronika widmen.

München, 2001

Christoph Hecht

Inhalt

Abbildungen ... **4**
Tabellen ... **6**
Zusammenfassung ... **7**
Abstract ... **9**
1 Einführung ... **11**
1.1 Vorbemerkung ... 11
1.2 Untersuchungsziel ... 12
2 Stand der Forschung ... **19**
2.1 Vorbemerkung ... 19
2.2 Ökonomische Modelle ... 20
2.3 Gleichgewichtsmodelle ... 24
2.4 Empirische Untersuchungen ... 24
2.5 Prognosemodelle ... 29
3 Integriertes Ziel-, Verkehrsmittel- und Zeitwahlmodell ... **35**
3.1 Status Quo der Modellierung ... 35
3.2 Ziele einer feineren zeitlichen Diskretisierung ... 36
3.2.1 Routensuche und Verkehrsumlegung ... 36
3.2.2 Beurteilung der Verkehrsqualität ... 37
3.2.3 Berechnung der Emissionen ... 37
3.3 Grundlagen des Modellierungskonzeptes ... 37
3.4 Simultane Modellierung ... 40
4 Implementierung des Modellierungskonzeptes ... **53**
4.1 Vorbemerkung ... 53
4.2 Räumliche Abgrenzung ... 54
4.3 Erzeugungsmodell ... 54
4.4 Simultane Verteilung, Aufteilung, Zeitwahl ... 56
4.4.1 Vorbemerkung ... 56
4.4.2 Widerstandsmatrizen ... 56
4.4.3 Tageszeitliche Wunschlinien der Verkehrsnachfrage ... 62
4.4.4 Bewertungs- und Verteilungsmodell ... 78
4.5 Umlegung, Netzbelastung, Widerstandsmatrix ... 92
4.5.1 Vorbemerkung ... 92
4.5.2 Heimfahrten ... 92
4.5.3 Besetzungsgrad ... 94
4.5.4 Pkw-Fernverkehr ... 94
4.5.5 Lkw-Matrix ... 95
4.5.6 Umlegungsmodell ... 95
4.5.7 MIV-Netz-Editor ... 99
4.6 Hard- und Software ... 100
4.7 Beispielrechnungen ... 100
4.7.1 Vorbemerkung ... 100
4.7.2 Bewertungsgrößen ... 101
4.7.3 Bezugsszenario ... 102
4.7.4 Szenario Road Pricing ... 109
4.8 Beurteilung ... 117
5 Ausblick ... **121**
Literatur ... **125**
Lebenslauf ... **129**
Anhang ... **131**
Karten ... **221**

Abbildungen

Abbildung 1-1: Konstante Kosten bei konstantem Nutzen über den Zeitraum eines Tages 17
Abbildung 1-2: Konstante Kosten bei zeitlich begrenztem Nutzen 15
Abbildung 1-3: Zeitlich variable Kosten bei zeitlich begrenztem Nutzen 15
Abbildung 2-1: Prinzipielle Form der Modellfunktion zur Berechnung des Spitzenstundenanteils der Fahrzeiten am morgendlichen Spitzenintervall 27
Abbildung 2-2: Mögliche Verschiebungen der Fahrtzeitpunkte in Fahrtenketten 29
Abbildung 3-1: Bei gleicher Entfernung (Widerstand) ziehen die Ziele mit höherer Attraktivität (Potential) mehr Fahrten von der Quelle an 36
Abbildung 3-2: Bei gleich hoher Attratkivität (Potential) ziehen die Ziele mit der geringeren Fahrzeit (Widerstand) mehr Fahrten von der Quelle an 36
Abbildung 3-3: Verkehrsmittel mit kürzerer Reisezeit (geringerer Widerstand) ziehen mehr Fahrten zum jeweiligen Ziel an 37
Abbildung 3-4: Die Fahrzeit von einer Quelle zum gleichen Ziel variiert mit der Tageszeit 37
Abbildung 3-5: Die Attraktivität einzelner Ziele variiert mit der Tageszeit 38
Abbildung 3-6: simultane Ziel-, Zeit- und Verkehrsmittelwahl 38
Abbildung 3-7: Gedankenmodell 40
Abbildung 3-8: Beobachtete Nachfrage und Reisezeitverteilung 41
Abbildung 3-9: Wunschverteilung der Nachfrage für den Fahrtzweck Wohnen-Arbeit 41
Abbildung 3-10: Gedankenmodell mit zwei Zielen 43
Abbildung 3-11: Gedankenmodell mit zwei Zielen und zwei Verkehrsmitteln 47
Abbildung 4-1: Siedlungsfläche der Verkehrsbezirke im 50m-Raster 57
Abbildung 4-2: Verteilung der Fahrtzeitpunkte für die Aktivität Arbeit 61
Abbildung 4-3: Verteilung der Fahrtzeitpunkte für die Aktivität Einkaufen 61
Abbildung 4-4: Zeitliche Verteilung der Aktivitätenübergänge zur Arbeit 62
Abbildung 4-5: Startzeitpunkte für die Aktivitätenübergänge Arbeit, Einkaufen, Ausbildung und Freizeit in der Region Stuttgart 64
Abbildung 4-6: Startzeitpunkte für den Aktivitätenübergang Arbeit in der Region Stuttgart differenziert nach verwendeten Hauptverkehrsmitteln 65
Abbildung 4-7: Startzeitpunkte für den Aktivitätenübergang Arbeit in der Region Stuttgart differenziert für aggregierte Hauptverkehrsmittelgruppen MIV und ÖV. 66
Abbildung 4-8: Startzeitpunkte für die Aktivitätenübergänge der Elementarketten: Wohnung – Arbeit - Wohnung, Wohnung – Einkaufen - Wohnung, Wohnung – Ausbildung - Wohnung und Wohnung – Freizeit - Wohnung in der Region Stuttgart 67
Abbildung 4-9: Startzeitpunkte für die Aktivitätenübergänge der Wegeketten Wohnung – Arbeit – Einkaufen - Wohnung, Wohnung – Einkaufen - Einkaufen - Wohnung, Wohnung – Freizeit - Freizeit - Wohnung und Wohnung – Arbeit – Freizeit - Wohnung in der Region Stuttgart 67
Abbildung 4-10: Startzeitpunkte für den Aktivitätenübergang ‚zur Arbeit' differenziert nach Vollzeiterwerbstätigen/Teilzeiterwerbstätigen und Männer/Frauen. 68
Abbildung 4-11: Verkehrsmittel- und fahrtzweckspezifische Ganglinien der Verkehrsqualität. 75
Abbildung 4-12: Bewertungswahrscheinlichkeiten und zugehörige Verkehrsmittelaufteilung nach dem EVA-Modell (0-10 km). 79
Abbildung 4-13: Bewertungswahrscheinlichkeiten und zugehörige Verkehrsmittelaufteilung nach dem EVA-Modell (0-100 km). 79
Abbildung 4-14: Fahrtweitenverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zur Arbeit' in Klassen von 1 km. 82

Abbildung 4-15: Fahrtweitenverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zur Arbeit' in Klassen von 5 km. 83
Abbildung 4-16: Fahrtweitenverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zum Einkaufen' in Klassen von 1 km. 83
Abbildung 4-17: Fahrtweitenverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zum Einkaufen' in Klassen von 5 km. 84
Abbildung 4-18: Fahrtweitenverteilung für den Fahrtzweck 'Arbeit' in Klassen von 1 km 85
Abbildung 4-19: Fahrtweitenverteilung für den Fahrtzweck 'Arbeit' in Klassen von 5 km 85
Abbildung 4-20: Modal Split für den Fahrtzweck 'Arbeit' in Klassen von 1 km 87
Abbildung 4-21: Modal Split für den Fahrtzweck 'Arbeit' in Klassen von 5 km 87
Abbildung 4-22: Anteile der Aktivitäten an der Gesamtmobilität 91
Abbildung 4-23: Tagesganglinie der Lkw-Nachfrage 93
Abbildung 4-24: Beispiel für eine Verkehrsstärke-Geschwindigkeitskurve (ST 2.13) nach EWS 95
Abbildung 4-25: MIV-Netzeditor zur Darstellung der Netzbelastung und Bearbeitung des Streckennetzes 97
Abbildung 4-26: Fahrtweitenverteilung Fahrtzweck zur Arbeit nach Verkehrsmitteln 102
Abbildung 4-27: Fahrtweitenverteilung Fahrtzweck zum Einkaufen nach Verkehrsmitteln 102
Abbildung 4-28: Zeitlicher Verlauf der Verkehrsnachfrage nach 104
Abbildung 4-29: Modal Split im Tagesverlauf zwischen den Mittelbereichen Esslingen und Stuttgart Stadt-Zentrum, Fahrtzweck Arbeit, Bezugsfall. 105
Abbildung 4-30: Durchschnittliche Fahrtweite im Tagesverlauf nach Verkehrsmitteln Fahrtzweck Arbeit, alle Fahrten in der Region, Bezugsszenario 106
Abbildung 4-31: Personenverkehrsnachfrage im Bezugs- und Maßnahmefall für den Fahrtzweck Arbeit, MIV und ÖV Quelle: Mittelbereich Esslingen, Ziel: Mittelbereich Stuttgart Stadt-Zentrum 110
Abbildung 4-32: Vergleich der Pkw-Tagesganglinien am Kordonquerschnitt B 295 113
Abbildung 4-33: Verkehrsqualität zwischen den Mittelbereichen Esslingen und Stuttgart-Stadt-Zentrum 116

Tabellen

Tabelle 3-1: Zeitlich-räumliche Angebotsstruktur für eine Quelle, zwei Ziele und 24 Zeitintervalle ... 49

Tabelle 3-2: Zeitlich-räumlich-modale Angebotsstruktur für eine Quelle, zwei Ziele, zwei Verkehrsmittel und 24 Zeitintervalle ... 51

Tabelle 4-1: Mittlere Binnenentfernung (Luftlinie) und Entfernungsverteilung der ausgewählten Verkehrsbezirke. ... 60

Tabelle 4-2: Mittlere Luftlinienentfernung und Entfernungsverteilung von Bezirk 54320 zu den ausgewählten Nachbarverkehrsbezirken. ... 59

Tabelle 4-3: Auftreten von Wegeketten im Datensatz RVP-Haushaltsbefragung ’95. Ketten mit weniger als 10-maligem Auftreten sind nicht aufgeführt. ... 65

Tabelle 4-4: Empirische tageszeitliche Ganglinien der fahrtzweckspezifischen Verkehrsnachfrage in der Region Stuttgart. ... 71

Tabelle 4-5: Verkehrsmittelspezifische Ganglinien der aggregierten Verkehrsqualität in der Region Stuttgart ... 75

Tabelle 4-6: Aggregationsgewichte zur Berechnung der fahrtzweckspezifischen Ganglinien der Verkehrsqualität ... 75

Tabelle 4-7: Fahrtzweckspezifische Ganglinien der Verkehrsqualität ... 76

Tabelle 4-8: Zeitliche Wunschlinien der Nachfrage. ... 78

Tabelle 4-9: Bewertungsparameter der Potenz-Exponentialfunktion ... 82

Tabelle 4-10: Bewertungsparameter für die Widerstandsfunktionen der Verkehrsmittel ... 83

Tabelle 4-11: Durchschnittliche Fahrtweiten nach Fahrtzwecken und Verkehrsmitteln ... 86

Tabelle 4-12: Durchschnittliche Fahrtweiten nach Verkehrsmitteln ... 86

Tabelle 4-13: Durchschnittliche Fahrtweiten nach Fahrtzwecken und Verkehrsmitteln ... 88

Tabelle 4-14: Fahrtzweckspezifische Modal Split Werte ... 89

Tabelle 4-15: Fahrtzweckspezifische Modal Split Werte ... 90

Tabelle 4-16: Tagesganglinien der Heimfahrten ... 93

Tabelle 4-17: Fahrzeugbesetzungsgrade im MIV ... 94

Tabelle 4-18: durchschnittliche Fahrtweiten im Bezugsszenario nach Fahrtzwecken ... 103

Tabelle 4-19: Modal Split Anteile im Bezugsszenario nach Fahrtzwecken ... 103

Tabelle 4-20: Verkehrsaufkommen im Bezugsszenario nach Fahrtzwecken ... 103

Tabelle 4-21a: Zeitlicher Verlauf der MIV-Verkehrsnachfrage nach Richtung: alle Fahrten in der Region, aus den Landkreisen in die LH Stuttgart, aus der LH Stuttgart in die Landkreise, Bezugsfall ... 106

Tabelle 4-22: durchschnittliche Fahrtweiten im Maßnahmeszenario nach Fahrtzwecken ... 110

Tabelle 4-23: Modal Split Anteile im Maßnahmeszenario nach Fahrtzwecken ... 111

Tabelle 4-24: Verkehrsaufkommen im Maßnahmeszenario nach Fahrtzwecken ... 111

Tabelle 4-25a: Zeitlicher Verlauf der MIV-Verkehrsnachfrage nach Richtung: alle Fahrten in der Region, aus den Landkreisen in die LH Stuttgart, aus der LH Stuttgart in die Landkreise, Maßnahmeszenario ... 112

Tabelle 4-26: Personenverkehrsnachfrage im Bezugs- und Maßnahmefall für den Fahrtzweck Arbeit, alle Verkehrsmittel Quelle: Mittelbereich Esslingen, Ziel: Mittelbereich Stuttgart Stadt-Zentrum ... 113

Tabelle 4-27: Änderung der Personenverkehrsnachfrage im Maßnahmefall Road Pricing gegenüber dem Bezugsfall für den Fahrtzweck Arbeit, alle Verkehrsmittel Quelle: Mittelbereich Esslingen, Ziel: Mittelbereich Stuttgart Stadt-Zentrum ... 114

Zusammenfassung

Die physische Verkehrsinfrastruktur für den motorisierten Straßenverkehr wie auch für den öffentlichen Verkehr wird zumindest im Umfeld der Ballungsräume der Bundesrepublik Deutschland regelmäßig bis zur Kapazitätsgrenze in Anspruch genommen bzw. sogar überlastet. Diese Spitzennachfrage tritt regelmäßig und zyklisch morgens und abends auf, während zu anderen Tageszeiten – vor allem nachts – noch Kapazitätsreserven der Verkehrsinfrastruktur brach liegen. Zukünftige Strategien für Steuerung und Management der Verkehrsnachfrage müssen darauf abzielen, Belastungsspitzen abzubauen und die Nachfrage gleichmäßiger über den Tagesverlauf zu verteilen. Der Verkehrsingenieur benötigt zur Entwicklung geeigneter Maßnahmen für die Umsetzung dieser Strategien Werkzeuge und Modelle, mit denen er die komplexen Wirkungen theoretisch überprüfen, bewerten und optimieren kann. Herkömmliche Modelle zur Berechnung der Verkehrsnachfrage enthalten keine Elemente, mit denen der tageszeitliche Verlauf der Nachfrage maßnahmesensitiv abgebildet werden kann.

In dieser Arbeit wird ein Ansatz vorgestellt, der in einem Verkehrsnachfragemodell die Wahl des Fahrtzeitpunktes als gleichberechtigten Freiheitsgrad neben die Wahl des Fahrtziels und die Wahl des Verkehrsmittels stellt. Dabei wird ausführlich darauf eingegangen, wie sich die Einflüsse der Verkehrsqualität und verkehrlicher Maßnahmen von den allgemeinen Präferenzen zur Wahl des Fahrtzeitpunktes trennen lassen. Zu diesem Zweck wird aus empirischen Befragungsdaten fahrtzweckspezifisch der in einem Untersuchungsgebiet realisierte Verlauf der Fahrtzeitpunkte ermittelt. Außerdem wird eine integrierte Ganglinie der Verkehrsqualität aller Verkehrsmittel als Maß für den verkehrlichen Aufwand zu unterschiedlichen Zeiten des Tages berechnet. Aus diesen empirischen Grundlagen wird – ebenfalls getrennt nach Fahrtzwecken – eine zeitliche Wunschlinie der Nachfrage gebildet; dergestalt, daß zu Zeiten hohen verkehrlichen Aufwandes die realisierte Nachfrage kleiner als die Wunschnachfrage und zu Zeiten niedrigen verkehrlichen Aufwandes die realisierte Nachfrage größer als die Wunschnachfrage ist. Grundlage dieses Vorgehens ist die These, daß die beobachtbare Nachfrageverteilung bereits von der tageszeitlich variierenden Verkehrsqualität beeinflußt ist und dieser verkehrliche Einfluß aus den vom Kollektiv der Verkehrsteilnehmer originär gewünschten Nachfragezeiten herausgerechnet werden muß.

Das Prognosemodell benötigt zeitlich differenzierte Widerstandsmatrizen für alle betrachteten Verkehrsmittel im Untersuchungsgebiet. Diese enthalten je nach Verkehrsmittel unterschiedliche charakteristische Daten zum verkehrlichen Aufwand zwischen allen Verkehrsbezirken. Mit geeigneten Bewertungsfunktionen werden die Widerstandsparameter zu direkt vergleichbaren Bewertungswerten zusammengefaßt. Die Verkehrsnachfrage wird – ausgehend von den Startbezirken – simultan auf alle potentiellen Ziele, Verkehrsmittel und Zeitintervalle aufgeteilt. Die zeitliche Wunschlinie der Nachfrage bildet dabei die Ausgangsbasis des zeitlichen Verlaufes, von dem in Abhängigkeit von der Verkehrsqualität abgewichen wird. Randbedingungen für die abschließende Ausgleichsrechnung sind Quell- und Zielverkehr jedes Bezirkes, die vorab im Schritt der Verkehrserzeugung festgelegt worden sind. Das Ergebnis für jeden behandelten Fahrtzweck ist eine vierdimensionale Matrix der Verkehrsnachfrage mit den Dimensionen: Startbezirk, Zielbezirk, Verkehrsmittel und Zeitintervall.

Das Modell wurde beispielhaft für den Untersuchungsraum der Region Stuttgart implementiert. Dazu wurde die Einteilung in 624 Verkehrsbezirke aus dem Regionalverkehrsplan übernommen und vier Verkehrsmittel sowie 24 Zeitintervalle für die Stunden des Tages berücksichtigt.

Für die Berechnung der zeitlich differenzierten Widerstandsmatrizen des motorisierten Straßenverkehrs (MIV) und des öffentlichen Verkehrs (ÖV) konnten die im Forschungsprojekt 'Wege zu einer umweltverträglichen Mobilität – am Beispiel der Region Stuttgart' entwickelten Modellkomponenten angewendet werden. Zur Behandlung des nicht motorisierten Verkehrs mußte ein neues Verfahren entwickelt werden, mit dem die Eignung der kleinräumigen Relationen innerhalb und zwischen benachbarten Verkehrsbezirken für Fußgänger und Radfahrer beschrieben werden konnte. Außerdem mußten die Widerstandsmatrizen des MIV und ÖV um Binnenwiderstände der Verkehrsbezirke erweitert werden.

Das beschriebene Modellkonzept wurde für das Analysejahr 1995 aufgestellt und kalibriert. Dabei konnte festgestellt werden, daß es im Rahmen der verfügbaren Kontrollgrößen die Realität hinreichend genau wiedergibt. Die Fahrtweitenverteilungen werden differenziert nach Fahrtzwecken und Verkehrsmitteln realistisch abgebildet. Die zyklischen Belastungsspitzen und unsymmetrischen Querschnittsbelastungen im Straßennetz werden gut wiedergegeben. Die globale Aufteilung auf die Verkehrsmittel (Modal Split) läßt sich entsprechend den global vorliegenden Kenngrößen einstellen; auf einzelnen Relationen ergeben sich die Verkehrsmittelanteile entsprechend den Angebotsparametern der verschiedenen Verkehrsmittel. Die im Modell realisierten zeitlichen Nachfragekurven werden durch den Verlauf der Verkehrsqualität der einzelnen Verkehrssysteme beeinflußt und weichen in der erwarteten Weise von den vorher generierten zeitlichen Wunschlinien der Nachfrage ab.

Zur Überprüfung der Sensitivität des Modells wurde ein Road Pricing-Maßnahmenfall in Form eines Einfahrkordons um die Stadt Stuttgart entwickelt. Das Modell zeigt in plausibler Weise die räumlichen, modalen und zeitlichen Verlagerungen als Reaktion auf die in der Morgenspitze erhobenen Straßenbenutzungsgebühren. Betroffen sind im wesentlichen die Relationen mit Start außerhalb und Ziel in der Landeshauptstadt; die veränderte Routenwahl des bisherigen Durchgangsverkehrs führt jedoch während der Morgenspitze in weiten Bereichen der Region zu einer Abnahme der Verkehrsqualität und dadurch auch zu Beeinträchtigen aller anderen Relationen. Die Größe der verschiedenen Verlagerungen hängt von zahlreichen Annahmen ab, die im Rahmen der Beispielimplementierung nur grob abgeschätzt werden konnten und für eine fundierte Aussage zur Wirksamkeit der Road Pricing-Maßnahme empirisch abgesichert werden müßten. In dem beschriebenen Modell können die für die Sensitivität maßgeblichen Parameter in weiten Bereichen justiert werden.

Mit Hilfe der Beispielanwendung konnte nachgewiesen werden, daß der Modellierungsansatz geeignet ist, das Zeitwahlverhalten der Verkehrsteilnehmer in ein simultanes Nachfragemodell zu integrieren. Der zu diesem Zweck erstellte Software Prototyp ist noch sehr umständlich zu bedienen und angesichts der enormen Datenmengen, die während eines einzigen Rechenlaufs anfallen, ist auch der zeitliche Bearbeitungsaufwand sehr hoch. Methodisch muß im wesentlichen die Behandlung der Fahrtenketten und der Heimfahrten weiterentwickelt werden. Mit der vorhandenen Hardware konnte der dadurch induzierte Rechenaufwand nicht mehr bewältigt werden.

Abstract

Physical transport infrastructure for motorised traffic and public transport in conurbation areas of Germany is persistently loaded to the limit or beyond. These peak loads regularly and cyclic take place in the morning and evening hours, while at other times of the day – especially at night – capacity is still remaining. Future strategies for control and management of transport demand need to reduce these sharp peak loads and spread demand more evenly in the course of the day. A transportation engineer requires tools and models to examine, evaluate and optimise the complex effects of suitable measures in theory, that he wants to develop and implement within these strategies. Traditional models for the calculation of transport demand do not represent the variation of demand in the course of the day as being sensitive to measures within the model.

This thesis presents the concept for a transport demand model, that includes the choice of time of the day in the same way traditional models already treat the choice of destination and the choice of mode. A major point in that context is the question of how to separate the effects of traffic quality and traffic control measures from basic preferences concerning the choice of time of the day. As and answer actual demand time series for several trip purposes in the study area have been developed from empirical questionnaire data. Secondly an integral sequence of traffic quality for all relevant transport modes as a measure for transport disutility at different times of the time was developed. The time series of undisturbed transport demand is calculated from the mentioned empirical base such, that the undisturbed demand is higher than the actual demand in time intervals of high transport disutility (low traffic quality) and lower than the actual demand in time intervals of low transport disutility (high traffic quality). The idea behind the procedure is the assumption that actual transport demand is already influenced (disturbed) by the varying quality of the transport systems in the course of the day and this influence has to be removed from the actual time series to obtain the primary time series of transport demand (as in the condition of an optimal transport environment). All these procedures have been performed for several trip purposes separately.

The demand model requires temporally differentiated deterrence matrices for all modes considered in the study area. These matrices contain typical data for each mode, that characterises transport disutility in between all traffic cells. The deterrence data for each mode is aggregated to compatible assessment values by the help of suitable grading algorithms. Transport demand of each traffic cell is hence distributed to all available destinations, modes and time intervals simultaneously. The primary time series of transport demand is the base line of demand flow. The actually modelled demand differs from it according to the actual traffic quality variation for each origin-destination pair represented by the differentiated deterrence matrices. The final demand matrix is constrained only by total daily demand of origins and destinations, while modal split and temporal demand flow are endogenous results of the modelling process. For each trip purpose the ultimate result is a four-dimensional transport demand matrix with dimensions: origin, destination, mode and time interval.

The model has been implemented as an experiment for the Stuttgart region in southern Germany. The apportionment in 624 traffic cells stems from the regional transport master plan, while four transport modes and 24 intervals for the hours of the day were considered. The required temporally differentiated deterrence matrices for motorised road traffic (PV) and public transport (PT) were calculated with modelling tools from the research project: 'Steps towards

sustainable mobility in Stuttgart region'. A new approach was required to assess short distance trips in or between neighbouring traffic cells for non-motorised transport as walking and cycling. Also the deterrence matrices for PV and PT had to be expanded by internal values for all traffic cells.

The modelling concept mentioned was built and calibrated for the base year of 1995. As far as control data is available it does represent reality fairly well. Trip length distribution seems reasonable by trip purpose and transport mode. Cyclic peak loads and unsymmetrical traffic loads on the road network are mapped very well. The global mode split can be calibrated according to global control data; on individual origin-destination-pairs the split turns out according to the actual supply parameters of different transport modes. The time series' of demand in the model are influenced by the changing supply quality of transport systems in the course of the day and differ in the expected manner from the undisturbed primary demand curves that were calculated before.

A road pricing scheme was modelled to examine the sensitivity of the model for measures. The scheme was a simple entering cordon around the city of Stuttgart where a road toll was collected during morning peak hours. The model shows plausible reactions concerning spatial, modal and temporal transformation in the demand matrix. Primarily those trips are concerned with origin outside and destination inside the cordon. Yet the changes in route choice of most of the through traffic lead to a reduction in traffic quality in most parts of the study area. By that mechanism about all other o-d-pairs are also affected by the local measure. The scale of reactions depends on numerous assumptions that were only roughly estimated in the modelling experiment. Those behavioural assumptions had to be verified by empirical data before the road pricing scheme could be assessed in detail. The modelling concept permits adjustment of all relevant parameters in a wide range.

The experimental implementation proves, that choice of time of day can be integrated in a simultaneous transport demand model with the help of the presented concept. Yet the software application is still clumsy for handling and due to the enormous amount of data, which is generated even in a single run, modelling work is also very time consuming. Further research is required to integrate trip chains and return trips in a consistent manner. For the moment the available computer hardware did not allow any more extensive work.

1 Einführung

1.1 Vorbemerkung

Einprägsame tägliche Erfahrung vieler Mitbürger in unserem Lande sind Verkehrsstörungen und Staus auf den Straßen oder drangvolle Enge in den öffentlichen Verkehrsmitteln. Bei genauerer Betrachtung stellt sich heraus, daß diese regelmäßigen Überlastungen der Verkehrsinfrastruktur vornehmlich morgens und abends auftreten. Biologische und soziokulturelle Einflüsse motivieren viele Menschen gleichzeitig innerhalb enger Zeitfenster zu Ortsveränderungen. Unsere Verkehrssysteme zeigen sich vor allem im Umkreis der Ballungsräume diesen zyklischen Spitzenbelastungen nicht mehr gewachsen.

Noch nie wurde ernsthaft versucht, Verkehrsinfrastruktur und hier vor allem Straßenkapazität entsprechend der absolut höchsten vorstellbaren Nachfrage zur Verfügung zu stellen. Unregelmäßig und selten auftretende Spitzenbelastungen (Großveranstaltungen, Ferienbeginn, etc.) wurden und werden bei der kapazitativen Bemessung nicht berücksichtigt (Dimensionierung nach der 30. Stunde). Zunehmend gehören jedoch Überlastungen im Streckennetz zum werktäglichen Alltag vor allem der Ballungsräume. In der volkswirtschaftlichen Bewertung würden allein die Zeitverluste der Berufspendler mancherorts den Ausbau der Infrastruktur rechtfertigen. Die prekäre Situation der öffentlichen Haushalte und die Schwierigkeit der politischen Durchsetzungsfähigkeit von neuer oder erweiterter Verkehrsinfrastruktur lassen jedoch auf absehbare Zeit keine Trendwende bei der Bewältigung der Verkehrsprobleme erwarten. Vielmehr muß nach vielen Prognosen damit gerechnet werden, daß die Überlastungen noch deutlich zunehmen werden. Große Erwartungen werden daher in jüngerer Zeit in unterschiedliche Konzepte zur besseren betrieblichen Nutzung der vorhandenen physischen Infrastruktur gesetzt. Entwicklungsfortschritte in der Verkehrstelematik und rapide fallende Kosten für intelligente Steuerungstechnik lassen erwarten, daß verbesserte Betriebs- und Steuerungskonzepte zur Erhöhung der Kapazität in den meisten Fällen deutliche finanzielle Vorteile vor dem äquivalenten Ausbau der physischen Infrastruktur haben.

Wie eingangs erwähnt treten die Überlastungen heutzutage nicht während des ganzen Tages auf, sondern i. d. R. nur zu den Zeiten der Spitzennachfrage. Im weitaus größeren Zeitbereich eines Tages bewältigt die Verkehrsinfrastruktur die Nachfrage gut, bzw. ist sogar – zum Beispiel nachts – nur zu einem geringen Teil ausgelastet. Diese Tatsache begründet die Hoffnung, daß doch noch erhebliche Reserven in der bestehenden Infrastruktur vorhanden sind, die durch geeignete Methoden des Verkehrsmanagements aktiviert werden können. Ganz offensichtlich müssen solche Maßnahmen auf die zeitliche Verlagerung mancher Ortsveränderung und eine zeitliche Entzerrung der Spitzennachfrage abzielen. Für die Verkehrsplanung heißt dies, sich von einer statischen Behandlung der Nachfrageganglinie eines Tages abzuwenden hin zu einer dynamischen, maßnahmesensitiven Betrachtung. Bei Bemessungsberechnungen darf die Spitzenstundennachfrage nicht mit starren Faktoren aus der Tagesnachfrage herausgeschnitten werden, sondern muß als beeinflußbare Größe im Kontext behandelt werden. Dies hat selbstverständlich Einfluß auf die erforderlichen Werkzeuge des Verkehrsingenieurs. Wurden Nachfrageberechnungen bislang nur zweidimensional in der räumlichen Ebene des Untersuchungsgebietes, ohne explizite Berücksichtigung weder des genauen Startzeitpunktes noch der daraus resultierenden Dauer einer Ortsveränderung angestellt, so muß die zeitliche Komponente als dritte Dimension zukünftig stärker in die Modellierung ein-

bezogen werden. Der Übergang von der Ermittlung der Nachfragematrizen auf Tagesbasis zu kürzeren Zeitintervallen für die Dimensionierung der einzelnen Elemente des Verkehrssystems darf nicht mehr stereotyp erfolgen, sondern muß Maßnahmen zur zeitlichen Entzerrung realistisch abbilden.

1.2 Untersuchungsziel

Die Aufgabenstellung dieser Untersuchung wurde während der Bearbeitung des interdisziplinären Forschungsprojektes 'Wege zu einer umweltverträglichen Mobilität – am Beispiel der Region Stuttgart (WUMS)' an der Universität Stuttgart entwickelt[1]. Während einerseits die Datenbasis und viele Methoden und Werkzeuge aus dem Forschungsprojekt verwendet werden konnten, gelang es andererseits aus zeitlichen Gründen nicht, die Ergebnisse der Dissertation in vollem Umfang in das Forschungsprojekt zu integrieren. Der beschriebene Modellierungsansatz geht daher über das im Forschungsprojekt angewendete und beschriebene Verfahren hinaus. Im folgenden werden das Untersuchungsziel und die Randbedingungen beschrieben, die sich aus der Verknüpfung mit dem Forschungsprojekt und den verfügbaren Ressourcen und Datenbasen ergaben. Ausgangspunkt für die Fragestellung der Modellierung des Zeitwahlverhaltens von Verkehrsteilnehmern war der im folgenden beschriebene Aufgabenbereich innerhalb des Forschungsprojektes WUMS (Englmann, u. a., 1995):

Zur Verbesserung der Verkehrsverhältnisse in der Region Stuttgart sollen Maßnahmen diskutiert werden, welche die Spitzenbelastungen nicht nur räumlich, sondern vor allem zeitlich entzerren. Solche Maßnahmen sind beispielsweise:

- Erhebung einer zeitlich und räumlich gestaffelten Straßenbenutzungsgebühr
- Zeitliche Staffelung der ÖV-Tarife
- zeitliche Zufahrtsbeschränkung in bestimmte Gebiete
- zeitlich differenziertes Parkraummanagement

Diese Maßnahmen basieren auf der Annahme, daß in Schwachlastzeiten noch ausreichende Verkehrskapazitäten auf den Straßen und in öffentlichen Verkehrsmitteln zur Verfügung stehen. Wenn die Wirkungen dieser Maßnahmen auf die Zeitwahl der Verkehrsteilnehmer und das Verkehrsgeschehen abgeschätzt werden sollen, setzt dies eine adäquate modellmäßige Abbildung des Zeitwahlverhaltens voraus. Für eine realitätsnahe Abbildung der Zeitwahl sollten daher folgende Sachverhalte berücksichtigt werden:

- Die Wahl des Fahrtzeitpunktes wird geprägt durch die Randbedingungen der einzelnen Fahrt, wie z. B.:
  - Unterschiedliche Restriktionen aus den Aktivitäten. Der Arbeitsbeginn stellt i. A. eine härtere Randbedingung für die Zeitwahl dar als z. B. ein beabsichtigter Einkauf.
  - Die Bewertung von Zeit und Komfort variiert zwischen Fahrtzwecken. Ein Stau auf der Urlaubsfahrt wird oft weniger negativ bewertet als ein Stau im Berufsverkehr.
  - Die Größenordnung der zeitlichen Flexibilität: Der Umfang kann von wenigen Minuten bis zu Stunden betragen. Lange Verschiebungen resultieren u. U. in Fahrtverzicht oder anderer Fahrtorganisation.
  - Die Richtung der zeitlichen Flexibilität: Verschiebungen des Fahrtzeitpunktes werden nicht symmetrisch früher und später stattfinden.

[1] Einen Überblick über die Topologie des Untersuchungsgebietes geben Karte 1 und Karte 2.

- Fahrtenketten verursachen weitere, fahrtzweckübergreifende zeitliche Restriktionen. Der Verkehrsteilnehmer versucht sein Portfolio aus täglichen Aktivitäten und den dazu notwendigen Ortsveränderungen zu optimieren und richtet Beginn, Dauer und Ort einer Aktivität daran aus.
- Massive äußere Zwänge zur Änderung der Fahrtzeitpunkte können zu Änderungen der Aufgabenteilung und des Wochenzeitplans eines Haushaltes mit Konsequenzen für Verkehrsmittelwahl, Fahrtenhäufigkeit und Zielwahl führen.

Der zu entwickelnde Ansatz muß sich aus Gründen der Kompatibilität und der Datenverfügbarkeit in bereits bestehende Modellkomponenten einfügen. Dies bedeutet:

Während der Bearbeitungszeit dieser Arbeit wurde von der Region Stuttgart ein neuer Regionalverkehrsplan aufgestellt. Das mit dieser Aufgabe betraute Konsortium mehrerer lokaler Ingenieurbüros konnte bei seiner Arbeit auf Daten und Methoden früherer Untersuchungen im gleichen Raum zurückgreifen. Diese wurden durch aktuelle Erhebungen ergänzt und fortgeschrieben. Die Region Stuttgart wurde dazu in Verkehrszellen dritter und vierter Ordnung[2] eingeteilt, für welche Bevölkerungs- und einige Strukturdaten vorliegen. Für eine kleine Einwohnerstichprobe liegen Befragungsdaten zum Verkehrsverhalten auf Personenbasis und Aktivitäten-/Wegeprotokolle für einen Stichtag vor. Für diese Stichprobe wurden auch die üblichen personenbezogenen soziodemographischen Kenngrößen aufgenommen. Die Bevölkerung in den Verkehrszellen ist jedoch nur durch Alter und Geschlecht näher charakterisiert.

Auf Basis dieser Daten wurde ein disaggregiertes Erzeugungsmodell (9 verhaltenshomogene Gruppen nach Alter und Geschlecht) mit Wegekettenkontext aufgestellt und kalibriert (Programmpaket VISEM[3]). Die Nachfragematrizen für den motorisierten Individualverkehr (MIV) und öffentlichen Verkehr (ÖV) wurden jeweils getrennt (Programmpaket TRIPS[4] im MIV und VISUM[5] im ÖV) auf Netzgrafen der jeweiligen Verkehrssysteme umgelegt und die berechneten Querschnittsbelastungen mit realen Zählwerten abgeglichen. Im Zusammenhang mit der Untersuchung zum Zeitwahlverhalten ist interessant, daß die Nachfragematrizen für ganze Normalwerktage aufgestellt wurden, die Umlegung dann für ein Vier-Stunden-Intervall der Nachmittagsspitze erfolgte, und anschließend die berechneten Querschnittsbelastungen mit Faktoren wieder auf DTV-Belastungen hochgerechnet (extrapoliert) wurden.

Parallel zur Erstellung des neuen Regionalverkehrsplans wurde an der Universität Stuttgart das interdisziplinäre Forschungsprojekt ‚Wege zu einer umweltverträglichen Mobilität – am Beispiel der Region Stuttgart' bearbeitet. Auf Grundlage der Untersuchungsdaten zum Regionalverkehrsplan sollten die Umweltwirkungen des Verkehrs detaillierter modelliert und analysiert, sowie einige politisch extreme Szenarios zur Reduzierung der Umweltwirkungen angelegt und hypothetisch untersucht werden. Als Werkzeuge waren im Umweltbereich kommerziell erhältliche Softwarepakete vorgesehen, die für den großflächigen Einsatz in der ganzen Region angepaßt werden mußten. Im Verkehrsbereich erschienen die Möglichkeiten der aktuellen Pakete in mancher Hinsicht unzulänglich, so daß zum Teil eigene Softwarewerkzeuge geschaffen wurden. Im Vergleich zum Regionalverkehrsplan sollten vor allem den nichtmotorisierten Verkehrsarten Radverkehr und Fußgängerverkehr mehr Aufmerksamkeit gewidmet werden. Überlagert wurde diese Aufgabenstellung mit raumstrukturellen Überlegungen, wel-

[2] s. Kapitel 4.2
[3] ptv systems AG
[4] mva systematica
[5] ptv systems AG

che die Standortentscheidungen von Unternehmen und Haushalten aufgrund der verkehrlichen Erreichbarkeiten und Umweltbelastungen nachvollziehen sollten.

Die folgenden Randbedingungen wurden dadurch für den Modellierungsansatz festgelegt:

- Es soll ein deterministisches, reproduzierbares Modell[6] entwickelt werden, das die Verkehrsnachfrage in Form von Wahrscheinlichkeitsströmen berechnet.
- Es sollen vier Verkehrsträger (ÖV, MIV, Rad- und Fußverkehr) gleichwertig behandelt werden.
- Das Modell soll die Auswirkung von Maßnahmen zur Veränderung des Zeitwahlverhaltens sowie der Qualität des Verkehrsablaufs auf die Verkehrsnachfrage abbilden und quantifizieren.
- Die aufgestellten verhaltenshomogenen Gruppen sollen beibehalten werden. Der Ansatz modelliert das Verkehrsverhalten von Personen und nicht von Haushalten.
- Der disaggregierte, auf Aktivitätenketten aufbauende Erzeugungsansatz soll weiter verwendet werden. Es stehen jedoch keine Daten für vertiefende Differenzierungen zur Verfügung
- Die Einteilung der Region Stuttgart in Verkehrsbezirke ist festgelegt.
- Die bestehenden Netzgrafen und die Charakterisierung des Verkehrsangebotes (vor allem im ÖV) können nicht erweitert werden.
- Das Modell muß so in DV-Programme umgesetzt werden, daß in einer PC-Umgebung die Datenbasis für die gesamte Region Stuttgart bearbeiten werden kann.
- Spezielle eigene Datenerhebungen sind nicht vorgesehen.

Die Differenzierung des Zeitwahlverhaltens darf nicht zu weit gehen, wenn das Modell noch handhabbar bleiben soll. Für ökonomisch orientierte Modelle, wie sie Mahmassani (1990) oder Bhat (1998) entwickelt haben, ist die zur Verfügung stehende Befragungsstichprobe[7] zu klein. Exemplarisch ließen sich Modelle für einzelne, stark besetzte Segmente (z. B. Arbeitsfahrt, männlich, 30-35 Jahre, 1 Pkw im Haushalt, 2 Kinder unter 10) aufstellen und schätzen aber die geforderte Abdeckung aller Segmente wäre nicht möglich. Die erforderlichen soziodemographischen Daten stehen auch nicht differenziert für die Einwohner der Verkehrszellen zur Verfügung. Zeitlich-räumlich hoch differenzierte Angebotsparameter der Verkehrssysteme ließen sich berechnen, ihre Verarbeitung würde jedoch die Handhabbarkeit des Modells stark beeinträchtigen.

Für den rational handelnden Verkehrsteilnehmer soll im Rahmen der Untersuchung unterstellt werden, daß er die Wahl des Fahrtantrittzeitpunktes unter Nutzen-Kosten-Gesichtspunkten

[6] im Gegensatz zu einer (stochastischen) Simulation, die mehrmals durchlaufen werden muß, um Verteilung und Mittelwerte der Ergebnisse bestimmen zu können.

[7] s. Kapitel 4.4.3

trifft. Er führt eine Aktivität dann durch, wenn die Bilanz aller mit ihr verknüpften Nutzen[8]- und Kostenterme positiv ausfällt. Wenn zur Durchführung der Aktivität ein Ortswechsel erforderlich ist, schlägt dieser (ökonomisch) als negativer Nutzen, als Kostenfaktor, zu Buche. Wenn die mit einer Aktivität verbundenen Kosten (u. a. des erforderlichen Ortswechsels) den Nutzen aus der Aktivität übersteigen, wird das Individuum auf die Durchführung der Aktivität (und damit auch den Ortswechsel) verzichten.

Diese Überlegung ist nicht neu und findet sich beispielsweise bei Supernak (1990). Für die Untersuchung der Fahrtzeitpunkte kann man jedoch den angesprochenen Nutzen- und Kostentermen jeweils noch zwei zeitliche Dimensionen geben: die Dauer und den Zeitpunkt der Aktivität bzw. des Ortswechsels.

Die Zeitdauern von Aktivitäten wie von Ortsveränderungen werden in Erklärungsmodellen auch heute schon berücksichtigt. In beiden Fällen wird diese Zeitspanne nicht linear in Nutzen (bei Aktivitäten) oder Kosten (bei Ortsveränderungen) umgerechnet. Der Erkenntnis, daß sich der Nutzen einer Aktivität (der Konsum) durch längere Dauer (größere Menge) nicht linear erhöht, wird in der Ökonomie durch das Konzept des abnehmenden Grenznutzens des Konsums Rechnung getragen. In der Verkehrswissenschaft wird die Dauer des Ortswechsels nicht linear in Kosten übersetzt, häufig kommen hier logistische Funktionen zum Ansatz, die bei ganz kurzen und extrem langen Reisezeiten wenig elastisch reagieren.

Wang (1994) stellt einen Ansatz vor, der den Nutzen aus der Durchführung einer Aktivität vom Zeitpunkt der Durchführung im Verlauf eines Tages abhängig macht. Da unterschiedliche Aktivitäten auch unterschiedliche optimale Zeitfenster im Tagesverlauf haben, kann er mit diesem Modell die Reihung und Terminierung von Aktivitäten im Laufe eines Tages nachvollziehen und vor allem auch der Neuanordnung und Anpassung von Aktivitäten aufgrund von erforderlichen Ortswechseln zur Durchführung der Aktivität Rechnung tragen. Variable Dauer von Aktivitäten zur Erhöhung des Nutzens behandelt Wang nicht. Er erweitert seinen Ansatz, um auch vom Fahrtzeitpunkt abhängige, dynamische Kosten der Ortswechsel (Stau in den Spitzenstunden eines Tages) berücksichtigen zu können. Die erforderlichen Algorithmen zur Optimierung der Aktivitätenreihung überfordern bei der angestrebten hohen Auflösung von Aktivitäten und Zeitfenstern jedoch seine Möglichkeiten der Datenverarbeitung. Der Modellierungsansatz wirkt sehr vielversprechend, enthält jedoch so viele Freiheitsgrade, daß die Umsetzung nur in einem Simulator möglich erscheint.

Zurück zum rational handelnden Verkehrsteilnehmer (homo oeconomicus): Er versucht bei konstanten Kosten einer Fahrt den größten Nutzen aus der Wahl des Fahrtzeitpunktes zu erzielen bzw., wenn der Nutzen des Ortswechsels unabhängig vom Fahrtzeitpunkt ist, diesen

[8] In dieser Arbeit werden die Begriffe Nutzen und Kosten als Äquivalente der aus der angelsächsischen Literatur bekannten Terme utility und disutility verwendet. Der Nutzen einer Handlung bezeichnet alle subjektiv positiv bewerteten Zustandsänderungen materieller und immaterieller Art. Diese reichen von quantifizierbaren materiellen Werten (z. B. monetärer Verdienst aus Erwerbstätigkeit) über nicht quantifizierbare materielle Werte (z. B. Vermeiden des Hungergefühls durch Mittagessen), quantifizierbare immaterielle Werte (z. B. Zeitgewinn durch Verwenden eines schnelleren Verkehrsmittels) bis zu nicht quantifizierbaren immateriellen Werten (z. B. Verbesserung der langfristigen beruflichen Perspektiven durch Bildung). Als Kosten werden alle subjektiv negativ bewerteten Faktoren bezeichnet, die mit einer Handlung verknüpft sind. Für Ortsveränderungen könnten dies z. B. Fahrtkosten, Zeitaufwand, physische und psychische Belastungen oder Einschränkungen sein.
Die Frage, ob die Ortsveränderung an sich auch unmittelbare positive Nutzenterme besitzt, wird in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Die Analyse der Aktivität 'Spazierfahrt mit dem Pkw' legt immerhin nahe, daß der subjektiv empfundene Nutzen aus z. B. Fahrkomfort, Landschaftseindrücke, Fahrzeugbeherschung, Gemeinschaftserlebnis, Besitzerstolz oder Prestigegewinn vor den subjektiv empfundenen Kosten von z. B. monetäre Betriebs- und Vorhaltekosten, Lärm, Stau oder Reinigungsaufwand überwiegt.

mit den geringsten Fahrtkosten vorzunehmen. Wenn sowohl der Nutzen aus der Durchführung der Aktivität als auch die Kosten für den erforderlichen Ortswechsel vom Zeitpunkt im Tagesverlauf abhängen, sowie Fahrt und Aktivität zeitlich gekoppelt sind, ist der günstigste Zeitpunkt derjenige mit dem größten Nutzenüberschuß.

Als Nutzenmaximierung wird man in diesem Zusammenhang die Bestrebung sehen, die beabsichtigte Tätigkeit am Zielort in einem bestimmten Zeitraum durchführen zu können bzw. das zur Verfügung stehende Zeitbudget eines Tages durch sinnvolle Reihung der Tätigkeiten und Ortswechsel möglichst ökonomisch zu verwenden. Dabei muß natürlich beachtet werden, daß unterschiedliche Tätigkeiten unterschiedlichen zeitlichen Restriktionen unterliegen, die zu internen Zielkonflikten in der Zeitplanung führen können. Diese Randbedingungen können ganz unterschiedlicher Art sein, wie die folgenden Beispiele zeigen:

- Arbeitszeitbeginn gemäß betrieblicher Regelungen (z. B. 7.00 - 9.00 Uhr)
- Arbeitszeitbeginn unter Berücksichtigung der Tagesarbeitszeit und geplanter anschließender Aktivität (8 Std. Arbeit **und** Ämterbesuch vor 18.00 Uhr)
- Arbeitszeitbeginn unter Berücksichtigung anderer verknüpfter Termine (Kinder bis 8.00 Uhr in den Kindergarten bringen)

Als (variable) Kosten der Fahrt kann man z. B. die Reisezeit, evtl. die Betriebskosten und dynamisch veränderliche Straßenbenutzungs- oder Parkgebühren und ggf. die Suchzeit für einen Parkplatz (bzw. den zusätzlich zurückzulegenden Fußweg von diesem) quantifizieren. Durch die unterschiedliche Varianz der Reisezeit zu unterschiedlichen Tageszeiten treten implizit auch 'schedule delay' costs[9] als variable Kosten der Fahrt auf. Diese Terme sind quantifizierbar und werden nach allgemeiner Meinung fast immer negativ gewertet. Die Höhe der Bewertungskoeffizienten dagegen ist subjektiv und läßt sich empirisch nur schwer festlegen.

Viele andere mit dem Vorgang der Ortsveränderung verknüpfte Aspekte lassen sich entweder nicht quantifizieren oder es ist unklar, ob sie im Einzelfall als subjektiv positiv oder negativ angesehen werden. In der Verkehrsmodellierung werden sie im Allgemeinen als Störgröße oder Streuung des quantifizierbaren Anteils der Kosten einer Ortsveränderung behandelt. Die Hypothesen über die Verteilung dieser Störgrößen bilden das Fundament für die Entwicklung von Logit- oder Probit-Modellen. In dieser Arbeit werden die differenzierten Kostenterme einer Ortsveränderung jedoch nicht weiter untersucht. Sofern notwendig, werden die Kosten ausschließlich durch die quantifizierbaren Größen wiedergegeben.

- Wenn sowohl der Nutzen wie die Kosten einer Fahrt unabhängig vom Fahrtantrittszeitpunkt sind, sollten sich die Zeitpunkte der Fahrten gleichmäßig über den ganzen Tag verteilen (Abbildung 1-1).
- Bei konstanten Kosten und einem nur während einer bestimmten Zeit erzielbaren Nutzen müßten sich die Fahrten auf diesen Zeitraum beschränken (Abbildung 1-2).

[9] Wenn ein Verkehrsteilnehmer eine Aktivität zu einem genau festgelegten Zeitpunkt an einem anderen Ort beginnen will und die erforderliche Reisezeit nicht bekannt bzw. variierend ist, wird er versuchen so frühzeitig aufzubrechen, daß er mit einer von ihm angestrebten Wahrscheinlichkeit nicht zu spät eintrifft. In vielen Fällen wird er eine Wartezeit vor Beginn der Aktivität akzeptieren, um nicht, bzw. nur selten mit der Situation konfrontiert zu sein, zu spät zu kommen. Der optimale Zeitpunkt für den Beginn der Ortsveränderung hängt dabei von der erwarteten durchschnittlichen Reisezeit, ihrer erwarteten Streuung und der subjektiven Bewertung möglicher Verspätungen bzw. Wartezeit vor der Aktivität ab. Im Mittel treten durch die variierende Reisezeit also Zeitverluste (Wartezeit) bzw. Nachteile wegen Verspätung auf. Diese Kostenterme (disutility) werden als schedule delay costs bezeichnet.

- Wenn andererseits der Nutzen über einen Tagesabschnitt konstant wäre und die Kosten (Reisezeiten) variieren, werden die Verkehrsteilnehmer die Zeiten mit den geringsten Kosten für ihre Fahrt wählen (Abbildung 1-3).

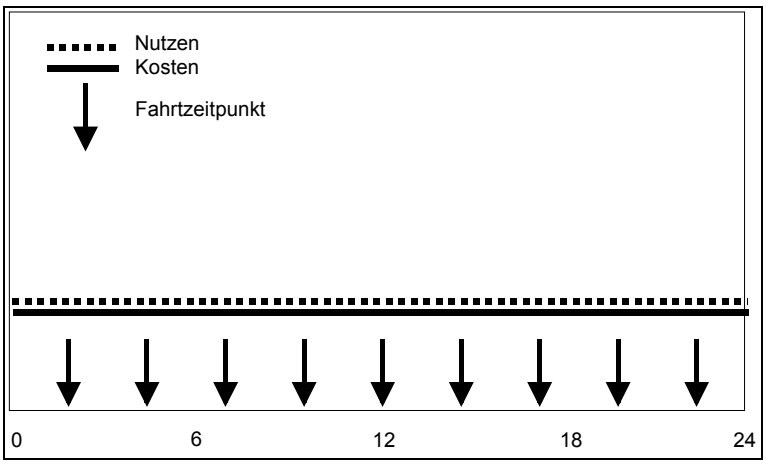


Abbildung 1-1: Konstante Kosten bei konstantem Nutzen über den Zeitraum eines Tages

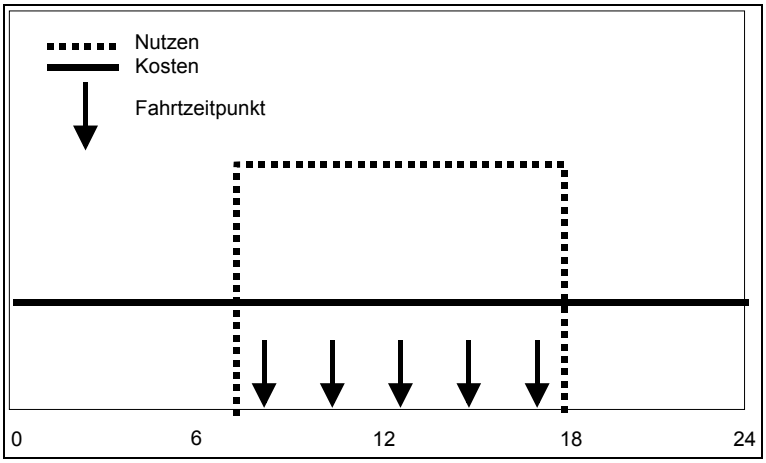


Abbildung 1-2: Konstante Kosten bei zeitlich begrenztem Nutzen

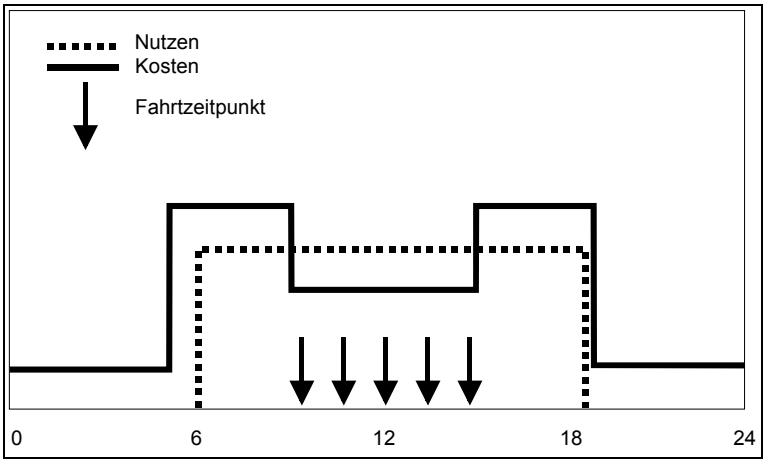


Abbildung 1-3: Zeitlich variable Kosten bei zeitlich begrenztem Nutzen

Herkömmliche Verkehrsmodelle konzentrieren sich auf die Nachbildung der Kosten einer Fahrt. In Algorithmen werden beispielsweise Betriebskosten, Entfernung, Reisezeit, Umsteigehäufigkeit oder Bequemlichkeit zu einer bewerteten Widerstandsgröße verknüpft. Implizit

wird unterstellt, daß der Nutzen aus der Aktivität, zu deren Durchführung die Ortsveränderung durchgeführt wird, die Kosten der Ortsveränderung übersteigt, andernfalls würde die Aktivität – und damit auch die Ortsveränderung – gar nicht durchgeführt. Der Nutzen aus der Aktivität, der eigentliche Antrieb für die Ortsveränderung, wird in der Verkehrsmodellierung nur für die räumliche Verteilung der Verkehrsnachfrage herangezogen. Ziele mit hoher Attraktivität (hoher Nutzen) ziehen mehr Nachfrage auch aus weiter entfernten Quellen an. Es wird jedoch unterstellt, daß der Nutzen aus der Durchführung der Aktivität an jedem Zielort zu jeder Zeit jeweils gleich hoch ist; die Auswahl von Verkehrsmittel und Uhrzeit richtet sich alleine nach den variierenden Angebotsparametern der Verkehrsmittel.

Der zeitlich dynamische Aspekt des Nutzens, der dem Verkehrsteilnehmer daraus erwächst, daß er genau zu einem bestimmten Zeitpunkt die Fahrt beginnt und nach Ablauf der Reisezeit sein Ziel erreicht und dort eine nutzenspendende Aktivität durchführen kann, wird nicht untersucht. Verkehrsmodelle arbeiten in der Regel mit konstanten, empirisch ermittelten Nachfrageganglinien, die nach Möglichkeit für unterschiedliche Fahrtzwecke differenziert sind. Da der Nutzen eines bestimmten Fahrtzeitpunktes nicht berechnet wird, können auch Veränderungen seiner Wahl nicht endogen modelliert werden.

Mit dem bekannten Instrumentarium der Verkehrswissenschaft kann die zeitliche Dynamik der Kosten einer Ortsveränderung bereits hinreichend abgebildet werden. Die quantifizierbaren Angebotsparameter lassen sich zeitlich differenzieren und die nicht quantifizierbaren Anteile der Widerstandsfunktion können weiterhin als Störterme behandelt werden. Die wesentliche Schwierigkeit besteht in der zeitlich dynamischen Beschreibung des Nutzens aus der Durchführung einer Aktivität. Hier liegt der Schlüssel zur erfolgreichen Modellierung des Zeitwahlverhaltens der Verkehrsteilnehmer.

2 Stand der Forschung

2.1 Vorbemerkung

In diesem Kapitel werden die dem Autor bekannt gewordenen Arbeiten vorgestellt, die sich im engeren oder weiteren Sinn mit der Wahl des Fahrtzeitpunktes von Verkehrsteilnehmern beschäftigen. Die Recherche beschränkte sich im wesentlichen auf die deutsche und englische Literatur. Dabei fällt auf, daß die Mehrzahl der Veröffentlichungen aus dem angelsächsischen Raum stammen. Die Wahl der Fahrtzeitpunkte ist offensichtlich bisher in der deutschen Verkehrswissenschaft kein wichtiger Untersuchungsgegenstand. Der Überblick über die aktuellen Forschungsergebnisse im europäischen Ausland (insbesondere Frankreich, Spanien, Italien, Niederlande) ist unvollständig; in den wichtigen internationalen Veröffentlichungsorganen finden sich keine Hinweise auf weitergehende Arbeiten zur Modellierung des Zeitwahlverhaltens von Verkehrsteilnehmern aus diesen Ländern.

Die hier im folgenden vorgestellte Arbeiten lassen sich in vier Gruppen einteilen:

- Ökonomische Modelle zur Beschreibung des Individualverhaltens. Diese theoretischen Arbeiten liefern einen wichtigen Beitrag zum Verständnis der unterliegenden, ökonomischen Mechanismen, die zum rationalen Verhalten der Wirtschaftssubjekte führen. Die jeweilige Theorie wird an griffigen Beispielen und nicht mit Hilfe statistisch abgesicherter ökonometrischer Daten entwickelt. Der Versuch der Quantifizierung von Einflußgrößen wird nur in seltenen Fällen unternommen.
- Mathematisch aufwendige Gleichgewichtsmodelle zur Beschreibung von Kollektiven. Im Kontext von extrem vereinfachten Randbedingungen werden Algorithmen zur expliziten oder numerischen Lösung komplexer Gleichgewichtszustände vorgestellt. Die gründliche Behandlung einzelner Details der Modellierung geschieht dabei auf Kosten der allgemeinen Anwendbarkeit und Handhabbarkeit des Ansatzes.
- Empirische Untersuchungen und Erklärungsansätze. In diesen Arbeiten wird versucht, bestimmte Verhaltensweisen (abhängige Größe) mit Hilfe umfangreicher Erhebungen zu dokumentieren und mit den simultan erhobenen Randbedingungen (unabhängige Einflußgrößen) der jeweiligen Beobachtung zu erklären. Als mathematisches Werkzeug dienen meistens Regressionsmodelle unterschiedlicher Ausprägung. Für die Erklärung der Fahrtzeitpunkte ergeben sich Schwierigkeiten sowohl bei der Quantifizierung, bzw. Beschreibung des Verkehrsverhaltens als auch bei der Erhebung und Zuordnung relevanter Einflußgrößen.
- Prognosemodelle der Verkehrsnachfrage. Die Ergebnisse der drei oben beschriebenen Gruppen werden in anwendbare Modelle eingebracht. Neben den theoretischen Ansätzen spielen die Verfügbarkeit differenzierter Daten zur Überprüfung und Kalibrierung, die Prognosefähigkeit der Einflußgrößen, aber auch die Handhabbarkeit und das Laufzeitverhalten des implementierten DV-Programms eine wichtige Rolle. Aus pragmatischen Gründen müssen oftmals gravierende Vereinfachungen bei den theoretischen Ansätzen in Kauf genommen werden.

2.2 Ökonomische Modelle

Das Fundament ökonomischen Verständnisses für die hier vorgestellte Dissertation bilden die Arbeiten von Jan Supernak (1990) und James Jixian Wang (1994). Sie betrachten die Ortsveränderungen von Personen aus der Perspektive der Ökonomen und entwickeln differenzierte Kosten-Nutzen-Konzepte zur Begründung unter anderem der Zeitwahlentscheidungen.

Supernak (1990) verfolgt ein Konzept, in dem er konsequent den Nutzen (utility), der aus der Durchführung einer Aktivität entsteht, mit den zur Durchführung der Aktivität notwendigen Kosten (disutility) verknüpft. Aktivitäten werden nur dann durchgeführt, wenn die Bilanz aller Nutzen und Kosten positiv ausfällt. Als Nutzen werden dabei die Effekte betrachtet, die der kurz- oder auch langfristigen Bedürfnisbefriedigung dienen. Kosten sind alle erforderlichen Aufwendungen, um die Aktivität durchführen zu können, bzw. die Bedürfnisbefriedigung erreichen zu können. Neben monetären Kosten und (unangenehmen) Vorbereitungen oder Vorarbeiten für eine Aktivität zählt Supernak auch jede erforderliche Ortsveränderung zu den Kosten.

Im Zusammenhang mit dieser Arbeit ist bedeutsam, daß eine Nutzen/Kostenfunktion über die Zeit definiert wird, die von den mikroökonomischen Konzepten der Grenznutzen bzw. Grenzkosten abweicht. Die „Menge“ der Bedürfnisbefriedigung und des Aufwandes wird nur in Zeit bemessen. Die Nutzen- und Kostenfunktionen für Aktivitäten und den damit einhergehenden Aufwand (z. B. Ortsveränderungen) werden in erster Näherung als konstant über die Zeit unterstellt. Die Nutzen und Kosten lassen sich über längere Zeiträume (z. B. Tage) integrieren, diese kumulierte Nutzen/Kostenfunktion ist deshalb abschnittsweise linear und stetig.

Individuen, die nach diesem Konzept ihr Portfolio an täglichen Aktivitäten planen, versuchen am Ende des Tages einen möglichst hohen Überschuß aus positiver Bedürfnisbefriedigung und dem dazu erforderlichem negativ bewerteten Aufwand zu erreichen. Die zeitliche Abfolge von Aktivitäten, ihr Beginn und ihre Dauer werden so geplant, daß die Aktivitäten möglichst hohen Nutzen bringen, während gleichzeitig die Kosten (u. a. für Ortsveränderungen) möglichst gering bleiben. In diesem Ansatz wird das Gesamtoptimum eines Tages gesucht; d. h., daß sowohl Beginn und Dauer einzelner Aktivitäten als auch die geplanten Ortsveränderungen isoliert betrachtet nicht optimal organisiert werden bzw. sogar negative Salden aufweisen können. Supernak geht soweit, daß u. U. sogar viel größere Zeiträume als Tage gemeinsam bilanziert werden müssen (als Beispiel führt er die jahrelange Investition in eine Ausbildung auf, die erst viel später erhöhten Nutzen in Form von höherem Lebensstandard verspricht).

Ein Einflußfaktor bei der Aktivitätenplanung ist damit die Qualität des Verkehrssystems. Wenn keine mächtigeren Randbedingungen aus Aktivitäten oder anderen Ortsveränderungen dagegen sprechen, kann ein Individuum versuchen, die Kosten der Ortsveränderung für eine spezifische Aktivität zu minimieren. Dazu zählen die Wahl des Verkehrsmittels, die Wahl des Fahrtzeitpunktes und die Routenwahl. Alle diese Entscheidungen müssen mit ihren Konsequenzen auf das gesamte Aktivitätenportfolio beurteilt werden.

Supernak kann mit seinem Ansatz eine ganze Reihe von Verhaltensbeobachtungen erklären. Erste Anwendung ist seine Erklärung für unterdrückte Fahrten. Wenn die Differenz aus Nutzen und Reiseaufwand aus einer Aktivität negativ ausfällt, wird die Aktivität (und die zugehörige Ortsveränderung) nicht durchgeführt. Schon kleine Veränderungen der Verkehrsqualität können dazu führen, daß die Differenz positiv wird und die Aktivität jetzt durchgeführt wird. Auch der Mechanismus, der zur Bildung von Fahrtenketten (eigentlich verketteten Aktivitäten) führt, kann leicht mit diesem Ansatz erklärt werden. Die verknüpften Aktivitäten sparen Kosten ein,

da weniger Reiseaufwand entsteht. Gleichzeitig kann mehr Nutzen aus Aktivitäten gezogen werden, da mehr Zeit zur Verfügung steht.

Für die Aufgabenstellung interessanter sind die Betrachtungen zur Wahl der Fahrtzeitpunkte. Die Tatsache, daß viele Verkehrsteilnehmer ihre Ortsveränderungen zu ungünstigen Zeiten der Spitzennachfrage durchführen, erklärt Supernak mit dem veränderlichen Nutzen mancher Aktivitäten zu unterschiedlichen Zeitpunkten einerseits, andererseits mit den Restriktionen die aus Fahrtenketten entstehen. Die Verkehrsteilnehmer optimieren nicht die Ortsveränderungen sondern die Summe aus Kosten der Ortsveränderung und Nutzen aus der anschließenden Aktivität.

Auch die Beobachtung, daß Verkehrsteilnehmer besonders bei Routineortsveränderungen sich nicht über alle alternativen Möglichkeiten des Transports informieren, sondern auf ein übliches Verkehrsmittel prejustiert sind, kann er mit dem zusätzlichen Aufwand für Informationsbeschaffung begründen. Gerade bei Routineortsveränderungen würde die Beschaffung vollständiger Informationen erheblichen Aufwand bedeuten, der nur in sehr seltenen Fällen eine Reduzierung der Transportkosten zur Folge hätte. Das Individuum sucht eine quasi-optimale Lösung, für die der Aufwand der Informationsbeschaffung in einem wirtschaftlichem Verhältnis zur Lösung steht. Ähnliches gilt für die offensichtlich suboptimale Zielwahl für manche Aktivitäten. Auch hier ist der Aufwand für die Suche nach dem absolut günstigsten (möglicherweise näher liegenden) Ziel zur Befriedigung eines bestimmten Bedürfnisses oftmals höher als der Transportaufwand zu einem bekannten, aber weiter entfernt liegenden Ziel.

Supernak stellt die folgenden Punkte zur Diskussion:

- Kumulierbarkeit von Nutzen und Kosten. Dies ist eine zentrale Hypothese des Ansatzes, die aus Sicht des Autors weder eindeutig bewiesen noch widerlegt werden kann. Zu beachten sind seine Überlegungen über die ganz unterschiedlichen Zeithorizonte, über die bilanziert (also auch kumuliert) wird. Dies kann von wenigen Stunden (Dauer des Aufenthalts am Badestrand) bis zu lebenslangen Prozessen (Ausbildung) variieren.
- Form der kumulierten Kosten/Nutzenfunktion. Zur Erläuterung seines Konzeptes benutzt der Autor abschnittsweise lineare Funktionen während der Dauer einer Aktivität bzw. einer Ortsveränderung. Er erklärt jedoch, daß die zugrunde liegenden Kosten- und Nutzenfunktionen höchst unterschiedliche Formen haben können und wohl nur in den seltensten Fällen tatsächlich konstant über die Zeit sind. Aus seiner Sicht sollten die kumulierten Funktionen stetig, monoton und kontinuierlich verlaufen.
- Entscheidungsgrundlage: Erwartungswert oder Echtzeiterfahrung. Entscheidungsgrundlage zur Durchführung vieler (vor allem regelmäßig wiederholter) Aktivitäten oder Ortsveränderungen dürfte die Erwartungshaltung des Individuums an den erzielbaren Nutzen bzw. die zu gewärtigenden Kosten sein. Nur in seltenen Fällen werden die Entscheidungen erst aufgrund der im Prozeß der Aktivität gemachten Erfahrungen getroffen; hierbei handelt es sich i. A. um korrigierende Eingriffe in den geplanten Verlauf der Aktivitäten.
- Welche Aktivitäten erfordern die zeitliche Differenzierung der Nutzenfunktion? Viele Aktivitäten und auch Ortsveränderungen lassen sich nicht sinnvoll auf halbem Wege abbrechen oder unterteilen. Eine solche Aktivität muß zu Ende geführt werden, um den ganzen Nutzen zu erzielen bzw. ein vorzeitiger Abbruch erzielt überhaupt keinen Nutzen. Es ist müßig über die Form der Nutzenfunktion für eine solche Aktivität zu streiten.
- Techniken zur Quantifizierung der Nutzenfunktionen in empirischen Untersuchungen

J. J. Wang (1994) beschäftigt sich in seiner Dissertation mit den Möglichkeiten, den Nutzen aus der Reihenfolge und zeitlichen Anordnung von täglichen Aktivitäten (timing utility) in Modellen zu erfassen und als Optimierungskriterium für beobachtete Aktivitätenketten zu verwenden. Der Einfluß der tageszeitlich wechselnden Verkehrsqualität ist in diesem Ansatz implizit enthalten. Der Autor geht von Hendersons Modell (1981) der kombinierten Minimierung von Reiseaufwand und Nachteilen wegen Abweichungen vom gewünschten Ankunftszeitpunkt (schedule delay costs) durch Verkehrseinflüsse aus. Gerade für die Fahrt zur Arbeit (Berufspendler) muß häufig die gewünschte Ankunftszeit am Arbeitsplatz mit besonders ungünstigen Verkehrsbedingungen und langen Fahrtzeiten erkauft werden. In diesem einfachen Ansatz (eine Route; gleichartige Pendler, die alle die selbe Ankunftszeit anstreben) führt die Optimierungsbetrachtung zu einer symmetrischen Verteilung der Ankunftszeitpunkte. Diese von Wang zu Recht kritisierte Vereinfachung möchte er mit der in seinem Ansatz enthaltenen, nicht symmetrischen Ausprägung der Kostenfunktion wegen Abweichung vom geplanten Zeitpunkt verbessern. Der Ansatz geht sogar über die isolierte Betrachtung der Zeitwahl für eine einzelne Ortsveränderung weit hinaus, indem alle wichtigen Aktivitäten (in- und aushäusig) optimiert im Tagesverlauf angeordnet werden. Zu diesem Zweck wird ein Indikator, der Terminplanungsnutzen (timing utility) der täglichen Aktivitäten eingeführt. Er bezeichnet den Nutzen, der einer handelnden Person daraus erwächst, die ausgewählten Aktivitäten in einer bestimmten Reihenfolge und innerhalb der gewünschten Zeitfenster durchzuführen. Dieser Nutzen ist unterschiedlich für unterschiedliche Aktivitäten und variiert naturgemäß über den Verlauf eines Tages. Er setzt sich aus aktivitätsspezifischen Komponenten, den Kopplungsbeschränkungen mit anderen Aktivitäten sowie physischen und institutionellen Beschränkungen zusammen. Diese Randbedingungen der Terminplanung sind zum Teil explizit formulierbar (Ladenöffnungszeit, Ankunftszeit eines Zuges) und zum Teil nur implizit vorhanden (die Verantwortung der Eltern, Zeit mit ihren Kindern zu verbringen). Obwohl eine Vielzahl identifizierbarer Beschränkungen die Reihenfolge und Terminierung von Aktivitäten beeinflussen, sind die Freiheitsgrade der Zeitwahl immer noch sehr groß. Letztlich wird das menschliche Verhalten zu großen Teilen von Gewohnheiten und Traditionen (Lebensstile) geprägt. Die Lebensstilforschung hat jedoch bis heute wenig Erkenntnisse zum Zusammenhang von Lebensweisen und der tageszeitlichen Anordnung von Aktivitäten geliefert. Der Schwerpunkt entsprechender Untersuchungen liegt gewöhnlich bei den zeitbezogenen Häufigkeiten und Durchführungsdauern von Tätigkeiten.

Der oben angesprochene Prozeß der Terminplanung wird in Wangs Modell dreistufig abgearbeitet. Zuerst werden aus allen potentiellen Aktivitäten diejenigen ausgewählt, die möglicherweise im Laufe eines Tages durchgeführt werden sollen. Es wird unterschieden zwischen biologischen (z. B. Essen, Schlafen) und rollenbedingten (z. B. Erwerbsarbeit) Zwangsaktivitäten sowie Wahlaktivitäten (z. B. Kino, Sport). Als nächstes müssen den ausgewählten Aktivitäten Durchführungsdauern und eine Reihenfolge zugewiesen werden. Randbedingungen sind dabei das gesamte zur Verfügung stehende Zeitbudget, sinnvolle Mindest- und Höchstdauern für einzelne Aktivitäten sowie exogene Beschränkungen der Zeitfenster, in dem einzelne Tätigkeiten durchgeführt werden können. Falls danach noch ein Spielraum bleibt, können die Startzeitpunkte für die einzelnen Aktivitäten innerhalb der Aktivitätenkette optimiert werden – ggf. unter Berücksichtigung der Verkehrsverhältnisse. Dieser Prozeß führt nicht unmittelbar zu einem optimalen Ergebnis, er muß vielmehr iterativ für unterschiedliche Aktivitäten-Sets und Reihenfolgen durchgeführt werden, bis ein hinreichend suboptimales Ergebnis gefunden wird.

Wang bemüht sich, die Anwendbarkeit des Ansatzes mit empirischen Daten aus dem kanadischen General Social Survey (GSS2) nachzuweisen. Der Modellierungsansatz benötigt einerseits differenzierte Informationen über die durchgeführten einzelnen Aktivitäten (Was, Wann, Wo, Wie lange, mit wem) in Verbindung mit den soziodemographischen Charakteristika der handelnden Personen. Andererseits wären umfangreiche stated preference Befragungen nützlich, um Aufschlüsse über die gewünschten Startzeiten und Dauern der Aktivitäten im Kontext genau festgelegter impliziter und expliziter Beschränkungen zu erhalten. Solche Daten existieren nicht, der GSS2-Datensatz muß daher als Quelle für revealed preference Informationen ausgewertet werden. Für die exemplarische Implementierung des Modells wählt der Autor ein soziodemographisch abgegrenztes Segment aller Befragten, aus: Erwerbstätige Männer und Frauen, die mit Partner und einem oder mehr Kindern über 5 Jahren zusammenleben.

Im ersten Schritt müssen die empirischen Daten so aufbereitet werden, daß für jede durchgeführte Aktivität der gewählten soziodemographischen Gruppe eine Dichte-Funktion für den Startzeitpunkt in Abhängigkeit von erklärenden Variablen aufgestellt wird. Im zweiten Schritt wird ein Algorithmus formuliert, der unter den gegebenen Randbedingungen (Auswahl der Aktivitäten, Verteilung der Wunschzeitpunkte für Aktivitätenbeginn, Aktivitätendauer) die Reihenfolge und Startzeiten der Aktivitäten optimiert. Gerade der zweite Teil der Aufgabenstellung erweist sich als einigermaßen komplex und erfordert erhebliche Beschränkungen in den Freiheitsgraden des Modells.

Es gelingt Wang schließlich, mit Hilfe seines Modells die Aktivitätenreihung der ausgewählten soziodemographischen Gruppe nachzuvollziehen. Der Ansatz optimiert dabei die Reihenfolge und die Startzeitpunkte der Aktivitäten auf Basis der Dichtefunktionen für den gewünschten Aktivitätenbeginn. Es ist zudem möglich, für bestimmte Aktivitäten die erforderliche Reisezeit zu berücksichtigen. Die Auswahl und die Dauer der einzelnen Aktivitäten sind vorgegeben. Die Zeitachse wird in 15 Minuten Intervalle eingeteilt. Im folgenden wird das Modell so erweitert, daß die Verschiebung des Arbeitsbeginns in Abhängigkeit von der zugehörigen, zu erwartenden Reisezeit (unterschiedliche Auslastung, Stau) im Kontext der Tagesaktivitäten abgebildet werden kann. Als wesentlichen Fortschritt gegenüber anderen Modellen sieht Wang die resultierende, nicht symmetrische Kostenfunktion, die aus der Verschiebung des Arbeitsbeginns nach vorne oder hinten resultiert.

Wangs Modell berücksichtigt bereits sehr viele Freiheitsgrade, die in der Zielsetzung dieser Dissertation angesprochen wurden. Es kann die Verschiebung des Startzeitpunktes einer Ortsveränderung als Reaktion auf veränderliche Verkehrsqualität berechnen. Dabei wird nicht der Zeitpunkt für diese eine Fahrt optimiert, sondern die gesamte Aktivitätenkette mit allen erforderlichen Ortsveränderungen im Laufe eines Tages berücksichtigt. Im Rahmen dieser Optimierung kann die Reihenfolge von Aktivitäten realistisch verändert werden.

Mit noch höherem Berechnungsaufwand ließen sich in dem Konzept die Auswahl und die Dauer von Aktivitäten als weitere Freiheitsgrade einbringen. Auch die Diskretisierung der Zeit in 15 Minuten Intervalle ist ein Kompromiß zur Begrenzung des Rechenaufwandes. Um die Auswirkungen kleiner Schwankungen in der Verkehrsqualität abbilden zu können, wäre eine erheblich feinere Auflösung der Zeit erforderlich. Problematisch für die allgemeine Anwendung in einem Verkehrsprognosemodell sind der immense Berechnungsaufwand, der bereits bei der Optimierung einer einzigen Aktivitätenkette auftritt und die hohen Datenanforderungen des Modells. Da – zu Recht – die Ortsveränderungen als abhängige Ereignisse der Aktivitäten be-

handelt werden, wären für jede soziodemographische Gruppe Aktivitätenprotokolle zu erheben, statt der in der Verkehrswissenschaft üblichen Wegebücher.

2.3 Gleichgewichtsmodelle

Die zweite Gruppe theoretischer Betrachtungen behandelt die mathematische Formulierung von komplexen Gleichgewichtsmodellen. Neben immer neuen Formulierungen von Gleichgewichtszuständen der Routenwahl unter Berücksichtigung der variierenden Bewertungskoeffizienten unterschiedlicher Gruppen von Verkehrsteilnehmern werden gelegentlich auch Probleme zur Berücksichtigung alternativer Verkehrsmittel oder eben der Abfahrtszeitpunkte behandelt. Die Betrachtungen stammen durchweg aus dem nordamerikanischen Raum, der gewaltige verhaltensähnliche Pendlerströme (commuters) und nur ein einziges wichtiges Verkehrsmittel kennt. Allen Gleichgewichtsmodellen gemein ist die Annahme vollständig verfügbarer Information für alle Beteiligten. Nur dann würde jeder Verkehrsteilnehmer die auf seinen persönlichen Präferenzen basierende optimale Verkehrsnachfrage nach Menge und Zeit unter ständiger Reflexion des Verhaltens der anderen Verkehrsteilnehmer suchen.

Bereits zu Beginn der 80-Jahre entwickelten De Palma, Ben-Akiva, u. a. (1983) mathematische Modelle um die Wahl des Fahrtzeitpunktes von Pendlern mit Funktionen der Nutzenmaximierung zu beschreiben. In seiner einfachsten Form besteht das Problem darin, die erforderliche Fahrzeit und die Abweichung vom angestrebten Ankunftszeitpunkt zu minimieren. Wesentliche Elemente des Modells sind eine Funktion, welche die Zeitverluste als Folge von Überlastungen im System beschreibt (belastungsabhängige Reisezeiten) und die – üblicherweise nicht symmetrische – Kostenfunktion der Abweichung vom gewünschten Zielzeitpunkt (Verspätung, bzw. zu frühes Erreichen). Diese variablen, vom Startzeitpunkt abhängigen, (Zeit-) Kostenkomponenten werden mit entsprechenden Bewertungsfaktoren gewichtet und gemeinsam minimiert. Für den vereinfachten Fall ohne Ziel-, Verkehrsmittel- oder Routenwahl und identischen Bewertungsfaktoren für alle Verkehrsteilnehmer kann eine allgemeine, eindeutige Lösung gezeigt werden. Der Ansatz dient jedoch auch als Fundament für Erweiterungen mit unterschiedlichen Bewertungsfaktoren, für Alternativrouten oder um die grundlegenden Wirkungsmechanismen von Straßenbenutzungsgebühren darstellen zu können.

Jauffred und Bernstein (1996) formulieren den Gleichgewichtsansatz der simultanen Routen- und Fahrtzeitpunktwahl aus der Sicht der abfahrenden Fahrzeuge. Während De Palma, u. a. (s. o.) die Anzahl der abfahrenden Fahrzeuge über die linear verlaufende Zeit berechnen, gehen die Autoren von der Größe der Nachfrage auf einer betrachteten Relation aus und berechnen die zeitlichen Abfahrtsraten so, daß jedes Fahrzeug die gleichen ‚generalised costs' erfährt. Kostenkomponenten sind die unbeeinflußte Reisezeit, Staukosten und ‚schedule delay costs'. Es wird der Anspruch erhoben, mit dieser Methode die Zeit als Kontinuum und den Fahrzeugstrom ggf. als diskrete Einzelfahrzeuge darstellen zu können. Alle bisherigen simultanen Ansätze in diesem Bereich verwenden diskrete Zeitintervalle, diskrete Routen und kontinuierliche Fahrzeugströme bzw. im besten Fall sowohl kontinuierliche Zeit als auch kontinuierliche Fahrzeugströme.

2.4 Empirische Untersuchungen

Zur dritten Gruppe zählen Untersuchungen, die das faktische Verkehrsverhalten zu erfassen und mit geeigneten Einflußgrößen zu erklären suchen. Für die Bearbeitung der Aufgabenstel-

lung sind Arbeiten nützlich, die den Einfluß der Verkehrsqualität und verkehrlicher Maßnahmen auf die Zeitwahlentscheidungen der Verkehrsteilnehmer quantifizieren. Eine Gruppe um Prof. Hani S. Mahmassani an der University of Texas at Austin und eine weitere Gruppe um Prof. Fred Mannering an der University of Washington in Seattle haben sich intensiv mit dieser Thematik beschäftigt. Eine wesentliche methodische Schwierigkeit bei der empirischen Erhebung besteht in der Abgrenzung, wann der Startzeitpunkt einer Fahrt überhaupt von verkehrlichen Randbedingungen beeinflußt wurde. Erhebungstechnisch viel gravierender ist jedoch die diffizile Aufgabe, das zur Verfügung stehende Verkehrsangebot und die Verkehrsqualität für eine befragte Fahrt nachträglich objektiv zu ermitteln. Die hier vorgestellten Untersuchungen beschränken sich aus Aufwandsgründen jeweils auf die Betrachtung von Fahrten zur Arbeit.

In zwei weiteren empirischen Untersuchungen werden Gesetzmäßigkeiten zwischen dem Reisezeitbedarf und bestimmten Eigenschaften der Fahrt, sowie zwischen der Höhe der Überlastung eines Verkehrsnetzes und der Breite der resultierenden Spitzenstunde untersucht.

Als erstes wird eine eher ungewöhnliche[10] Variante empirischer Forschung vorgestellt: die Experimente zum Zeitwahlverhalten, die Mahmassani unter Mitarbeitern der University of Texas at Austin durchgeführt hat.

Mahmassani arbeitet seit Mitte der 80er Jahre an Untersuchungen, um die Wahl des Fahrtzeitpunktes von Verkehrsteilnehmern besser zu verstehen und zu beschreiben. In den ‘80-Jahren führt er eine Serie von Experimenten an der Universität Austin, Texas durch (Mahmassani, 1990). Die Teilnehmer, Mitarbeiter der Universität, entscheiden täglich für eine simulierte Fahrt von zu Hause zur Arbeit, wann sie die Fahrt beginnen wollen. Harte Randbedingung ist dabei, daß die ‚Arbeitnehmer‘ nicht nach 8.00 Uhr am Arbeitsplatz eintreffen dürfen. Die Teilnehmer definieren zu Beginn des mehrwöchigen Experiments eine optimale Ankunftszeit, die sie täglich erreichen wollen. An jedem Tag des Versuchs müssen sie dann der Zentrale mitteilen, wann sie ihre virtuelle Fahrt beginnen würden. Anschließend wird entsprechend aller berichteten Abfahrtszeitpunkte die Belastung des Verkehrsnetzes (hier stark vereinfacht: eine, bzw. zwei Strecken) und die resultierende Fahrzeit jedes simulierten Verkehrsteilnehmers berechnet und den Probanden jeweils mitgeteilt. Im ersten Experiment müssen die Teilnehmer daraufhin unabhängig voneinander Konsequenzen für die Wahl des Fahrtzeitpunktes am nächsten Tag treffen. Ihre einzige Informationsquelle ist die resultierende Fahrtzeit aus ihrer eigenen Wahl des Fahrtzeitpunktes an den Vortagen. In einem zweiten Experiment werden die ‚Verkehrsteilnehmer‘ mit vollständigen Informationen über die Entwicklung des Fahrzeitbedarfs für alle plausiblen Abfahrtszeitpunkte versorgt. Im dritten Experiment wird die Hälfte der Teilnehmer mit externen Informationen versorgt, die andere Hälfte kann ihre Rückschlüsse nur aus den resultierenden Fahrzeiten gemäß der eigenen Wahl ziehen. Außerdem kommt jetzt eine elementare Routenwahl hinzu, da den Teilnehmern jeweils zwei alternative Strecken zur Verfügung stehen.

Untersucht wird jeweils, ob und wie schnell das jeweilige experimentelle Verkehrssystem konvergiert. Konvergenz bedeutete in diesem Zusammenhang, daß die Verkehrsteilnehmer nicht weiter versuchen, ihren Fahrtzeitpunkt bzw. ihre Route zu optimieren und die resultierenden Belastungen im System sich von Tag zu Tag nicht mehr verändern. Dieser Zustand stellt sich in den ersten beiden Systemen nach 20 bzw. 29 Tagen ein, das dritte Experiment erreicht

[10] ungewöhnlich, weil es sich dabei um 'stated preference' Untersuchungen an einem kommunizierenden, rückgekoppelten Kollektiv ohne expliziten Versuchsplan handelt.

vermutlich aufgrund der höheren Komplexität auch nach sieben Wochen keinen stabilen Zustand als es abgebrochen wird. Wesentliche Erkenntnisse aus den Experimenten sind:

- Das Experiment, in dem sich die Teilnehmer nur auf ihre eigenen Erfahrungen stützen können, erreicht schneller einen stabilen Zustand als das Experiment, in dem die Teilnehmer vollständigen Informationszugang haben. Allerdings erreicht das zweite Experiment einen vergleichsweise besseren Endzustand in dem Sinne, daß die gesamten Abweichungen aller Teilnehmer vom optimal gewünschten Ankunftszeitpunkt geringer sind. Das dritte Experiment, in dem Teilnehmer mit unterschiedlichem Informationszugang miteinander konkurrieren, erweist eine Überlegenheit der Gruppe mit besserem Informationsstand.
- Die Versuchsteilnehmer im dritten Experiment versuchen zuerst durch Veränderung des Startzeitpunktes ihren angestrebten Ankunftszeitpunkt zu realisieren. Erst wenn wiederholte Wechsel des Startzeitpunktes keine Verbesserung des Ergebnisses erbringen, bzw. zu großen Rückschlägen führen, wird auch Routenwechsel, meist in Verbindung mit gleichzeitigem Wechsel des Startzeitpunktes, durchgeführt. Zu berücksichtigen bleibt allerdings, daß die Routenwahl auf sehr abstraktem Niveau abgebildet wird. Zur Verfügung stehen jeweils nur zwei, vollständig voneinander getrennte Routen mit unterschiedlichen Grundleistungsfähigkeiten und Geschwindigkeiten.
- Das Ziel der Versuchsteilnehmer ist primär, die gewünschte Ankunftszeit zu erzielen und auf keinen Fall zu überschreiten (‚zu spät zur Arbeit kommen'). Die Versuchsteilnehmer haben keine Möglichkeit ihren gewünschten Ankunftszeitpunkt zu verschieben. Lediglich der angestrebte Zeitpuffer kann entsprechend der persönlichen Risikobereitschaft von den Probanden größer oder kleiner gestaltet werden. Die virtuelle Fahrzeit, die sich aus einem entsprechenden Startzeitpunkt ergibt, spielt daher in diesen Experimenten nachweislich nur eine nachgeordnete Rolle. Ob sich die überragende Wichtigkeit der schedule delay costs (Abweichung vom gewünschten Zeitpunkt) gegenüber den Zeitkosten der Reise auch auf die Realität übertragen läßt, muß offen bleiben.
- Mahmassani entwickelt Modelle, um das beobachtete Wahlverhalten der Versuchsteilnehmer in Abhängigkeit ihrer Erfahrungen der Vortage zu modellieren. Mit diesen Modellen werden Simulationsläufe mit unterschiedlich lang anhaltenden Störungen des Systems durchgeführt. Diese Simulationen konvergieren jeweils zu einem stabilen, allerdings immer unterschiedlichen, suboptimalen Zustand.

Auch in weiteren Arbeiten beschäftigt sich Mahmassani mit der Mobilität von Pendlern und ihrem Routen- und Fahrtzeitpunktswahlverhalten (Mahmassani, u. a., 1994 sowie Mahmassani, u. a. 1995). Umfangreiche Datenbasis für diese Arbeiten bilden Längsschnittdaten von Pendlern aus Austin und Dallas, Texas aus zwei Erhebungskampagnen in den Jahren 1989 und 1990. Nach einer zweistufigen schriftlichen Befragung können ca. 150 und 400 Tagebücher von jeweils bis zu zwei Wochen Dauer ausgewertet werden. Mahmassani und seine Mitarbeiter entwickeln verschiedene Indikatoren, um die Häufigkeit des Routen- oder Zeitpunktwechsels sowie die Variationen der Zwischenstops bei den Fahrten zur und von der Arbeit zu charakterisieren. Anschließend werden zahlreiche Modelle entwickelt, um diese Verhaltensweisen zu erklären. Neben sozioökonomischen Kenngrößen legt Mahmassani besonderes Augenmerk auf unterschiedliche Freiheitsgrade der Probanden im Bezug auf ihre Arbeitszeiten, auf mögliche Alternativrouten und auf die Nutzung aktueller Verkehrsinformationen. Wesentliche Ergebnisse sind:

- Die Pendler verändern ihre Abfahrtszeiten und Routen häufiger bei der Heimfahrt als bei der Fahrt zur Arbeit. Mahmassani führt dies auf die strengeren Beschränkungen der Ankunftszeit am Arbeitsort als zu Hause zurück.
- In Übereinstimmung mit den vorangegangenen Experimenten wird festgestellt, daß die Pendler auch in der Realität häufiger ihre Abfahrtszeitpunkte als die Routen variieren.
- Fast 40% der Heimfahrten wurden durch einen Zwischenstop unterbrochen. Bei ungefähr der Hälfte davon handelte es sich um regelmäßige Aktivitäten. Regelmäßige Stops (meistens Absetzen/Aufnehmen von Passagieren) hatten negativen Einfluß auf die Flexibilität des Abfahrtszeitpunktes.
- Obwohl große Schwierigkeiten bei der definitorischen Erfassung wechselnder Abfahrtszeiten bestehen, kann ausgesagt werden, daß bei deutlich über der Hälfte aller Fahrten von den jeweiligen Referenzzeiten abgewichen wurde. Generell kann große Flexibilität beim Startzeitpunkt der abendlichen Heimfahrt von der Arbeit unterstellt werden.

Es gibt Indizien, daß die Wahrscheinlichkeit für häufig wechselnde Abfahrtszeiten steigt, wenn die ‚übliche' Abfahrtszeit im Bereich der abendlichen Spitzenbelastung des Verkehrssystems liegt. Inwiefern implizite Erwartungen des Verkehrszustandes Einfluß auf die Wahl des Fahrtzeitpunktes haben, konnte mit den vorliegenden Daten nicht nachgewiesen werden. Mahmassani merkt an, daß bei der Diskussion der Wirkungen von Telematiksystemen die zeitliche Verlagerung von Fahrten bislang meistens ignoriert wurde.

Seit Mitte der 80er Jahre beschäftigt sich Mannering in Seattle mit den Reaktionen und Verhaltensstrategien von Pendlern bei Verkehrsstauungen. Basis dieser Arbeiten sind mehrere telefonische und schriftliche Befragungen. 1987 wurden Pendler telefonisch befragt, wie häufig sie ihre Route und den Abfahrtszeitpunkt für den Weg zum Arbeitsplatz im Monat ändern. Neben den üblichen sozioökonomischen Daten wurden Einschätzungen zur Verkehrsqualität und zum alternativen Verkehrsangebot der befragten Personen erhoben. Es wurden jedoch keine Kausalitäten abgefragt. Mannering (1989) entwickelt aus diesen Daten zwei Modelle, mit denen er die Wahrscheinlichkeit von Änderungen der Route oder Abfahrtszeit in Abhängigkeit der verkehrlichen und sozioökonomischen Kenngrößen bestimmen kann. Die Kenngrößen sind allerdings recht allgemein gehalten, so daß die inhaltliche Erklärung der signifikanten Variablen oftmals dünn ausfällt. Für das Abfahrtszeit-Verschiebungs-Modell sind die absolute Reisezeit, das Alter, der Ehestand und danach erst flexible Arbeitszeitregelungen die wichtigsten erklärenden Größen.

1988 wurden erneut Pendler befragt, inwiefern sie ihre Heimfahrt von der Arbeit zur Vermeidung ungünstiger Verkehrsverhältnisse verzögern. Ähnlich der ersten Befragung wurden sozioökonomische Daten und Informationen zu den verkehrlichen Randbedingungen der befragten Pendler erhoben. Mannering und Mohammad (1990) entwickeln daraus eine Reihe von Modellen um die generelle Wahrscheinlichkeit einer Verzögerung der Heimfahrt, die Häufigkeit und die Dauer solcher Verzögerungen abzubilden. Nicht überraschend ist das Verhältnis der erwarteten Fahrtzeit unter Staubedingungen zur normalen Fahrzeit die wichtigste Einflußgröße für diese Entscheidungen.

Ebenfalls 1988 wurde eine größere Anzahl von Pendlern auf einer wichtigen Einfallstraße Seattles schriftlich zu ihrer Wahrnehmung und ihren Reaktionen auf Verkehrsinformationen im Radio befragt. Mannering, u. a. (1994) entwickelten aus diesen Daten ähnliche Modelle wie aus der ersten Befragung zur Häufigkeit der veränderten Routenwahl.

Mohammadi (1997) beschäftigte sich intensiv mit den Schwankungen der Reisezeit auf unterschiedlichen Relationen in London. Ausgehend von älteren Ansätzen (Smeed, Jeffcoate, 1971 sowie Montgomery, May, 1983), nach denen die erforderliche Fahrzeit zu bestimmten Tageszeiten direkt vom Startzeitpunkt abhängig sei, bemühte er sich, Zusammenhänge zwischen der erforderlichen Fahrzeit und objektiv meßbaren Kriterien der jeweiligen Route nachzuweisen. Die Datenbasis der Untersuchung bestand im wesentlichen aus einwöchigen Aufzeichnungen von ca. 150 regelmäßigen Fahrtbeziehungen aus dem Jahre 1987. Es wurden wesentliche Randbedingungen jeder einzelnen Fahrt aufgezeichnet; bei der Modellierung erwies sich jedoch, daß die nachträglich herangezogenen prototypischen Verkehrsbelastungen der einzelnen Strecken nicht signifikant mit den Schwankungen im Reisezeitbedarf in Beziehung zu setzen waren. Das entwickelte Modell ist nur in London anwendbar. Die signifikanten Einflußgrößen sind:

- Entfernung,
- Anzahl Knotenpunkte/Meile,
- Fahrzeugtyp,
- Fahrt fand in der Spitzenstunde statt,
- Lage der Route innerhalb Londons,
- Hierarchiestufen der benutzten Straßen,
- Zwischenfälle
-

Die einzige Variable, die auf einen Zusammenhang zwischen dem Reisezeitbedarf und der Wahl des Fahrtzeitpunktes hinweist, ist die Information, ob die Fahrt in der Morgenspitze stattgefunden hat oder nicht. Leider wurde diese Information in der Befragung zeitlich nicht scharf definiert; außerdem läßt sich die allgemeine Information nicht mit spezifischen Verkehrsbelastungen auf einer ausgewählten Relation in Verbindung setzen.

Die Autoren William und Schultz (1992) entwickeln ein Modell, um den Anteil der in der absoluten Spitzenstunde liegenden Fahrzeit von Pkw-Fahrten im morgendlichen höchstbelasteten 3-Stunden-Intervall in Abhängigkeit von verkehrsbedingten Stauungen zu berechnen. Sie belegen anhand mehrerer Untersuchungen aus den USA, daß der Fahrtzeitanteil des morgendlichen 3-Stunden-Intervalls an der gesamten Fahrzeit eines Tages sowohl räumlich als auch zeitlich nahezu konstant ist. Wie groß der Anteil der absoluten Spitzenstunde an diesem Intervall ist, hängt nach der Meinung von Allen und Schultz an der Verkehrsqualität.

Für die Untersuchung in Washington D. C. wird das Intervall auf den Zeitbereich 6.00 – 9.00 Uhr festgelegt, die Spitzenstunden auf den Bereich 7.00 – 8.00 Uhr. Qualitätskriterium ist der Fahrzeitunterschied während der Spitzenstunde im Vergleich zum „freien“ Verkehrsfluß (off-peak travel time). Unklar bleibt, ob damit die Fahrzeit während den angrenzenden Stunden im Spitzenintervall oder die Fahrzeit im gänzlich unbelasteten Netz gemeint ist. Die Fahrten werden in 6 Fahrtzwecke und 5 Entfernungsklassen differenziert. Die Autoren stellen fest, daß mit zunehmenden Fahrzeitunterschieden der Anteil der Fahrzeit in der Spitzenstunde abnimmt. Einerseits haben geringe Fahrzeitunterschiede wenig Einfluß auf den Anteil, andererseits bleibt ein minimaler Anteil der Fahrzeit auch bei sehr großen Fahrzeitunterschieden immer in der Spitzenstunde. Das Ergebnis ist deshalb eine logistische Funktion, die vereinfacht als trilineare Kurve beschrieben wird. Es werden Parameter für alle Fahrtzwecke und Entfernungsklassen angegeben.

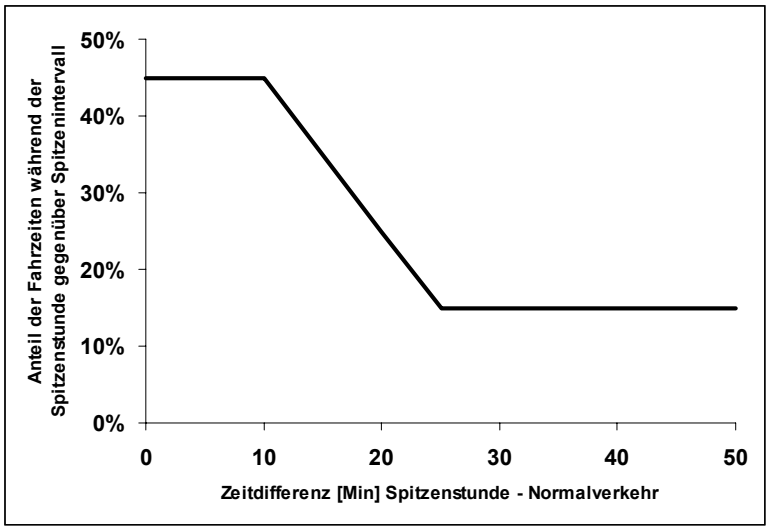


Abbildung 2-1: Prinzipielle Form der Modellfunktion zur Berechnung des Spitzenstundenanteils der Fahrzeiten am morgendlichen Spitzenintervall (nach William, Schultz, 1992)

2.5 Prognosemodelle

Im letzten Abschnitt dieses Kapitels werden zwei Modellkonzepte vorgestellt, die unter anderem die Wahl der Fahrtzeitpunkte unter Berücksichtigung des Verkehrsangebotes, der Verkehrsqualität und Maßnahmen zur Verkehrsbeeinflußung abbilden können. Es handelt sich dabei zum einen um die strategischen Modelle der MVA Consultancy, die im Rahmen des London Congestion Charging Research Programme entwickelt wurden. Zum anderen wird das Mitte der '90 Jahre an den Instituten für Straßen- und Verkehrswesen sowie Sozialforschung der Universität Stuttgart entwickelte Modell zur Abbildung der Wirkungen von städtischen Road Pricing Systemen vorgestellt. Diese Konzepte bieten zumindest rudimentär die Möglichkeit, die zeitliche Verlagerung von Fahrten als Reaktion auf steuernde Maßnahmen zu prognostizieren.

Die Herausforderung, mit beschränkten Ressourcen ein Modell zu entwickeln, mit dem sich in relativ kurzer Zeit eine Vielzahl von Maßnahmen und Entwicklungsstrategien testen ließ, führte in England zu Beginn der 90iger Jahre zur Entwicklung des ‚STrategic And Regional Transport models' (START) (Robert, Simmonds, 1997). Einerseits sollten alle verkehrlichen Wirkungen und Effekte verschiedener Strategien darstellbar sein, andererseits mußten die Laufzeit und der Auswertungsaufwand des Modells die Berechnung einer Vielzahl von Planfällen innerhalb kurzer Zeit erlauben. Das strategische Modell trägt diesem Umstand durch einen stark vereinfachten räumlichen Hintergrund (wenige Verkehrszellen, implizite Modellierung der Verkehrsinfrastruktur) Rechnung. Naturgemäß können dadurch nur globale oder wenigstens großräumige Strategien und keine lokalen Maßnahmen dargestellt werden. Das Inkrementmodell baut auf Daten der Verkehrsnachfrage und des Verkehrsangebotes zum Analysezeitpunkt auf, die entweder empirisch erhoben oder aus einem konventionellen, räumlich differenzierten Nachfragemodell abgeleitet werden. Das Modell versucht nicht, den beobachteten Analysefall zu erklären, sondern beschränkt sich auf die Darstellung der Veränderungen, die sich durch die Überlagerung der Wirkungen unterschiedlicher Maßnahmen ergeben. Die hierzu erforderlichen Daten zur Sensitivität bzw. Elastizität verschiedener Maßnahmen können – sofern verfügbar – aus lokalen Untersuchungen eingespielt werden, andernfalls werden sie

aus einer Vielzahl vorliegender Forschungsergebnisse übertragen. Während die Nachfragematrizen räumlich hoch aggregiert werden, müssen sie nach allen anderen Indikatoren (Fahrtzweck, verhaltensähnliche Gruppe, Verkehrsmittel, Uhrzeit) stark differenziert werden, um die Überlagerung verschiedener Maßnahmen darstellen zu können. Die Autoren merken an, daß das Modell sich zur Überprüfung globaler Strategien und Politikberatung eignet, anschließend müssen kleinräumige Untersuchungen und Umsetzungsplanungen unter Verwendung konventioneller Nachfragemodelle folgen.

Das Modellkonzept verspricht time-of-day-choice[11]. Bei genauerer Betrachtung beschränkt sich diese Option jedoch in den 6 dokumentierten Untersuchungen auf die Unterteilung eines Tages in zwei Spitzenstundenbereiche von wenigstens jeweils zwei Stunden und die dazwischenliegende Zeit bzw. den verbleibenden Rest des Tages. Differenzierte Untersuchungen zeitlicher Verlagerungen von Fahrten lassen sich deshalb nicht durchführen; die Wahl des Fahrtzeitpunktes wird tatsächlich nur über die Erzeugungsraten für die einzelnen Zeitintervalle berücksichtigt.

Auf Basis dieses strategischen Ansatzes wurden in den folgenden Jahren weitere Modelle erstellt. Im Rahmen des großangelegten London Congestion Charging Research Programme wurde eine ganze Serie hierarchisch aufeinander abgestimmter Modelle entwickelt. Das aus dem START-Paket weiterentwickelte Modell APRIL (Assessment of Pricing for Roads In London) stellt in diesem System ein strategisches Modell zur Abschätzung mittelfristiger Verlagerungen als Reaktion auf bestimmte Road Pricing Maßnahmen dar (Bates, u. a., 1996). Als endogene Freiheitsgrade stehen die Verkehrsmittelwahl, die Ziel- und Routenwahl und die Zeitwahl offen. Die Wahlentscheidungen werden in einem nested incremental logit model auf Basis der generalised costs sukzessive abgearbeitet. Die Autoren erkennen die Notwendigkeit, Fahrten im Zusammenhang der entsprechenden Fahrtenketten zu modellieren, treffen jedoch aus Aufwandsgründen erhebliche Vereinfachungen. Je nach Fahrtzweck und Ausgangspunkt (home based oder non home based) werden die Freiheitsgrade eingeschränkt. Als incremental model wird APRIL nicht kalibriert, sondern auf Basis eines empirischen Gleichgewichtszustandes werden die Verhaltensänderungen entsprechend den extern ermittelten Elastizitäten (z. B. mit stated-preference Methoden) angepaßt.

Im Zusammenhang mit einer Untersuchung in Bristol wurde das START-Paket von MVA speziell für die differenzierte Wirkungsanalyse von Parkraumbewirtschaftung und -beschränkung weiterentwickelt zum ‚Traffic Restraint Analysis Model' (TRAM) (Bates, u. a., 1997). Angebot und Nachfrage des Parkens müssen dabei erheblich differenzierter behandelt werden als im ursprünglichen Modell. Für den relevanten Innenstadtbereich erfordert dies ein detaillierteres Zonensystem um die räumliche Verteilung von Parkflächen und die resultierenden Zu- und Abgangszeiten zu den eigentlichen Zielen präzise darstellen zu können. Zudem werden einige unterschiedliche Arten des Parkens (öffentlicher Straßenraum, private Stellplätze, Parkhäuser, u. a.) eingeführt. Eine weitere wesentliche Änderung ist die explizite Modellierung der wichtigsten Streckenzüge des Straßennetzes. Nur das untergeordnete Netz wird weiterhin in Form von impliziten Kapazitäten zwischen angrenzenden Zellen dargestellt. In diesem Zusammenhang wurden die Datenformate für die Kodierung der Netze und Matrizen aus dem bekannten Modellbaukasten TRIPS übernommen.

[11] Die Zeitwahl wird genauso wie die Zielwahl, die Verkehrssystemwahl, die Wahl des Verkehrsmittels und/oder der Route als eine Schleife in einem hierarchischen Logit Modell abgebildet. Die Anordnung der Schleifen ist nicht vorgegeben, sondern sollte entsprechend den vorliegenden Erkenntnissen für jeden Fahrtzweck ausgewählt werden. I. A. wird die Zeitwahl als äußerste Schleife gewählt.

Die letzte wichtige Erweiterung des TRAM-Modells betrifft die Einführung von acht Zeitintervallen über den Tag. Diese Differenzierung erlaubt zum einen, Veränderung der Nachfragezeitpunkte darzustellen. Zum anderen können die veränderlichen Auslastungen der Parkflächen (Angebotsmodellierung) während des Tages in das Modell einbezogen werden. Bates spricht die Problematik der Fahrtenketten bei der Verschiebung von Fahrtzeitpunkten an. Aus Aufwandsgründen werden in diesem Modell nur Elementarketten (z. B. Wohnen-Arbeit-Wohnen) im Zusammenhang betrachtet. Aktivitätenübergänge zwischen Außer-Haus-Aktivitäten (z. B. Wohnen-**Arbeit-Einkauf**-Wohnen) werden als isolierte Fahrten nicht der Zeitwahlentscheidung unterworfen.

Die Behandlung der Elementarketten erfolgt durch Klassifizierung jeder Kette in eine eindeutige Kombination aus Zeitintervall r: Hinweg und Zeitintervall s: Rückweg. Zeitliche Verlagerungen dürfen nur in einen festgelegten, realistischen Bereich erfolgen (s. Abbildung 2-2).

Return Start	Morning shoulder	Morning peak	Inter peak	Evening peak	Evening shoulder	Night
Morning shoulder	Not likely	Not likely	Most likely	Likely	Not likely	Not likely
Morning peak		Not likely	Likely	**Original trip**	Likely	Not likely
Inter peak			Not likely	Likely	Most likely	Not likely
Evening peak				Not likely	Not likely	Not likely
Evening shoulder					Not likely	Not likely
Night						Not likely

Abbildung 2-2: Mögliche Verschiebungen der Fahrtzeitpunkte in Fahrtenketten (nach Bates, u. a., 1997)

Mögliche Verschiebungen aus dem ursprünglichen Gleichgewicht werden in diesem Inkrementmodell in Form eines hierarchische Logit-Modells auf Basis generalisierter Kosten berechnet. Wegen der Behandlung der Fahrtzeitpunkte in Form von Elementarketten müssen diese Kosten (monetäre Kosten und Zeitkosten) für ganze Ausgänge bestimmt werden. Nachdem im Rahmen der Erzeugung die Zeitintervalle für Start und Rückkehr von einem Ausgang bestimmt sind, werden die Ketten in einzelne Fahrten zerlegt und einem konventionellen Modal Split Ansatz unterzogen. Der Fahrtenkettenzusammenhang geht bei der Verkehrsmittelwahl verloren. Zu diesem Zeitpunkt werden auch die, von der Zeitwahl unbeeinflußten ‚non-home-based' Fahrten eingespielt.

Bezüglich der Modellierung der Wahl des Fahrtzeitpunktes unterscheiden sich APRIL und TRAM nicht wesentlich. Nur sogenannte ‚home-based' Elementarketten werden berücksichtigt. Bei beiden Modellen handelt es sich um hierarchische Logitansätze: die Wahl des Fahrtzeitpunktes erfolgt bei TRAM immer nach der Verkehrsmittelwahl, bei APRIL wird für den Fahrtzweck ‚home-based-other' (d. h. Einkaufen, Service, private Erledigung, etc.) angenommen, daß eine Veränderung des Fahrtzeitpunktes vor der Verkehrsmittelwahl realistischere Ergebnisse bereit hält. Bei den anderen Fahrtzwecken (Arbeiten, Ausbildung) wird wie in TRAM die Wahl des Fahrtzeitpunktes erst nach der Verkehrsmittelwahl vorgenommen. Es gibt eine beschränkte Anzahl von Zeitintervallen und die zeitliche Verschiebung einer Fahrtenkette

in ein anderes Start-Rückkehr-Segment aufgrund veränderter ‚generalised costs' darf nur in einem vorbestimmten realistischen Bereich erfolgen.

In dem Projekt 'Analyse, Systematisierung und Bewertung von Road Pricing-Systemen in städtischen Räumen' wurde an der Universität Stuttgart der Ansatz verfolgt, daß Verkehrsteilnehmer nur dann bereit sind, hohe Kosten für die Fahrt zu tragen, wenn ihnen auch entsprechend großer Nutzen aus dem Zeitpunkt der Fahrt erwächst (ISV, IfS, 1996). Das bedeutet, daß der Nutzen besonders hoch ist in Zeiten, in denen aufgrund hoher Verkehrsbelastung die Reisezeiten besonders lang sind (Zeitkosten). Monetäre Kosten wurden jeweils sofort in Zeitkosten umgerechnet, es gab daher nur eine Kostengröße (generalised costs). Die Grundattraktivität einer Zeitzone ergab sich aus der Anzahl der Verkehrsteilnehmer, die ursprünglich während eines Intervalls die Fahrt durchgeführt haben (empirische Ganglinie).

Dabei wird unterstellt, daß die Wahl des Fahrtzeitpunktes für den Bezugsfall 0 vor der Einführung der Road Pricing-Maßnahme im Gleichgewicht ist, d. h. daß jeder Verkehrsteilnehmer einen Fahrtzeitpunkt gewählt hat, in dem der verkehrliche Aufwand in geeigneter Relation zu seinem persönlichen Nutzen steht. Für jede Relation i - j und den Fahrtzweck α werden deshalb Nutzen und resultierende Kosten aufgrund des Fahrtantrittszeitpunktes in einem bestimmten Zeitintervall t proportional gesetzt:

$$N_t^0 \approx K_t^0 \qquad (\text{eigentlich: } N_{t,i,j,\alpha}^0 \approx K_{t,i,j,\alpha}^0) \qquad \text{(Formel 2-1)}$$

Die Nutzen/Kosten-Relation (verkehrliche Attraktivität q_t^0) ist also für jeden Zeitpunkt des Tages konstant (ursprüngliches Gleichgewicht, keine Verlagerung):

$$q_t^o = \frac{N_t^0}{K_t^0} = \text{const.} \qquad \text{(Formel 2-2)}$$

Wenn man diese verkehrliche Attraktivität mit der Grundattraktivität (ursprünglichen Fahrtenzahl) multipliziert, muß sich auch wieder die ursprüngliche Fahrtenzahl ergeben.

Die Veränderung der Kosten für eine bestimmte Zeitzone durch eine steuernde Maßnahme (hier Road Pricing) führt zur Veränderung der verkehrlichen Attraktivität q_t^{mit} für dieses Zeitintervall.

$$q_t^{mit} = \frac{K_t^0}{K_t^{mit}} + \beta \qquad \text{(Formel 2-3)}$$

mit t Zeitintervall t
0 Bezugsfall (Null-Fall)
mit Maßnahmefall (**Mit** Road Pricing)
β Kalibrierungsgröße

Im Falle einer Kostensteigerung im Zeitraum t gilt q_t^{mit} < 1,0; im Falle einer Kostensenkung gilt q_t^{mit} > 1,0

Die Anzahl der Fahrten n im Zeitraum t im Maßnahmefall 'mit' berechnet sich folgendermaßen:

$$n_t^{mit} = n_t^0 \cdot q_t^{mit} \qquad \text{(Formel 2-4)}$$

Es ist klar, daß mit diesem Rechenansatz die Fahrtenzahl nicht konstant bleiben kann. Eine Steigerung der Kosten über den ganzen Tag muß zu einer Abnahme der Fahrten insgesamt führen (q_t<1 gilt für den ganzen Tag). Im oben genannten Projekt, in dem nur vier Stunden der Morgenspitze modelliert wurden, mußte eine Fahrtenreduktion für den Untersuchungszeitraum ausgeschlossen werden, da in diesem zum einen die ("unverzichtbaren") Fahrten mit

"Zwangscharakter" (zum Arbeitsplatz, zur Ausbildungsstätte) dominieren, zum anderen aber generell keine Anhaltspunkte über den Umfang einer solchen Reduktion verfügbar waren. Die Anzahl der Fahrten nach der Maßnahme wurde deshalb mit folgender Normierung wieder an die ursprüngliche Fahrtenzahl angepaßt:

$$n_t^{mit} = \frac{q_t^{mit}}{\sum_{t=1}^{24} q_t^{mit}} \cdot \sum_{t=1}^{24} n_t^0 \qquad \text{(Formel 2-5)}$$

Die Gesamtsumme aller Fahrten ist dann vor und nach der Maßnahme gleich:

$$\sum_{t=1}^{24} n_t^{mit} = \sum_{t=1}^{24} n_t^0 = N \qquad \text{(Formel 2-6)}$$

Folgende Eigenschaften ergeben sich aus diesem Vorgehen:

- Die neue Fahrtenzahl hängt immer von der alten (empirisch ermittelten) Fahrtenzahl ab. In ein Zeitintervall, in dem vorher niemand gefahren ist, werden keine Fahrten verlagert.
- Die Verlagerung läßt die Größe der zeitlichen Verschiebung vom ursprünglichen Fahrtzeitpunkt unberücksichtigt. Fahrten werden in die Zeitintervalle verlagert, in denen (relativ) das Nutzen/Kosten-Verhältnis besser als der Durchschnitt ist und gleichzeitig schon vorher Fahrten stattgefunden haben. In den Road Pricing Modellierungen konnten die Verschiebungen nur innerhalb des Vier-Stunden-Intervalls stattfinden.
- Die Zeitwahlberechnungen lassen sich für alle Fahrtzwecke getrennt durchführen. Bestimmte Fahrtzwecke können dadurch von der zeitlichen Verlagerung ausgeschlossen werden. Der Nutzen, der einem bestimmten Zeitintervall zugewiesen wird, hängt jedoch von den (Zeit-)kosten ab, die von allen Verkehrsteilnehmern verursacht werden.

3 Integriertes Ziel-, Verkehrsmittel- und Zeitwahlmodell

3.1 Status Quo der Modellierung

Im Gegensatz zu den häufig sehr aufwendigen Modellierungsansätzen für die räumliche Verteilung der Verkehrsnachfrage und für die Verkehrsmittelwahl bleiben die Instrumente zur Abbildung des zeitlichen Verlaufs dieser Nachfrage bisher meist statisch und pauschal. Einflüsse des Verkehrssystems und der Verkehrsqualität auf die Wahl des Fahrtzeitpunktes werden in diesen Modellen nicht berücksichtigt. Andererseits enthält gerade die zeitliche Entzerrung der Nachfrage noch große Potentiale, um die Kapazitäten der vorhandenen Verkehrsinfrastruktur besser auszunutzen.

Eine feinere zeitliche Diskretisierung der Verkehrsnachfrage in Modellen ist darüber hinaus Voraussetzung, um den Einfluß einiger Maßnahmen zum Verkehrsmanagement (Gebühren- und Tarifgestaltung, Zufahrtsbeschränkungen, Parkraumrestriktionen), die mit einer "Ausweichreaktion" betroffener Verkehrsteilnehmer in andere Tageszeitbereiche verknüpft sein können, überhaupt modellmäßig abbilden zu können. Die üblichen sequentiellen Modellierungstechniken orientieren sich in der Abfolge im wesentlichen am Vier-Stufen-Algorithmus. Zusätzlich müssen immer eine Reihe von Arbeitsschritten durchgeführt werden, die empirisch weniger abgesichert sind und modelltheoretisch kaum erforscht und weiterentwickelt werden. Es handelt sich dabei häufig um lineare Skalierungen mit Faktoren aus großräumigen Untersuchungen oder standardisierten Ganglinien. Die Genauigkeit dieser Umrechnungen geht jedoch in gleicher Weise in das Gesamtergebnis ein, wie die bekannten vier Schritte der Verkehrserzeugung, Verteilung, Aufteilung und Umlegung. Im Folgenden wird der Ablauf einer gängigen Modellierung unter Berücksichtigung der erwähnten Hilfsrechnungen für das Ergebnis 'durchschnittlicher täglicher Verkehr (DTV)' des Straßennetzes dargestellt:

- **Erzeugung**: Erzeugung des Quellverkehrs differenziert nach Fahrtzwecken bzw. Wegeketten; Erzeugung der Zielattraktivitäten differenziert nach Fahrtzwecken. Die Erzeugung wird üblicherweise für die Verkehrsnachfrage eines ganzen Werktages durchgeführt.
- **Verteilung**: Mit Hilfe einer allgemeinen Widerstandsmatrix (für jede Relation wird ein einziger Widerstandswert[12] für den ganzen Tag gebildet) werden die (fahrtzweckspezifischen) Nachfragematrizen des ganzen Tages berechnet.
- **Aufteilung**: Unter Verwendung der verkehrsmittelspezifischen Widerstandsmatrizen wird der Modal Split jeder Relation (fahrtzweckspezifisch) berechnet.
- Abspalten eines Zeitintervalls: Mit Hilfe von Faktoren wird die Verkehrsnachfrage eines relevanten Zeitintervalls (z. B. Spitzenstunde) aus den (fahrtzweckspezifischen) Tagesnachfragematrizen eines Verkehrsmittels (hier MIV) berechnet.

[12] Für den dargestellten Ablauf mit 'Trip Interchange Modal Split' muß für die Zielwahl eine von den Verkehrssystemen unabhängige Widerstandsmatrix aggregiert werden. In einfachen Modellen wird gerne die Luftlinienentfernung (oder die MIV-Widerstandsmatrix) verwendet, in aufwendigeren Modellen werden die Widerstandsmatrizen der verschiedenen Systeme in geeigneter Weise verknüpft (z. B. Konzept des prospektiven Nutzens). Da üblicherweise im MIV nur die Spitzenstundennachfrage umgelegt wird, geht auch nur der Spitzenstundenwiderstand des MIV in die Zielwahl ein. Im ÖV werden ebenfalls die Widerstände der HVZ zugrundegelegt, da diese das Verkehrsaufkommen im wesentlichen bestimmen.

- Besetzungsgrad: Die MIV-Personenfahrten der Spitzenstunde werden mit Hilfe von Faktoren (fahrtzweckspezifisch) in Pkw-Fahrten umgerechnet.
- Die fahrtzweckspezifischen Pkw-Nachfragematrizen der Spitzenstunde werden zu einer einzigen Matrix zusammengefaßt.
- **Umlegung**: Die Spitzenstundennachfrage des MIV wird mit Hilfe von Routensuchalgorithmen auf das Netzmodell verteilt und die einstündigen Streckenbelastungen bestimmt.
- Die Tagesbelastungswerte DTV_w des modellierten Werktages werden (differenziert nach Streckentyp) mit Hilfe von Faktoren aus der Spitzenstundenbelastung der Strecken hochgerechnet.
- Der durchschnittliche tägliche Verkehr des Jahres (DTV) wird (differenziert nach Streckentyp) mit Hilfe von Faktoren aus den DTV_w–Werten der Strecken hochgerechnet.

Die tageszeitliche Verteilung der Verkehrsnachfrage wird, wenn überhaupt, in Modellen bisher über typisierte Nachfrageganglinien exogen nach Ziel- und Verkehrsmittelwahl vorgenommen, um die Nachfrage zur Vorbereitung der Umlegung auf einzelne Zeitintervalle aufteilen zu können. Häufig handelt es sich um die einfache, nicht einmal nach Fahrtzwecken differenzierte Vorgabe von Faktoren für einzelne Stunden oder Stundenintervalle eines Tages. Sie sind jedoch nicht dynamisch mit dem Angebot auf einzelnen Relationen veränderbar. Sehr häufig wird im Schritt der Verkehrsumlegung nur die Verkehrsbelastung in der maßgeblichen Spitzenstunde bzw. innerhalb des höchstbelasteten Vier-Stunden-Intervalls untersucht. Die DTV-Werte auf den einzelnen Strecken im Netzmodell werden abermals mit Hilfe von Faktoren aus dem Berechnungsergebnis dieses einen Intervalls abgeleitet. Dabei geht jegliche Verknüpfung mit dem zeitlichen Verlauf der fahrtzweckspezifischen Verkehrsnachfrage verloren. Typische zyklische und antizyklische Belastungen, wie sie auf den Einfallstraßen der Städte zu beobachten sind, können nicht abgebildet werden.

3.2 Ziele einer feineren zeitlichen Diskretisierung

3.2.1 Routensuche und Verkehrsumlegung

In heutigen Routensuch- und Umlegungsprogrammen des MIV kommen belastungsabhängige Geschwindigkeitsfunktionen auf den Streckenabschnitten zur Anwendung. Auf diese Weise wird versucht, die Routenwahl auch in stärker belasteten Netzen realistisch nachzubilden. Dieser Zusammenhang kann heute in Modellen in der Regel jedoch nur diskret, d. h. für eine spezifische, punktuell auftretende Nachfrage, dargestellt werden. Die durchschnittliche Nachfrage eines ganzen Tages auf einer Strecke ist im Allgemeinen so niedrig, daß sie die Streckengeschwindigkeit nicht beeinflußt. Da diese Nachfrage jedoch im Tagesverlauf stark schwankt, kommt es in der Realität in den Spitzenstunden trotzdem zu Stauungen, die Einfluß auf die Routenwahl der Verkehrsteilnehmer haben können. Das Routenwahlverhalten der Verkehrsteilnehmer ist – abhängig von der tageszeitlichen Streckenbelastung – durchaus unterschiedlich.

Konventionelle Umlegungsprogramme bilden die Routenwahl während der Spitzenstunde oder dem Spitzenintervall ab. Die daraus resultierende Streckenbelastung dient als Grundlage für die Berechnung der resultierenden DTV-Mengen. Dies kann dazu führen, daß eine Strecke, die in der Realität nur während der Spitzenstunde als Überlauf genutzt wird, in der Modell-

rechnung einen hohen DTV für den ganzen Tag erhält. Durch die zeitdiskrete Umlegung der gesamten Nachfrage eines Tages in Intervallen läßt sich ein realistischerer Verlauf der Tagesnachfrage auf den Streckenabschnitten berechnen.

Im Umfeld von Ballungsräumen oder Großstädten stellt man – vor allem auf den radialen Einfallstraßen – häufig fest, daß die Verkehrsnachfrage eine deutliche Lastrichtung aufweist. Während der morgendlichen Spitze ist die Nachfrage in Richtung der Zentren größer, am Nachmittag in der Gegenrichtung. Je nachdem, welche Spitzenzeit in einem konventionellen Verkehrsmodell herangezogen wird, erhält man die eine oder die andere asymmetrische Streckenbelastung als Basis für die Hochrechnung zum DTV. Dies ist natürlich eine schlechte Grundlage zum Vergleich mit realen Zähldaten am Streckenquerschnitt. Wenn die Nachfrage des ganzen Tages zeitdiskret in Intervallen umgelegt wird, können die zyklischen Schwankungen der Nachfrage dargestellt werden.

3.2.2 Beurteilung der Verkehrsqualität

Die Verkehrsqualität ist eine wesentliche Kenngröße für die Beurteilung von Maßnahmen. Mit der schwankenden Nachfrage im Tagesverlauf muß sich auch die Verkehrsqualität ändern. Maßnahmen zur Verstetigung der Nachfrage sollten in einer Verbesserung der Verkehrsqualität resultieren. Um solche Veränderungen präzise modellieren zu können ist es erforderlich, daß die Nachfrage in zeitdiskreten Intervallen untersucht und modelliert wird. Zeitdiskrete Informationen zur Verkehrsqualität können verwendet werden, um im Tagesverlauf differenzierte Aussagen zum Modal Split zu treffen. In der Morgen- und Abendspitze kann z. B. ein höherer ÖV-Anteil modelliert werden als in den Schwachverkehrszeiten.

3.2.3 Berechnung der Emissionen

Für die Berechnung der straßenverkehrsbedingten Luftschadstoffemissionen benötigt man zum einen die Verkehrsmengen, zum anderen Informationen über die resultierenden Verkehrssituationen auf dem betrachteten Streckenabschnitt. Konventionelle Umlegungsmodelle liefern nur für die Spitzenstunde eine belastungsabhängige Verkehrssituation. Mit dieser werden die Emissionsfaktoren für den ganzen Tag ausgewählt. Häufig auftretende Situationen, in denen ein Streckenabschnitt während der Spitzenstunde überlastet ist (Verkehrssituation Stop and Go), in den Nachtstunden aber freie Fahrt bietet, werden auf diese Weise falsch eingeschätzt. Durch die diskrete Umlegung der gesamten Nachfrage eines Tages in Zeitintervallen können unterschiedliche Verkehrssituationen im Tagesverlauf und realistischere Emissionsfaktoren zugeordnet werden.

3.3 Grundlagen des Modellierungskonzeptes

Wenn die Zeitwahl nach dem Modellschritt der Verkehrserzeugung durchgeführt wird, kann man sie sensitiv für zeitliche Veränderungen des Verkehrsangebotes bzw. der Verkehrsqualität und die zeitlichen Varianz in der Attraktivität der Ziele (für Aktivitäten) ausgestalten. Im Gegensatz zu der vorher beschriebenen exogenen Aufteilung der Nachfrage nach der Ziel- und Verkehrsmittelwahl für ein Umlegungsmodell können Rückkoppelungen zwischen Verkehrsnachfrage und der resultierenden Verkehrsqualität auch über die zeitliche Dimension berücksichtigt werden. Eine solche Modellierung des Zeitwahlverhaltens kann als integrierter, endogener Bestandteil des Nachfragemodells verstanden werden. Unbesehen der Tatsache, daß

viele Modellierungsansätze schon heute Zielwahl und Verkehrsmittelwahl (z. T. auch die Erzeugung) synchron bearbeiten, soll hier aus Gründen der Anschaulichkeit der klassische Vier-Stufen-Algorithmus zur Herleitung herangezogen werden.

Nach der Erzeugung der Nachfrage (Quellverkehr und Zielattraktivitäten) für ein definiertes Zeitintervall (z. B. Normalwerktag) wird das Verkehrsaufkommen (die sogenannten 'Trip Ends') im Modellschritt der Verteilung zu Quelle-Ziel-Relationen verbunden. Bei der Berechnung der relationsscharfen Nachfrage kommen verschiedene Ansätze zum Einsatz: Gravitationsmodell, intervening-opportunity-model, direct-demand-model. Allen gemeinsam ist, daß die höhere Attraktivität eines Zieles mehr Fahrten anzieht (s. Abbildung 3-1), daß höhere Kosten und/oder längere Reisezeiten die Fahrtenzahlen reduzieren (s. Abbildung 3-2) und daß die Gesamtzahl aller Fahrten gemäß den erzeugten Quellfahrten eines Quellbezirks beschränkt wird.

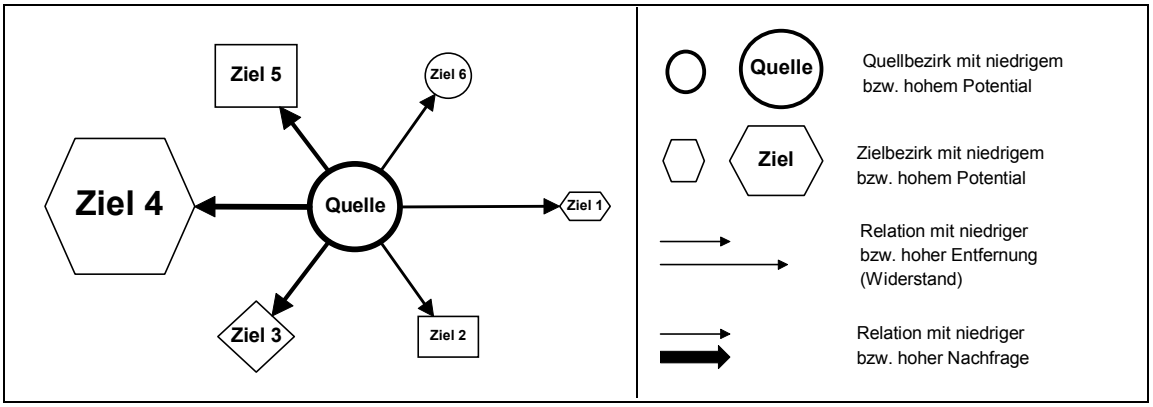


Abbildung 3-1: Bei gleicher Entfernung (Widerstand) ziehen die Ziele mit höherer Attraktivität (Potential) mehr Fahrten von der Quelle an

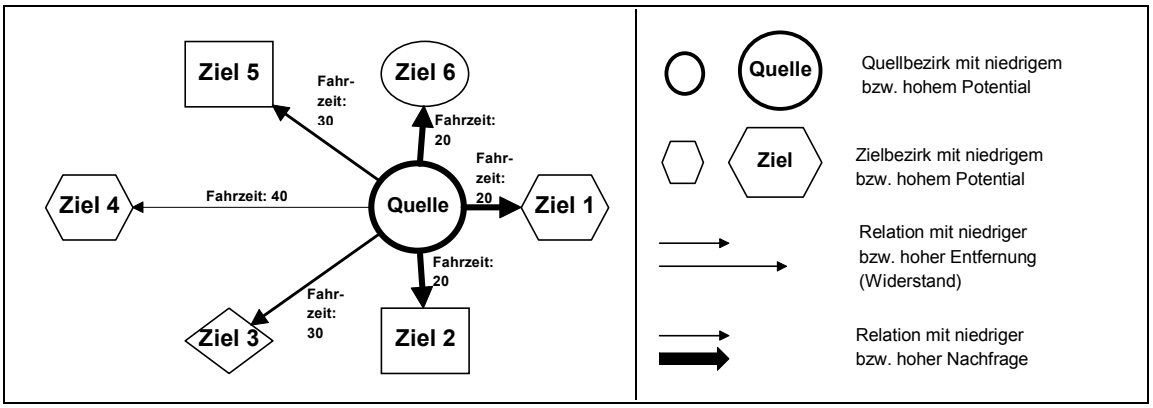


Abbildung 3-2: Bei gleich hoher Attratkivität (Potential) ziehen die Ziele mit der geringeren Fahrzeit (Widerstand) mehr Fahrten von der Quelle an.

Im Vier-Stufen-Algorithmus wird die Verkehrsmittelwahl vor oder nach der Zielwahl durchgeführt. Den verschiedenen Verkehrsträgern werden abhängig von den verkehrsmittelspezifischen Raumüberwindungswiderständen (Zeit, monetäre Kosten, Bequemlichkeit, etc.) unterschiedliche Anteile der Nachfrage zugeordnet. Wird die Verkehrsmittelwahl vor der Zielwahl angeordnet (trip-end modal split), kann die Aufteilung nur pauschal für das ganze Gebiet bzw. ggf. differenziert nach Quellbezirken durchgeführt werden. Relationsscharf wird die Verkehrsmittelwahl, wenn sie nach oder synchron mit der Zielwahl durchgeführt wird (trip-interchange modal split, s. Abbildung 3-3).

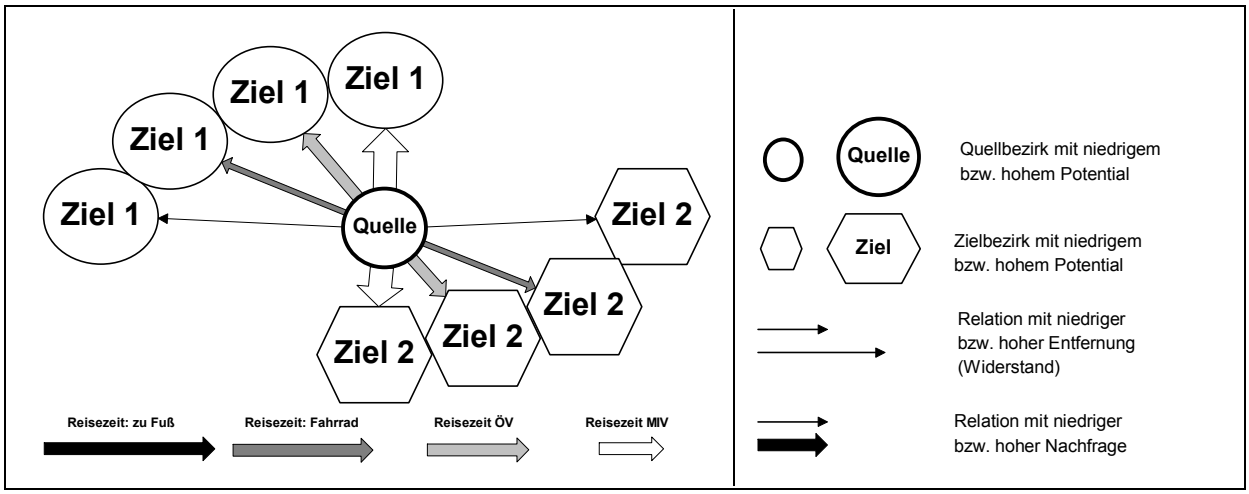


Abbildung 3-3: Verkehrsmittel mit kürzerer Reisezeit (geringerer Widerstand) ziehen mehr Fahrten zum jeweiligen Ziel an (hier: synchrone Ziel- und Verkehrsmittelwahl)

In den heute üblicherweise verwendeten Modellansätzen wird die Tatsache nicht berücksichtigt, daß die für die Verteilung und Aufteilung der einzelnen Fahrten auf Ziele und Verkehrsmittel relevanten Komponenten ‘Attraktivität des Ziels’ und ‘Widerstand der Fahrt für verschiedene Verkehrsmittel’ über die Zeit veränderlich sind. Die Widerstände werden üblicherweise stark von den Reisezeiten geprägt. Im MIV sind diese von den Verkehrsbelastungen beeinflußt; in MIV-Umlegungsmodellen wird diese Tatsache durch 'capacity-restraint-Verfahren' zum Ausdruck gebracht. Die Schwankungen der Reisezeiten im ÖV hängen vor allem von der Bedienungshäufigkeit und den Anschlußsicherungen ab, welche im Tagesverlauf stark variieren können (s. Abbildung 3-4).

Aber auch die Attraktivität der Zielbezirke ist anschaulich nicht konstant während eines Tages. Ein Industriegebiet mit vielen Arbeitsplätzen zieht nachts nur wenige Fahrten ‘zur Arbeit’ an, weil die entsprechenden Firmen geschlossen sind. Eine dort gelegene Diskothek kann aber zum gleichen Zeitpunkt durchaus ein attraktives Ziel für Freizeitfahrten sein. In den Morgenstunden kann die Attraktivität für die beiden genannten Fahrtzwecke gerade umgekehrt sein (s. Abbildung 3-5).

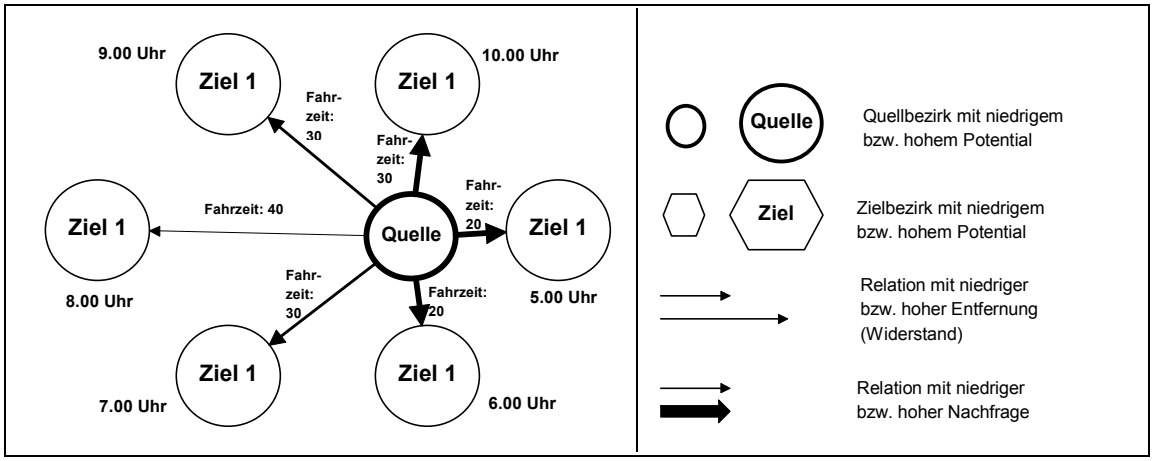


Abbildung 3-4: Die Fahrzeit von einer Quelle zum gleichen Ziel variiert mit der Tageszeit

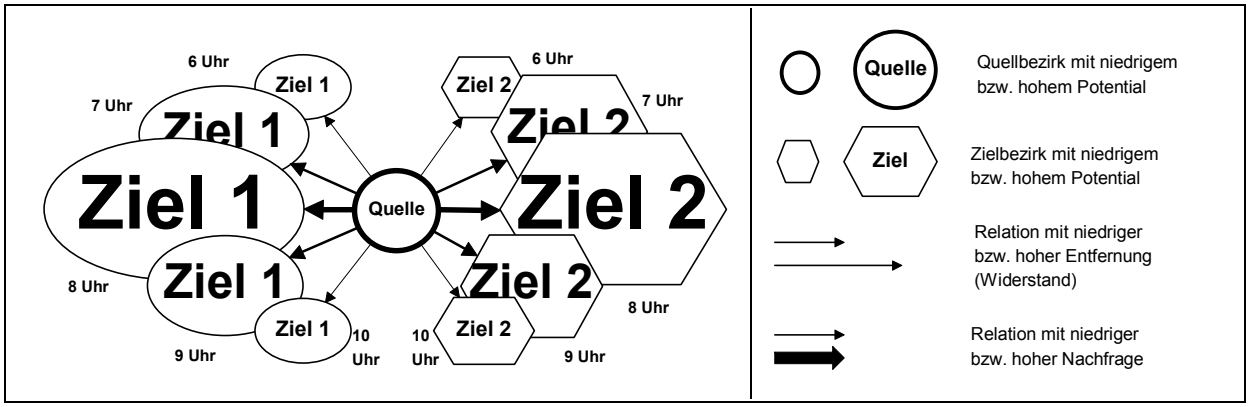


Abbildung 3-5: Die Attraktivität einzelner Ziele variiert mit der Tageszeit

Diese zeitlich dynamische Komponente aller Kenngrößen muß im Modell berücksichtigt werden, damit das Zeitwahlverhalten als endogenes Element integriert werden kann. Die Wahrscheinlichkeit oder Häufigkeit, mit der eine Fahrt in einem bestimmten Zeitraum durchgeführt wird, hängt vom Verkehrswiderstand in diesem Zeitraum und vom Nutzen ab, zu einem um die Reisezeit späteren Zeitpunkt ein Ziel zu erreichen.

Um die Zeitwahl entsprechend dem simultanen Entscheidungsverhalten in das Modell integrieren zu können, sollte sie synchron mit der Zielwahl und der Verkehrsmittelwahl durchgeführt werden (s. Abbildung 3-6). Alle Komponenten, die das Wahlverhalten maßgeblich beeinflußen, erhalten eine zusätzliche zeitliche Dimension: Die Attraktivität der Ziele variiert räumlich (diskret, nach Angebot) und zeitlich (ggf. kontinuierlich); und die Raumüberwindungswiderstände variieren mit den Verkehrsmitteln (diskret) und nach der Zeit (ggf. kontinuierlich).

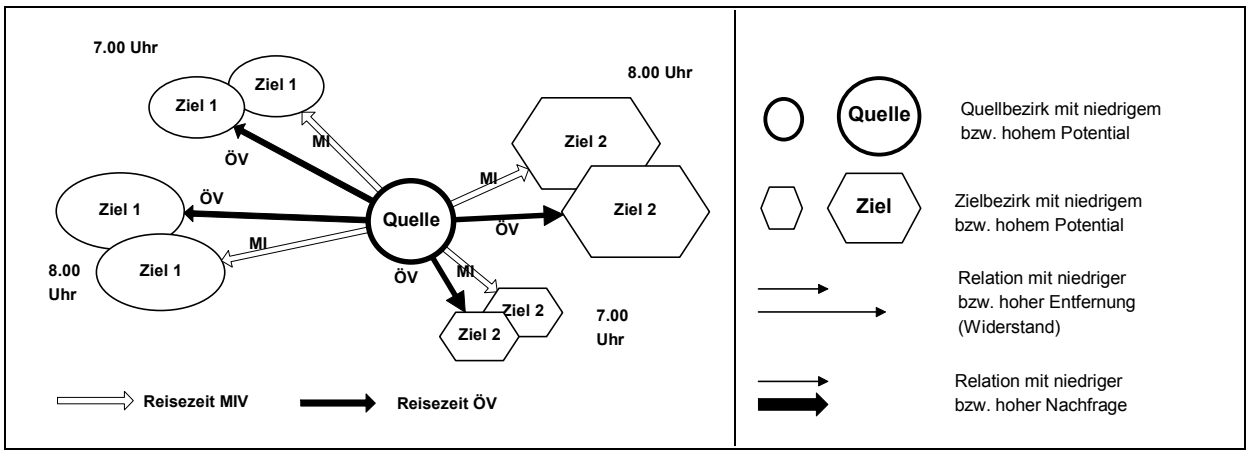


Abbildung 3-6: simultane Ziel-, Zeit- und Verkehrsmittelwahl

3.4 Simultane Modellierung

Das Verkehrsverhalten (Aktivitäten- und Wegemuster) einer Person ist das Resultat der Kausalkette Bedürfnisse - Aktivitätenbedarf - Aktivitätennachfrage - Ortsveränderungen (Steierwald/Künne, 1994). Es wird maßgeblich von der Person und ihrer Umwelt geprägt. Die beschreibenden Variablen lassen sich in verhältnismäßig gut bestimmbare objektive und deutlich schwieriger zu ermittelnde subjektive Einflußfaktoren einteilen. Für die Umsetzung in einem Modell entscheidender ist jedoch, welche Einflußgrößen endogen im Modell enthalten sein

sollen und welche anderen Größen exogene Randbedingungen darstellen. Bei der Auswahl der endogenen Variablen ist maßgeblich, daß

- Veränderungen der Größe selber hinreichend genau modelliert werden können,
- die Wirkung auf das Modellergebnis quantifizierbar ist,
- die logische Konsistenz des Modells eingehalten wird,
- das Modell operabel bleibt.

Variablen bleiben exogen, wenn

- sie bezüglich der Aufgabenstellung des Modells keiner Einwirkung unterliegen und sich daher nicht verändern,
- sie zur Abbildung von ceteribus paribus Bedingungen bewußt konstant gehalten werden sollen,
- die Veränderung der Größen sich nicht modellendogen abbilden läßt.

Im vorliegenden Fall sollen tageszeitlich variierende, verkehrliche Einflüsse auf das Zeitwahlverhalten der Verkehrsteilnehmer näher untersucht werden. Von den vielen Einflußfaktoren auf das Zeitwahlverhalten (s. Kapitel 1.2) sollen deshalb nur Kenngrößen des Verkehrsangebotes und der Verkehrsqualität zu unterschiedlichen Zeitpunkten als endogene Größen in das Modell aufgenommen und alle weiteren Einflüsse in einer einzigen exogenen Größe zusammengefaßt werden, da sich ihre Wirkungen auf die Zeitwahl nicht explizit quantifizieren und die Veränderungen der Größen nicht modellendogen darstellen lassen.

Zur Erstellung eines reagiblen Modells sind zwei Aufgabenbereiche zu bearbeiten:

- Der verkehrliche Einfluß auf die Wahl des Fahrtzeitpunktes muß von den anderen, in diesem Kontext als exogen angesehenen Einflüssen abgespalten und aus der beobachtbaren Nachfrageganglinie muß eine von den verkehrlichen Einflüssen bereinigte, zeitliche Wunschlinie der Nachfrage bestimmt werden.
- Es ist ein Modellierungsansatz zu formulieren, in dem sich veränderte verkehrliche Erreichbarkeiten in entsprechend angepaßtem Zeitwahlverhalten niederschlagen. Gleichzeitig muß der Ansatz offen sein für gezielte Eingriffe in die zeitliche Wunschlinie der Nachfrage mit deren Hilfe die Reaktionen auf Veränderungen der modellexogenen Einflüsse dargestellt werden können.

Besonders der erste Arbeitsschritt gestaltet sich schwierig. Zwar enthalten empirisch erhobene Verkehrsnachfragedaten in der Regel die Startzeiten für Aktivitäten, jedoch bleibt der verkehrliche Einfluß auf die Wahl des Fahrtzeitpunktes offen. Die wünschenswerte, "ideale" Ausgangsbasis bestünde in Informationen über den zeitlichen Verlauf der Nachfrage nach Fahrtzwecken getrennt sowie über zugehörige Verläufe des Reisezeitbedarfs (Zeitaufwand). In der Praxis muß man sich i. A. mit der Ermittlung einer globalen Nachfrageganglinie je Fahrtzweck, z. B. aus Befragungsdaten, zufrieden geben. Mit Aufwand verbunden ist die Charakterisierung des Verkehrszustandes in einem Untersuchungsraum über den Verlauf der Zeit. Um nur für eine einzige Relation verläßliche empirische Werte zum Reisezeitbedarf, z. B. auf Stundenbasis, zu erhalten, wären entweder ungemein intensive Befragungen oder aufwendige Testfahrten notwendig. Relationsscharfe Aussagen zum Reisezeitbedarf über den Tag lassen sich im geforderten Umfang deshalb nur aus Modellrechnungen ermitteln. Dazu muß die aus einer empirischen Erhebung ermittelte Verkehrsnachfrage mit Hilfe eines Routenwahl- und Capac-

ity-Restraint-Modells zeitdiskret (in Intervallen) auf die jeweiligen Verkehrsnetze umgelegt und jeweils der Reisezeitbedarf für jede Relation registriert werden.

Üblicherweise liegt die Verflechtungsmatrix nicht vollständig als empirische Grundlage vor, sondern wird auf Basis einer Stichprobe mit Matrixprognoseverfahren geschätzt. Der zeitliche Verlauf der Nachfrage wird - sofern er überhaupt benötigt wird - entweder mit Hilfe der Nachfrageganglinien an Dauerzählstellen des Untersuchungsraumes oder besser fahrtzweckspezifisch anhand eines empirischen Datensatzes (Mobilitätsprotokoll) gebildet. Dies bedeutet, daß der zeitliche Verlauf des Reisezeitbedarfs auf einer spezifischen Relation (welcher empirisch gar nicht vorliegt) nicht in den zeitlichen Verlauf der Nachfrageganglinie auf genau dieser Relation eingehen kann. Aus Maßstabsgründen sollte man deshalb der für das gesamte Untersuchungsgebiet ermittelten zeitlichen Nachfrageganglinie auch eine entsprechend aggregierte Verlaufslinie des Reisezeitbedarfs gegenüber stellen.

Um eine Untersuchung mit empirischen Daten des Untersuchungsraumes initiieren zu können ist also eine globale Charakterisierung des jeweils herrschenden Verkehrszustandes (als Maß für den Reisezeitbedarf) für jedes Zeitintervall notwendig. Wenn für nachfolgende Prognoserechnungen die Verteilung der Fahrtzeitpunkte auf jeder Relation getrennt modelliert werden soll, ist es auch gerechtfertigt, jeweils den relationsscharfen, synthetisch ermittelten Verlauf des Reisezeitbedarfs zugrunde zu legen.

Zu bedenken bleibt, daß Verkehrsteilnehmer die eine antizyklische Fahrt (z. B. ausstrahlender Verkehr in der Morgenspitze) durchführen, den Verkehrszustand auf ihrer Relation durchaus differenziert von einer globalen Bewertungsgröße wahrnehmen. Wenn jedoch die (fahrtzweckspezifische) Nachfrage räumlich nur global beobachtet werden kann, ist diese Unschärfe in Kauf zu nehmen. Dennoch bleibt die Schwierigkeit, eine Methodik zu finden, mit der vorhandene Befragungs- und Erhebungsdaten zur Charakterisierung des Reisezeitaufwandes zu unterschiedlichen Tageszeiten ausgewertet werden können.

Wie lassen sich nun diese theoretischen Ausführungen praktisch im Rahmen eines Verkehrsprognosemodells einsetzen? Zur Beantwortung dieser Frage wird zunächst ein außerordentlich simples Modell mit nur einer Strecke und einer QZ-Beziehung betrachtet (s. Abbildung 3-7).

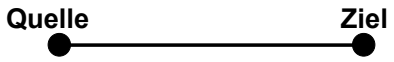


Abbildung 3-7: Gedankenmodell

Die beobachtete Nachfrage $n^b(t)$ auf dieser Relation sei für den Fahrtzweck Wohnen-Arbeit (WA) als zeitliche Verteilung über den Tag in einstündigen Intervallen t jeweils mit der zugehörigen Reisezeit RZ(t) bekannt. (s. Abbildung 3-8)

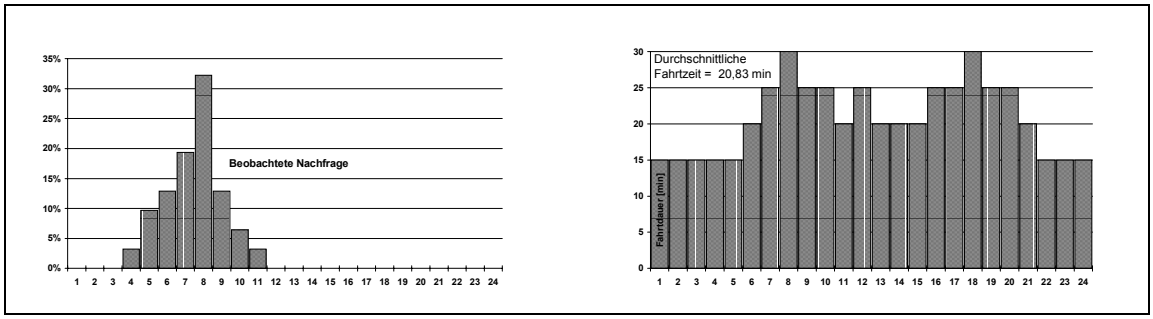


Abbildung 3-8: Beobachtete Nachfrage und Reisezeitverteilung

Es gilt:

$$\sum_{t=1}^{24} n^b(t) = 100\% \qquad \text{(Formel 3-1)}$$

mit: $n^b(t)$ Anteil der beobachteten Fahrten im Zeitintervall t an der Tagesnachfrage

Viele exogene Faktoren beeinflußen die beobachtete zeitliche Verteilung der Nachfrage: Arbeitszeitregelungen, Aktivitätenketten, Haushaltsabsprachen und Verkehrszustände. Der Einfluß des Verkehrsaufwandes (Reisezeit) muß für den Einsatz im Verkehrsprognosemodell von den anderen Einflußgrößen abgespalten werden. Das Ergebnis ist eine Wunschverteilung (potentielle Verkehrsnachfrage) für die Durchführung der Arbeitsfahrt unter Berücksichtigung aller exogenen Einflußgrößen mit Ausnahme des Verkehrsgeschehens. Diese Wunschverteilung $n^w(t)$ unterscheidet sich i. A. von der beobachteten realisierten Verkehrsnachfrage $n^b(t)$.

Zunächst soll unterstellt werden, diese Wunschverteilung sei schon bekannt. Ihre Herleitung kann dann rekursiv geschehen (s. Abbildung 3-9).

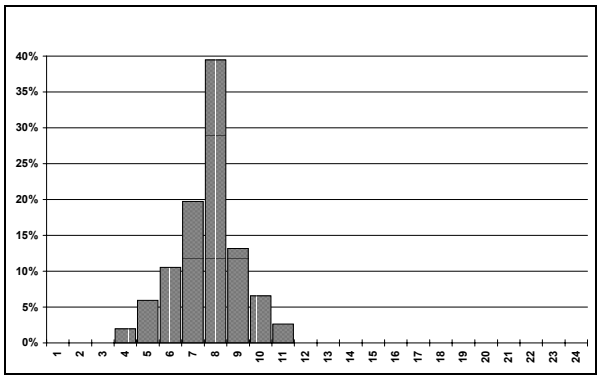


Abbildung 3-9: Wunschverteilung der Nachfrage für den Fahrtzweck Wohnen-Arbeit

Auch hier gilt: $\sum_{t=1}^{24} n^w(t) = 100\%$ (Formel 3-2)

mit: nw(t) Anteil der originär gewünschten Fahrten im Zeitintervall t an der Tagesnachfrage

Die durch den Verkehrszustand erzeugten Kosten k(t) der Fahrt (Verkehrsaufwand) zum Zeitpunkt t seien in erster Näherung proportional zu den Reisezeiten: $k(t) \approx RZ(t)$. Die nicht gewichteten durchschnittlichen Kosten $\bar{k}$ des Tages berechnen sich folgendermaßen:

$$\bar{k} = \frac{\sum_{t=1}^{24} k(t)}{24} \qquad \text{(Formel 3-3)}$$

mit: k(t) Verkehrsaufwand im Zeitintervall t

Für jedes Zeitintervall t kann jetzt ausgesagt werden, ob in ihm die Kosten über- oder unterdurchschnittlich sind: $k(t) < \overline{k}$ oder $k(t) > \overline{k}$.

Diese Abweichung von den Durchschnittskosten kann als verkehrlicher Filter für die zeitliche Realisierung der Wunschnachfrage verwendet werden. Es wird angenommen, daß sich durch die Verwendung des verkehrlichen Filters aus der 'Wunschnachfrage ohne Berücksichtigung der Reisezeiten' die beobachtete, realisierte Nachfrage berechnen läßt:

$$n^b(t) = \frac{n^w(t) \cdot \overline{k}}{k(t)} = \frac{n^w(t) \cdot \overline{RZ}}{RZ(t)} \qquad \text{(Formel 3-4)}$$

mit: $n^b(t)$ Anteil der beobachteten Fahrten im Zeitintervall t an der Tagesnachfrage
$n^w(t)$ Anteil der originär gewünschten Fahrten im Zeitintervall t an der Tagesnachfrage
$k(t)$ Verkehrsaufwand im Zeitintervall t

Dabei wird sofort klar, daß umgekehrt die Wunschnachfrage aus der beobachteten Nachfrage ermittelt werden kann:

$$n^w(t) = \frac{n^b(t) \cdot RZ(t)}{\overline{RZ}} \qquad \text{(Formel 3-5)}$$

Die beiden Umrechnungen stellen nicht sicher, daß die Höhe der Tagesnachfrage konstant bleibt. Die berechnete Wunschnachfrage bzw. realisierte Nachfrage muß durch Normierung jeweils an die ursprüngliche Tagesnachfrage angepaßt werden:

$$n'^w(t) = \frac{n^w(t)}{\sum_{t=1}^{24} n^w(t)} \qquad \text{(Formel 3-6)}$$

bzw.:

$$n'^b(t) = \frac{n^b(t)}{\sum_{t=1}^{24} n^b(t)} \qquad \text{(Formel 3-7)}$$

Im Gedankenmodell mit nur einer Quelle, einem Ziel und einer Route können die Verkehrsteilnehmer nur durch verändertes Zeitwahlverhalten auf die tageszeitlich variierende Verkehrsqualität reagieren. Zwei Wege eröffnen sich, dies im Modell für prognostische Zwecke zu nutzen:

- Wenn man die Wunschlinie der Nachfrage (alle exogenen Einflußfaktoren) mit einer anderen – hier extern vorgegebenen – Verteilung der Reisezeiten kombiniert, erhält man eine Prognoseverteilung der Nachfrage, die von der ursprünglich beobachteten Nachfrage abweicht.
- Wenn man Veränderungen der exogenen Faktoren der Wunschfahrtzeitpunkte quantifizieren kann (z. B. veränderte Ladenöffnungszeiten, Arbeitszeitflexibilisierung), kann man in die zeitliche Verteilung der Fahrtwünsche eingreifen und erhält (auch bei konstanter Verteilung des Verkehrsaufwandes) als Prognose ein entsprechend angepaßtes Verkehrsverhalten.

Wenn Q die Anzahl der Fahrten eines Tages beschreibt, lautet das erste Gedankenmodell für die zeitlich differenzierte Nachfrage vollständig:

$$F(t) = Q \cdot n^{w}(t) \cdot f(w(t)) \qquad \text{(Formel 3-8)}$$

mit: Q Quellverkehr
$n^{w}(t)$ Anteil der originär gewünschten Fahrten im Zeitintervall t an der Tagesnachfrage
f() Bewertungsfunktion des verkehrlichen Widerstandes
w(t) verkehrlicher Widerstand im Zeitintervall t

Als Bewertungsfunktion des verkehrlichen Widerstandes wäre als Weiterentwicklung von Formel 3-3 und Formel 3-4 eine Funktion der Form:

$$f(w(t)) = \frac{\frac{1}{24}\sum_{t=1}^{24} w(t)}{w(t)} \qquad \text{(Formel 3-9)}$$

und die Widerstandsfunktion:

$$w(t) = RZ(t) \qquad \text{(Formel 3-10)}$$

mit: RZ(t) Reisezeit im Zeitintervall t

denkbar. Die Reisezeit, die in die Berechnung der Wunschlinie der Nachfrage direkt linear eingegangen ist, wird dabei mit ihrem Kehrwert in die Rückrechnung der beobachteten (bzw. prognostizierten) Nachfrage einbezogen.

Im zweiten Schritt soll in das Gedankenmodell eine Zielwahlalternative eingebaut werden (s. Abbildung 3-10).

Abbildung 3-10: Gedankenmodell mit zwei Zielen

Wie bisher soll nur ein Fahrtzweck Wohnen-Arbeiten (WA) betrachtet werden. Die Nachfrage auf den beiden Relationen hängt - außer von der exogenen Größen und der zeitlich veränderlichen Verkehrssituation, welche schon im ersten Gedankenmodell berücksichtigt wurden - auch noch vom Grundpotential der beiden Ziele und den räumlich konkurrierenden Reisezeiten ab.

Bei der Ermittlung der zeitlichen Wunschverteilung der Nachfrage ergibt sich im erweiterten Gedankenmodell unmittelbar das Problem, daß sowohl die Verkehrsqualität, als auch die beobachtbare Nachfrage auf den beiden Relationen üblicherweise nicht synchron verlaufen. Solange nur zwei Relationen betrachtet werden erscheint es noch möglich, für jede Relation getrennt die Wunschlinie aufzustellen und im Prognosemodell zu verwenden. In einem Modell mit mehreren hundert Verkehrszellen jedoch ist es nicht mehr möglich, relationsscharf die Nachfrage zu beobachten: es wird ein Verfahren zur Berechnung der aggregierten zeitlichen Wunschlinie benötigt. Eine Möglichkeit bestünde darin, für jede Relation getrennt die Wunschlinie aufzustellen und aus diesen dann den – z. B. arithmetischen – Mittelwert zu bilden. In Anlehnung an Formel 3-4 wird dabei weiterhin die Reisezeit als Indikator der Verkehrsqualität verwendet:

$$n^w(t) = \frac{\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J} \frac{n^b_{i,j}(t)\cdot RZ_{i,j}(t)}{\frac{1}{24}\cdot\sum_{t=1}^{24} RZ_{i,j}(t)}}{I\cdot J} \qquad \text{(Formel 3-11)}$$

mit: $n^b_{i,j}(t)$ Anteil der beobachteten Fahrten auf der Relation i, j im Zeitintervall t an der Tagesnachfrage
$RZ_{i,j}(t)$ Reisezeit auf der Relation i, j im Zeitintervall t
I Anzahl der Quellbezirke
J Anzahl der Zielbezirke

In der dargestellten Form wird jede Relation im System gleich hoch bewertet. In üblichen Verkehrssystemen variiert die Nachfrage auf verschiedenen Relationen ganz erheblich. Es erscheint daher nicht sinnvoll, selten nachgefragte Beziehungen genauso hoch zu bewerten wie häufig nachgefragte, sondern z. B. die Höhe der Nachfrage als Gewicht zu verwenden.

Die Reisezeit ist an sich kein Indikator für die Verkehrsqualität[13]. Auf langen Strecken ist die Reisezeit zwangsläufig höher als auf kurzen; die Verkehrsqualität muß deshalb nicht schlechter sein. Die Reisezeit kann nur dann als Indikator für die Verkehrsqualität verwendet werden, wenn die Fahrleistungen im System (bzw. auf jeder Relation) in jedem Zeitintervall konstant bleibt. Solange dies implizit sichergestellt wird, ist die Reisezeit umgekehrt proportional zur Reisegeschwindigkeit; diese wiederum ist ein besserer, direkter Indikator für die Verkehrsqualität. Die Gewichtung mit der Nachfrage darf deshalb nur für Relationen, keinesfalls für Zeitintervalle erfolgen, weil sich sonst die implizit unterstellten Fahrleistungen (Nachfrage mal Entfernung) zwischen den Zeitintervallen ändern würden.

Sinnvoller erscheint es, statt der Reisezeit (und der implizit berücksichtigten Entfernung) einen Indikator zu wählen, der die Verkehrsqualität direkt beschreibt, wie z. B. die Reisegeschwindigkeit. Ein solcher Indikator läßt sich mit beliebigen Gewichtungen über Zeitintervalle und Relationen aggregieren. Dadurch kann der Algorithmus flexibler an die Struktur der konkret vorliegenden Daten zur Beschreibung der zeitlichen Verteilung und der Wichtigkeit von Relationen angepaßt werden. Gerade die zeitliche Verteilung der Nachfrage aus empirischen Quellen läßt sich selten einzelnen Relationen zuordnen. Eine Möglichkeit zur Berechnung der Wunschnachfrage sähe folgendermaßen aus:

$$n^w(t) = \frac{n^b(t)}{vq(t)} \qquad \text{(Formel 3-12)}$$

mit: $n^w(t)$ Anteil der originär gewünschten Fahrten im Zeitintervall t an der Tagesnachfrage
$n^b(t)$ Anteil der beobachteten Fahrten im Zeitintervall t an der Tagesnachfrage
vq(t) Indikator der Verkehrsqualität im Zeitintervall t [%]

Der normierte Indikator für die Verkehrsqualität wird aus der durchschnittlichen Geschwindigkeit jedes Zeitintervalls berechnet:

$$vq(t) = \frac{v(t)}{\bar{v}} = \frac{v(t)}{\frac{1}{24}\sum_{t=1}^{24} v(t)} \qquad \text{(Formel 3-13)}$$

Die durchschnittliche Geschwindigkeit v(t) jedes Zeitintervalls könnte folgendermaßen aus den gewichteten Reisegeschwindigkeiten der Relationen berechnet werden:

[13] Die Verkehrsqualität wiederum dient dazu, die kleinen tageszeitlichen Schwankungen des Widerstandes (disutility) auf einer Relation oder im Gesamtsystem zu quantifizieren.

$$v(t) = \frac{\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J} F_{i,j} \cdot \frac{d_{ij}(t)}{RZ_{i,j}(t)}}{\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J} F_{i,j}} \qquad \text{(Formel 3-14)}$$

mit: $d_{ij}(t)$ Entfernung der Relation ij im Zeitintervall t
$RZ_{ij}(t)$ Reisezeit auf der Relation ij im Zeitintervall t
F_{ij} Tagesnachfrage auf der Relation ij

Der vorgestellte Algorithmus zur Berechnung der zeitlichen Wunschlinie der Nachfrage stellt einen Ansatz unter vielen möglichen Verfahren dar. Die impliziten Annahmen wurden auf zwei Ebenen getroffen:

- der funktionale Zusammenhang der variierenden Verkehrsqualität mit den realisierten Startzeitpunkten
- das Aggregationsverfahren für die Beurteilung der Verkehrsqualität in einem Verkehrssystem

Die wesentliche Annahme ist, daß Unterschiede in der Verkehrsqualität zu verschiedenen Zeitpunkten direkt linear zu Verlagerungen der Startzeitpunkte führen. Vorstellbar sind z. B. auch exponentielle oder logarithmische Zusammenhänge. Sobald empirisches Material vorliegt, das einen anderen funktionalen Zusammenhang unterstützt, sollte es ein leichtes sein, den Algorithmus zur Berechnung der Wunschnachfragelinie anzupassen.

Im vorgestellten Aggregationsansatz werden die Relationen im Verkehrssystem mit ihrer jeweiligen Verkehrsnachfrage gewichtet. Dazu sind einerseits Kenntnisse über die zeitlich differenzierte Verkehrsqualität auf einzelnen Relationen und andererseits über die Nachfrageverteilung z. B. aus einem Verkehrsnachfrage- und Umlegungsmodell erforderlich. Die differenzierte Verkehrsqualität könnte möglicherweise auch aus Daten stationärer Meßstellen oder aus empirischem Befragungsmaterial abgeleitet werden und unmittelbar dem Gesamtsystem zugeordnet werden. Wenn die Verkehrsqualität aus einem zeitdiskreten Umlegungsmodell übernommen wird, bieten sich als Gewichte für das Aggregationsverfahren neben einer einheitlichen Bewertung aller Relationen verschiedene Strukturgrößen (Einwohner, Arbeitsplätze, etc.) der Quell- und Zielbezirke, die Luftlinienentfernung der Relationen oder eben die Nachfragemengen (tageweise oder zeitlich differenziert) an.

Die Wunschverteilung muß selbstverständlich wieder auf die ursprüngliche Gesamtfahrtenzahl angepaßt werden.

Die beiden Ziele im zweiten Gedankenmodell haben unterschiedliche statische (exogene) Attraktivitäten A_1 und A_2 aufgrund ihrer Standortfaktoren. Eine übliche Zielwahlfunktion ohne Zeitwahl wäre z. B.:

$$F_{i,j} = Q_i \cdot A_j \cdot f(w_{i,j}) \cdot c \qquad \text{(Formel 3-15)}$$

mit: Q_i Quellverkehr im Bezirk i
A_j Attraktivität des Zielbezirkes j
f() Bewertungsfunktion des verkehrlichen Widerstandes
$w_{i,j}$ verkehrlicher Widerstand auf der Relation i,j
c Konstante zur Kontrolle der Gesamtfahrten im System

mit der Bewertungsfunktion

$$f(w_{i,j}) = w_{i,j}^{\alpha} \cdot e^{-\beta \cdot w_{i,j}} \qquad \text{(Formel 3-16)}$$

mit: α, β Kalibrierungsparameter

und der Widerstandsfunktion

$$w_{i,j} = RZ_{i,j}\,. \qquad \text{(Formel 3-17)}$$

mit: $RZ_{i,j}$ Reisezeit auf der Relation i, j

Mit Hilfe der Wunschverteilung der Nachfrage läßt sich die zeitlich dynamische Attraktivität der Ziele unabhängig von möglichen Veränderungen der Reisezeiten darstellen und dadurch die miteinander konkurrierende Attraktivität unterschiedlicher Zeitintervalle modulieren. Die Zielwahlfunktion wird um die Zeitwahl erweitert:

$$F_{i,j}(t) = Q_i \cdot A_j \cdot n^w(t) \cdot f(w_{i,j}(t)) \cdot c \qquad \text{(Formel 3-18)}$$

mit: Q_i Quellverkehr im Bezirk i
A_j Attraktivität des Zielbezirkes j
$n_w(t)$ Anteil der originär gewünschten Fahrten im Zeitintervall t an der Tagesnachfrage
f() Bewertungsfunktion des verkehrlichen Widerstandes
$w_{i,j}(t)$ verkehrlicher Widerstand auf der Relation i,j im Zeitintervall t
c Konstante zur Kontrolle der Gesamtfahrten im System

Um die variierende Verkehrsqualität im Tagesverlauf abzubilden, muß auch die Bewertungsfunktion des verkehrlichen Widerstandes um die zeitliche Dimension erweitert werden. Im Gedankenmodell ohne Zielwahl wurde in Formel 3-9 der lineare Zusammenhang, der bei der Berechnung der zeitlichen Wunschlinie unterstellt wurde, einfach umgekehrt. Wenn die Funktion jedoch gleichzeitig die räumliche Verteilung der Nachfrage abbilden soll, ist dieser umgekehrt lineare Zusammenhang nicht besonders geeignet. Hinzu kommt, daß für die Berechnung der Wunschlinie möglicherweise ganz andere, auch aggregiert vorliegende Bezugsdaten (z. B. stationär beobachtete Verkehrsqualität) zur Anwendung kommen müssen, als sie später in der zeitlich differenzierten Widerstandsmatrix zur Berechnung der Nachfrageverteilung zur Verfügung stehen. Der Einfluß der Bewertungsfunktion des Widerstandes auf die räumliche Verteilung sollte erheblich größer sein als auf die zeitliche Verteilung der Nachfrage. Deshalb erscheint es sinnvoll, eine Bewertungsfunktion zu verwenden, die traditionell für die räumliche Verteilung gut geeignet ist, wie die Potenz-Exponentialfunktion. Die Sensibilität für die zeitliche Verteilung der Nachfrage läßt sich durch die Auswahl und Gewichtung der Komponenten der Widerstandsfunktion verändern: die Reisezeit auf einzelnen Relationen reagiert sehr empfindlich auf die Verkehrsqualität, während die Entfernung oder monetäre Kosten im Tagesverlauf kaum variieren.

Die Bewertungsfunktion für das Gedankenmodell mit Zielwahlalternative könnte also folgendermaßen aussehen.

$$f(w_{i,j}(t)) = w_{i,j}(t)^{\alpha} \cdot e^{-\beta \cdot w_{i,j}(t)} \qquad \text{(Formel 3-19)}$$

mit: α, β Kalibrierungsparameter

Als einfachste Widerstandsfunktion ist die Reisezeit auf einer Relation vorstellbar:

$$w_{i,j}(t) = RZ_{i,j}(t) \qquad \text{(Formel 3-20)}$$

mit: $RZ_{i,j}(t)$ Reisezeit auf der Relation i, j im Zeitintervall t

Je nach Verkehrsmittel sollten jedoch weitere Komponenten (Entfernung, monetäre Kosten, statische Zeitanteile, Bedienungsqualität, etc.) in die Widerstandsfunktion eingehen. Üblicherweise werden alle Komponenten in Zeitkosten umgerechnet. Die Auswahl der Komponenten beeinflußt die Sensibilität der Widerstandsfunktion auf die Verkehrsqualität. In der dargestell-

ten Form (Reisezeit als einzige Komponente) ist die Empfindlichkeit sehr hoch, während eine reine Entfernungsfunktion auf die Verkehrsqualität nicht reagiert.

Für das oben dargestellte zweite Gedankenmodell ergeben sich also die simultan miteinander konkurrierenden Angebote (s. Tabelle 3-1): $A_j \cdot n^w(t) \cdot f(w_{i,j}(t))$

von	nach	Intervall 1	Intervall 2	...	Intervall 24
Q1	Ziel 1	$A_1 \cdot n^w(1) \cdot f(w_{1,1}(1))$	$A_1 \cdot n^w(2) \cdot f(w_{1,1}(2))$	$A_1 \cdot n^w(t) \cdot f(w_{1,1}(t))$	$A_1 \cdot n^w(24) \cdot f(w_{1,1}(24))$
	Ziel 2	$A_1 \cdot n^w(1) \cdot f(w_{1,2}(1))$	$A_1 \cdot n^w(2) \cdot f(w_{1,2}(2))$	$A_1 \cdot n^w(t) \cdot f(w_{1,2}(t))$	$A_1 \cdot n^w(24) \cdot f(w_{1,2}(24))$

Tabelle 3-1: Zeitlich-räumliche Angebotsstruktur für eine Quelle, zwei Ziele und 24 Zeitintervalle

Wenn man die ursprüngliche Reisezeitvariation $RZ_{i,j}(t)$ des Tages unterlegt, erhält man - gemittelt über die beiden Relationen - wieder die beobachtete Nachfrage.

Die nächste Erweiterung des Gedankenmodells soll eine Verkehrsmittelalternative enthalten (s. Abbildung 3-11):

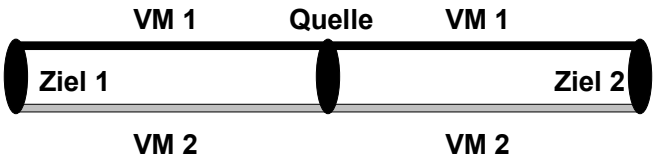


Abbildung 3-11: Gedankenmodell mit zwei Zielen und zwei Verkehrsmitteln

Die Ermittlung der Wunschverteilung der Nachfrage gestaltet sich durch die Erweiterung um die Verkehrsmittel komplexer, entspricht jedoch im Prinzip dem Verfahren im vorhergehenden Abschnitt. Für den Fall eines Verkehrssystems mit nur zwei Zielen und je zwei Verkehrsmitteln ist es vorstellbar, jeweils getrennt die Verkehrsqualität und die Nachfrageganglinie zu beobachten, getrennte Wunschlinien der Nachfrage zu berechnen und für diese in geeigneter Weise einen Mittelwert zu bilden:

$$n^w(t) = \frac{\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{m=1}^{M} \frac{n^b_{i,j,m}(t) \cdot RZ_{i,j,m}(t)}{\frac{1}{24} \cdot \sum_{t=1}^{24} RZ_{i,j,m}(t)}}{I \cdot J \cdot M} \qquad \text{(Formel 3-21)}$$

mit: $n^b_{i,j,m}(t)$ Anteil der beobachteten Fahrten auf der Relation i, j, Verkehrsmittel m im Zeitintervall t an der Tagesnachfrage
$RZ_{i,j,m}(t)$ Reisezeit auf der Relation i, j, Verkehrsmittel m im Zeitintervall t
I Anzahl der Quellbezirke
J Anzahl der Zielbezirke
M Anzahl der Verkehrsmittel

Wie oben ausgeführt, dürfte es jedoch in einem realen System unmöglich sein, relationsscharf die Ganglinie der Nachfrage zu beobachten, viel weniger noch für einzelne Verkehrsmittel. Es wird also wie oben ein Verfahren benötigt, daß die Verwendung zeitlich differenzierter, räumlich und modal jedoch undifferenzierter Beobachtungsdaten zuläßt. Da die einzelnen Verkehrsmittel bzw. Verkehrssysteme jedoch zum Teil geradezu gegenläufige Verläufe der Ver-

kehrsqualität aufweisen (im MIV besteht üblicherweise in Spitzenintervallen die schlechteste Verkehrsqualität, während gleichzeitig daß ÖV-Angebot am besten ist), ist ein Verfahren erforderlich, mit dem eine gemeinsame Ganglinie der Verkehrsqualität für alle Verkehrsmittel gebildet werden kann. Sofern entsprechende Daten zur Verfügung stehen, können die Verlaufslinien der Verkehrsqualität der einzelnen Verkehrsmittel im Verhältnis ihrer Wichtigkeit für den jeweiligen Fahrtzweck gewichtet und zusammengefaßt werden.

$$n^w(t) = \frac{n^b(t)}{vq(t)} \qquad \text{(Formel 3-22)}$$

mit: $n^w(t)$ Anteil der originär gewünschten Fahrten im Zeitintervall t an der Tagesnachfrage
$n^b(t)$ Anteil der beobachteten Fahrten im Zeitintervall t an der Tagesnachfrage
$vq(t)$ Indikator der Verkehrsqualität im Zeitintervall t [%]

Die gemeinsame Ganglinie der Verkehrsqualität wird aus den Ganglinien der einzelnen Verkehrsmittel gebildet.

$$vq(t) = \frac{\sum_{m=1}^{M} F_m \cdot vq_m(t)}{\sum_{m=1}^{M} F_m} \qquad \text{(Formel 3-23)}$$

mit: F_m Tagesnachfrage für Verkehrsmittel m (alternativ: relative Bedeutung des Verkehrsmittels für den Fahrtzweck)

Der normierte Indikator für die Verkehrsqualität jedes Verkehrsmittels m wird aus der durchschnittlichen Geschwindigkeit jedes Zeitintervalls berechnet:

$$vq_m(t) = \frac{v_m(t)}{\bar{v}_m} = \frac{v_m(t)}{\frac{1}{24}\sum_{t=1}^{24} v_m(t)} \qquad \text{(Formel 3-24)}$$

Die durchschnittliche Geschwindigkeit v(t) fürjedes Zeitintervall und jedes Verkehrsmittel könnte folgendermaßen aus den gewichteten Reisegeschwindigkeiten der Relationen berechnet werden:

$$v_m(t) = \frac{\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J} F_{ijm} \cdot \frac{d_{ijm}(t)}{RZ_{ijm}(t)}}{\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J} F_{ijm}} \qquad \text{(Formel 3-25)}$$

mit: $d_{ijm}(t)$ Entfernung der Relation ij im Zeitintervall t für Verkehrsmittel m
$RZ_{ijm}(t)$ Reisezeit auf der Relation ij im Zeitintervall t für Verkehrsmittel m
F_{ijm} Tagesnachfrage auf der Relation ij für Verkehrsmittel m

Die oben dargestellten Annahmen des linearen Zusammenhangs von Verkehrsqualität und Verlagerung der Nachfrage bestehen weiterhin. Es ist durchaus vorstellbar, daß für unterschiedlich Verkehrsmittel m ganz verschiedene Verfahren zum Einsatz kommen, um die jeweilige Ganglinie der Verkehrsqualität $vq_m(t)$ aufzustellen. Während sich für den MIV die Verteilung der erforderlichen Reisezeit anbietet, könnte im ÖV die Takthäufigkeit, die Anschlußsicherung oder auch der Fahrpreis Bedeutung für die zeitlich differenzierte Verkehrsqualität haben. Für die nicht motorisierten Verkehrsmittel Fahrrad und zu Fuß wiederum läßt sich die Qualität des Verkehrsangebotes im Tagesverlauf womöglich gar nicht differenzieren. Solange die beobachtete Nachfrage sich modal nicht differenzieren läßt, ist es erforderlich daß die für individuelle Verkehrsmittel ermittelten Ganglinien der Verkehrsqualität am Ende zu einer gemeinsamen Ganglinie aggregiert werden.

Dieses Verfahren zur Berechnung einer zeitlichen Wunschverteilung der Fahrten eines Fahrtzweckes garantiert nicht, daß die Gesamtsumme der Wunschverteilung der Gesamtsumme aller beobachteten Fahrten entspricht. Zur Anwendung in einem Modellsystem empfiehlt sich ohnedies die Verwendung prozentualer Werte. Auch diese Verteilung muß nach jeder Umrechnung auf 100% normiert werden.

Nach der Ermittlung der Wunschverteilung kann diese zur Abbildung der simultanen Ziel-, Verkehrsmittel- und Zeitwahl herangezogen werden. Die Ziel- und Zeitwahlfunktion vom vorhergehenden Abschnitt wird also noch um die Verkehrsmittelwahl erweitert:

$$F_{i,j,m}(t) = Q_i \cdot A_j \cdot n^w(t) \cdot f(w_{i,j,m}(t)) \cdot c \qquad \text{(Formel 3-26)}$$

mit: Q_i Quellverkehr im Bezirk i
A_j Attraktivität des Zielbezirkes j
$n^w(t)$ Anteil der originär gewünschten Fahrten im Zeitintervall t an der Tagesnachfrage
$f()$ Bewertungsfunktion des verkehrlichen Widerstandes
$w_{i,j,m}(t)$ verkehrlicher Widerstand auf der Relation i,j, Verkehrsmittel m im Zeitintervall t
c Konstante zur Kontrolle der Gesamtfahrten im System

Zur Anwendung kommt dann z. B. die Bewertungsfunktion

$$f(w_{i,j,m}(t)) = w_{i,j,m}(t)^{\alpha} \cdot e^{-\beta \cdot w_{i,j,m}(t)} \qquad \text{(Formel 3-27)}$$

mit: α, β Kalibrierungsparameter

mit der Widerstandsfunktion:

$$w_{i,j,m}(t) = RZ_{i,j,m}(t) \qquad \text{(Formel 3-28)}$$

mit: $RZ_{i,j}(t)$ Reisezeit auf der Relation i, j, Verkehrsmittel m im Zeitintervall t

(In der Realität wird es notwendig sein, für jedes betrachtete Verkehrsmittel eine eigene Widerstands- und Bewertungsfunktion zu benutzen.)

Weiterhin muß die Summe aller Fahrten im System durch die Konstante c so angepaßt werden, daß $\sum_{i=i}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{m=1}^{M} F_{i,j,m} = \text{const.}$ Die simultan konkurrierenden Angebote für das dritte Gedankenmodell mit Verkehrsmittel- und Zielwahlalternative lauten folgerichtig (s. Tabelle 3-2):

von	nach		Intervall 1	Intervall 2	...	Intervall 24
Q	Ziel 1	VM 1	$A_1 \cdot n^w(1) \cdot f(w_{1,1,1}(1))$	$A_1 \cdot n^w(2) \cdot f(w_{1,1,1}(2))$	$A_1 \cdot n^w(t) \cdot f(w_{1,1,1}(t))$	$A_1 \cdot n^w(24) \cdot f(w_{1,1,1}(24)$
		VM 2	$A_1 \cdot n^w(1) \cdot f(w_{1,1,2}(1))$	$A_1 \cdot n^w(2) \cdot f(w_{1,1,2}(2))$	$A_1 \cdot n^w(t) \cdot f(w_{1,1,2}(t))$	$A_1 \cdot n^w(24) \cdot f(w_{1,1,2}(24)$
	Ziel 2	VM 1	$A_2 \cdot n^w(1) \cdot f(w_{1,2,1}(1))$	$A2 \cdot n^w(2) \cdot f(w_{1,2,1}(2))$	$A_2 \cdot n^w(t) \cdot f(w_{1,2,1}(t))$	$A_2 \cdot n^w(24) \cdot f(w_{1,2,1}(24$
		VM 2	$A_2 \cdot n^w(1) \cdot f(w_{1,2,2}(1))$	$A2 \cdot n^w(2) \cdot f(w_{1,2,2}(2)$	$A_2 \cdot n^w(t) \cdot f(w_{1,2,2}(t))$	$A_2 \cdot n^w(24) \cdot f(w_{1,2,2}(24$

Tabelle 3-2: Zeitlich-räumlich-modale Angebotsstruktur für eine Quelle, zwei Ziele, zwei Verkehrsmittel und 24 Zeitintervalle

Wenn man den Ansatz der simultanen Ziel-, Zeit-, und Verkehrsmittelwahl mit einer konventionellen Zielwahl vergleicht, muß man auch die Methoden zur Schätzung der Verflechtungs-

matrix berücksichtigen. Je nach Datenverfügbarkeit und Freiheitsgrad werden 'singly-' oder 'doubly-constrained' Schätzungsverfahren verwendet. D. h., daß neben der Gesamtfahrtenzahl F_{ij} entweder nur die Zeilensummen Q_i oder Spaltensummen Z_j oder alle beide als Randbedingungen vorgegeben und festgehalten werden. Ein gebräuchlicher Ansatz besteht darin, für Arbeits- und Ausbildungsfahrten sowohl Quell- als auch Zielverkehr vorzugeben; bei Einkaufs- Freizeit- und Besuchsverkehr jedoch nur den Quellverkehr zu limitieren.

Für den simultanen Ziel-, Zeit- und Verkehrsmittelwahlansatz bedeutet dies, daß jeweils pro Zeile oder Spalte über alle Zeitintervalle und Verkehrsmittel addiert werden muß, um die aktuelle Zeilen- oder Spaltensumme zu erhalten. Die Summe über alle Bezirke und Verkehrsmittel innerhalb eines Zeitintervalls stellt dagegen keine feste Randbedingung sondern einen Freiheitsgrad des Modells dar. Dies gilt genauso für die Summe über alle Bezirke und Zeitintervalle innerhalb eines Verkehrsmittels: Zeitwahl und Modal Split sind modellendogene Größen.

4 Implementierung des Modellierungskonzeptes

4.1 Vorbemerkung

Um die Verwendbarkeit des oben vorgestellten Modellierungskonzeptes zu demonstrieren, wird im folgenden die beispielhafte Umsetzung für ein Untersuchungsgebiet, die Region Stuttgart, beschrieben. In vielen Bereichen konnte dabei auf Daten aus der Erstellung des Regionalverkehrsplans sowie aus dem parallel bearbeiteten Forschungsprojekt 'Wege zu einer umweltverträglichen Mobilität – am Beispiel die Region Stuttgart (WUMS)' zurückgegriffen werden. Zum Vergleich und zur Ergänzung wurden in manchen Bereichen Auswertungen der KONTIV '89 hinzugezogen. Diese Daten liegen häufig weder räumlich noch zeitlich noch inhaltlich so differenziert vor, wie es der vorgestellte Ansatz erfordern würde. Bei genauer Analyse ergeben sich inhaltliche Inkonsistenzen innerhalb und zwischen den Datenquellen, die dazu führen, daß mit dem vorgestellten Modell nicht alle Randbedingungen bzw. Kontrollwerte eingehalten werden können. Weder im Rahmen des Forschungsprojektes noch dieser erweiterten Untersuchung war es möglich, eigene empirische Erhebungen durchzuführen. Das vorliegende Datenmaterial wird zum Teil in Form echter Eingangsdaten für das Modell herangezogen, in vielen Fällen dient es als mehr oder weniger globaler Kontoll- bzw. Zielwert zur Kalibrierung der Modellparameter. Wo immer erforderlich, wurden sinnvolle Annahmen für weitere differenzierte Zielwerte getroffen, die empirisch nicht belegt werden können. Das hier vorgestellte Modell muß sich in Ermangelung anderer Daten sowohl methodisch als auch strukturell eng an die beiden genannten und miteinander verwobenen Projekte anlehnen.

Die beispielhafte Umsetzung erhebt nicht den Anspruch, die Realität in der Region Stuttgart besser abzubilden, als die der Modellierung zugrundeliegenden Arbeiten zum Regionalverkehrsplan und zum Forschungsprojekt WUMS. Es wird jedoch der Nachweis erbracht, daß auf Basis der vorgestellten Theorie ein anwendbares Modell erstellt werden kann und daß es sich im Rahmen von Vorgaben kalibrieren läßt, plausible Ergebnisse liefert und auf Veränderungen der Randbedingungen realistisch reagiert.

Nur im MIV wird die Widerstandstabelle (Verkehrsangebot) in Abhängigkeit von der Nachfrage berechnet (capacity restraint Verfahren). Das Gleichgewicht zwischen Angebot und Nachfrage muß iterativ ermittelt werden. Bei den anderen Verkehrsmitteln wird – auch aus Aufwandsgründen – das Verkehrsangebot unabhängig von der jeweiligen Nachfrage beschrieben. Der Modellierungsschritt der Verkehrsumlegung wird deshalb nur für den Straßenverkehr durchgeführt. Beeinträchtigungen des Straßenverkehrs durch Fußgänger, Radfahrer oder den straßengebundenen öffentlichen Verkehr werden nicht berücksichtigt.

Die Modellierung baut auf Daten des Jahres 1995 auf. Um die Wirkungsweise des Modells zu demonstrieren ist es nicht notwendig eine Prognoserechnung für einen Prognosezeitpunkt durchzuführen. Im Rahmen solcher Prognoserechnungen werden üblicherweise eine Vielzahl von Randbedingungen geändert, so daß die genaue Untersuchung der Effekte von Maßnahmen und ihre Überlagerungen eher erschwert wird. Stattdessen soll hier bei weitgehend konstanten Rahmenbedingungen gezielt die Wirkungen einer ausgewählten Maßnahme aus dem Betrieb des Straßenverkehrs untersucht und dokumentiert werden. Es handelt sich also um eine rein hypothetische Betrachtung im Kontext des Untersuchungsjahres 1995.

4.2 Räumliche Abgrenzung

Die Implementierung des Beispiels muß sich alleine aus Gründen der Datenverfügbarkeit stark an der räumlichen Struktur des Regionalverkehrsplans für die Region Stuttgart anlehnen. Der Planungsraum (s. Karte 1) besteht aus den 5 Landkreisen Böblingen (BB), Esslingen (ES), Göppingen (GP), Ludwigsburg (LB), Rems-Murr-Kreis (WN) sowie der Landeshauptstadt Stuttgart (S), die zusammen die Region Stuttgart bilden. Die 178 Gemeinden sind in 624 Verkehrsbezirke 3. und 4. Ordnung[14] gegliedert (s. Karte 2). Die umliegenden Landkreise bilden in Form von 136 erheblich größeren Verkehrszellen (2. Ordnung) den Umgebungraum UR. Für diese 760 Verkehrsbezirke liegen Strukturdaten vor, so daß sie in die Beispielanwendung einbezogen werden können. Der Untersuchungsraum des Regionalverkehrsplans wird durch 20 virtuelle Verkehrsbezirke des äußeren Umgebungsraums URa ergänzt, über welche die Anbindung an die Fernziele erfolgt.

4.3 Erzeugungsmodell

Die Verkehrserzeugung wird nicht von dem vorgestellten Modellierungskonzept abgedeckt. Aus diesem Grund wurde der Erzeugungsansatz aus den Arbeiten zum Regionalverkehrsplan übernommen und so angepaßt, daß das simultane Verteilungs-, Aufteilungs-, und Zielwahlmodell darauf aufsetzen kann. Es handelt sich dabei um einen Wegekettenansatz auf Basis von verhaltenshomogenen Gruppen.

Für jeden der 624 Verkehrsbezirke des Planungsraums und 136 Verkehrsbezirke des Umgebungsraums UR liegen aus dem Forschungsprojekt WUMS die Einwohnerdaten für das Jahr 1995 differenziert nach Geschlecht und Altersgruppe vor. Über entsprechende Zuordnungsfaktoren (s. Anhang 1) können die strukturierten Einwohnerzahlen auf verhaltenshomogene Bevölkerungsgruppen aufgeteilt werden. Für jede der 11 verhaltenshomogenen Gruppen sind typische Mobilitätsmuster in Form von 28 unterschiedlichen Wegeketten (s. Anhang 2) mit jeweils zwei oder drei Wegen hinterlegt. Durch Ausmultiplizieren erhält man die von jedem Verkehrsbezirk ausgehenden Wegeketten. Diese Wegeketten werden im Regionalverkehrsplan (Modellpaket VISUM) bzw. im Forschungsprojekt WUMS (WUMS-Modell) zur Modellierung der Verkehrsnachfrage genutzt.

Die Wegeketten enthalten die Fahrtzwecke Arbeit (A), Ausbildung (S), Einkaufen (E), Freizeit (F) und Hochschule (H). Die Gründe für die getrennte Aufnahme des zahlenmäßig schwachen Fahrtzweckes Hochschule ist nur im Kontext des Regionalverkehrsplans verständlich. Der wichtige Fahrtzweck dienstliche Erledigung fehlt hier; im Regionalverkehrsplan wird er im Rahmen der Lkw-Nachfragematrix abgedeckt. Der Ansatz kann nicht ganz befriedigen, konnte jedoch weder im Rahmen des Forschungsprojektes WUMS noch dieser Untersuchung verbessert werden, da keine Möglichkeit bestand, eigene Empirie zu betreiben.

Der in Kapitel 3.4 vorgestellte Modellierungsansatz kann (noch) keine Wegeketten berücksichtigen. Stattdessen werden die Wegeketten in ihre Einzelwege aufgelöst und diese Einzelwege dem jeweiligen Startbezirk der Kette zugeordnet. Der entstehende Fehler ist relativ klein, da 70% der in den Mobilitätsmustern festgelegten Ketten nur zwei Wege enthalten. Le-

[14] Die hierarchische Einteilung der Region Stuttgart orientiert sich an den Landkreisen (1. Ordnung), Gemeindegrenzen (2. Ordnung), Ortsteilen (3. Ordnung) und in der Landeshauptstadt Stuttgart Nachbarschaften (4. Ordnung)

diglich bei den Ketten mit drei Wegen müßte der jeweils zweite Weg einem anderen Startbezirk (dem Zielbezirk des ersten Weges) zugewiesen werden.

Zur Berechnung der Attraktivität A_j der Ziele wurden in umfangreichen Korrelationsrechnungen die Nachfragematrizen aus dem Regionalverkehrsplan mit geeigneten Strukturdaten in Korrelation gebracht und für jeden Fahrtzweck entsprechende Regressionsgleichungen aufgestellt (Englmann, u. a., in Vorbereitung):

Fahrtzweck Arbeit:

$$A_j = 1{,}000 \cdot AP \qquad \text{(Formel 4-1)}$$

Fahrtzweck Ausbildung:

$$A_j = 0{,}126 \cdot AP + 0{,}157 \cdot GSP + 0{,}235 \cdot GYP + 0{,}156 \cdot HSP + 0{,}326 \cdot RSP \qquad \text{(Formel 4-2)}$$

Fahrtzweck Einkauf:

$$A_j = 0{,}868 \cdot APE + 0{,}125 \cdot EW + 0{,}07 \cdot VFE \qquad \text{(Formel 4-3)}$$

Fahrtzweck Freizeit:

$$A_j = 0{,}033 \cdot BAE + 0{,}122 \cdot APE + 0{,}171 \cdot APG + 0{,}526 \cdot EW + 0{,}023 \cdot FB +$$
$$+0{,}001 \cdot GTH + 0{,}086 \cdot FZG + 0{,}022 \cdot SPL + 0{,}005 \cdot TH + 0{,}011 \cdot VFE \qquad \text{(Formel 4-4)}$$

Fahrtzweck Hochschule:

$$A_j = 1{,}000 \cdot UNI \qquad \text{(Formel 4-5)}$$

Mit:

AP	Beschäftigte	GTH	Großturnhallen
APE	Beschäftigte im Einzelhandel	GYP	Gymnasialplätze
APG	Beschäftigte im Gastgewerbe	HSP	Hauptschulplätze
BAE	Bäder	RSP	Realschulplätze
EW	Einwohner	SPL	Sportplätze
FB	Fremdenbetten	TH	Turnhallen
FZG	sonstige Freizeitgelegenheiten	UNI	Hochschulplätze
GSP	Grundschulplätze	VFE	Verkaufsfläche im Einzelhandel

Als Ergebnis des Modellschrittes der Erzeugung liegen fünf eindimensionale Vektoren der erzeugten Fahrten Q_i eines Tages für jeden Verkehrsbezirk und getrennt für fünf Fahrtzwecke vor. Damit korrespondieren die fünf eindimensionalen Vektoren der fahrtzweckspezifischen Zielgewichte[15] Z_j für jeden Verkehrsbezirk.

[15] Im folgenden wird statt der Attraktivität A_j der Zielzellen j das Zielgewicht Z_j der angezogenen Personenfahrten verwendet. Die Z_j entsprechen den auf die Gesamtfahrtenzahl normierten A_j.

4.4 Simultane Verteilung, Aufteilung, Zeitwahl

4.4.1 Vorbemerkung

Das simultane Wahlmodell ist das Kernstück des Modellierungsansatzes. Es erfordert zum einen umfangreiche Analysen der vorliegenden Datenbestände, um Zielwerte für die Kalibrierung festzulegen. Aus der beobachteten zeitlichen Verteilung der Nachfrage und der Tagesganglinie der Verkehrsqualität muß die zeitliche Wunschlinie der fahrtzweckspezifischen Nachfrage abgeleitet werden. Zur Darstellung des Verkehrsangebotes der verschiedenen Verkehrsträger muß die Erreichbarkeit zwischen den Verkehrsbezirken in Widerstandsmatrizen dargestellt werden. Die bisher allgemein dargestellten Bewertungsfunktionen des Wahlmodells müssen konkret angewendet und parametrisiert werden. Und nicht zuletzt muß ein Programmcode geschrieben werden, mit dem die umfangreichen Berechnungen in akzeptabler Zeit abgearbeitet werden können.

In diesem Kapitel werden zuerst die zeitlich differenzierten Widerstandsmatrizen vorgestellt, die das Verkehrsangebot im Untersuchungsgebiet beschreiben. Sie konnten in weiten Bereichen aus dem Forschungsprojekt WUMS übernommen werden. Für den nicht motorisierten Verkehr und den Zellbinnenverkehr aller Verkehrsträger mußten Erweiterungen durchgeführt werden.

Als nächstes wird untersucht, welche Datenbasen geeignet sind, um die Wunschlinien der fahrtzweckspezifischen Nachfrage im Tagesverlauf aufzustellen. Dies führt direkt zur Formulierung und Parametrisierung der Bewertungsfunktionen des Widerstandes der verschiedenen konkurrierenden Verkehrssysteme und zur Beschreibung des verwendeten Konvergenzverfahrens, um die Randbedingungen der Nachfragematrix zu erfüllen.

Zuletzt ist es noch notwendig, globale Zielwerte für den Modal Split und die Fahrtweitenverteilung der einzelnen Fahrtzwecke festzulegen, um das Nachfragemodell entsprechend kalibrieren zu können.

4.4.2 Widerstandsmatrizen

Motorisierter Individualverkehr

Im Rahmen des Forschungsprojektes WUMS wurde ein Verkehrsumlegungsprogramm (Bächtle, 1996) für den MIV entwickelt, welches nacheinander beliebig viele Nachfrageintervalle unterschiedlicher Breite verarbeiten kann (s. Kapitel 4.5.6). Es handelt sich dabei um eine statische Modellierung, da die Nachfrage eines Zeitintervalls keine Auswirkungen auf die Verkehrsqualität der nachfolgenden Intervalle hat. Serwill (1994) hat sehr konkrete Überlegungen zu dynamischen Umlegungsverfahren angestellt, aus Aufwandsgründen konnten sie jedoch hier nicht umgesetzt werden. Das Modell arbeitet mit Nachfrage-Geschwindigkeits-Funktionen auf Stundenbasis. Diese wurden direkt aus den Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen – EWS übernommen. Alle Nachfrageintervalle werden deshalb linear auf Stundenbelastungen umgerechnet und in mehreren Schichten mit einem Bestwegverfahren umgelegt. Für jedes Zeitintervall wird anschließend eine vollständige Widerstandsmatrix gespeichert, d. h. die Fahrtzeit, die Fahrtstrecke und die entstehenden monetären Kosten werden für jede Quell-Ziel-Relation registriert. Änderungen in der Ver-

kehrsqualität, die z. B. durch hohe Belastungen in den Spitzenstunden bewirkt werden, können damit relationsscharf und zeitlich diskret ausgewiesen werden. Problematisch ist die Darstellung und Dokumentation der mehr als 500.000 Relationen der Matrix, die nur in aggregierter Form erfolgen kann.

MIV-Widerstandsmatrix und MIV-Nachfragematrix beeinflußen sich gegenseitig, d. h. das Gleichgewicht von Angebot und Nachfrage kann nur iterativ berechnet werden. Um diesen Prozeß anzustoßen, wurde für die Berechnung der ersten Nachfragematrix eine Widerstandsmatrix aus dem Forschungsprojekt WUMS für das Analysejahr 1995 übernommen. Im nächsten Iterationsschritt konnte dann auf die Widerstandsmatrix aus der Umlegung der ersten Nachfragematrix des simultanen Wahlmodells aufgebaut werden.

MIV-Umlegungsmodell und Netzkodierung erlauben nicht die Umlegung des Zellbinnenverkehrs. Für die Binnenrelationen liefert das Umlegungsverfahren deshalb keine MIV.-Widerstandswerte. Diese müssen auf anderem Wege gewonnen und zur Widerstandsmatrix addiert werden. Für die Zellbinnenrelationen innerhalb der Region Stuttgart wurde der Ansatz zur Ermittlung des NMIV-Binnenwiderstandes (s. unten) herangezogen. Die gemittelte Luftlinienentfernung zwischen allen Punkten der Siedlungsfläche(n) eines Bezirks (Binnenradius) wird mit dem Umwegfaktor 1,5 in eine durchschnittliche Fahrtstrecke für eine Fahrt innerhalb des Bezirks umgerechnet. Über die durchschnittliche Reisegeschwindigkeit von 7 m/s erhält man die zugehörige Reisezeit. Für die 136 Bezirke des Umgebungsraumes konnten die Binnenradien nicht berechnet werden, weil die erforderlichen Daten zu den Siedlungsflächen nicht vorlagen. Stattdessen wurde eine durchschnittliche Zellbinnenentfernung von 5.000 m und eine durchschnittliche Binnenfahrtzeit von 12 Minuten ($\cong$ 7 m/s) angenommen. Die zeitliche Differenzierung der Zellbinnenwiderstände des MIV war nicht möglich; die Verkehrsqualität auf den Binnenrelationen ist über den Verlauf eines Tages konstant und wird auch nicht durch die Nachfrage beeinflußt.

Öffentlicher Personenverkehr

Ebenfalls aus dem Forschungsprojekt WUMS stammt das ÖV-Umlegungsprogramm mit Mehrwegsuche. Zur Angebotsermittlung kann eine Widerstandsmatrix ausgegeben werden. Das Verkehrsangebot im ÖV wird differenziert nach Hauptverkehrszeit (6.00 bis 8.00 Uhr und 15.00 bis 17.00 Uhr), Nebenverkehrszeit (8.00 bis 15.00 Uhr und 17.00 bis 19.00 Uhr) und Schwachverkehrszeit (5.00 bis 6.00 Uhr und 19.00 bis 24.00 Uhr) dargestellt. Zwischen 24 Uhr und 5 Uhr besteht im Modell kein ÖV-Angebot. Verfügbar sind für jede Relation die Reisezeit, die Fahrtkosten, die resultierende Entfernung, die Bedienungshäufigkeit und der Schnellbahnanteil. Da der Schwerpunkt dieser Untersuchung nicht bei der Komposition des ÖV-Widerstandes liegt, wurden zur Vereinfachung nur die Entfernung, die Reisezeit und die Fahrtkosten für das simultane Wahlmodell aufbereitet. Auf weiten Relationen gibt es häufig zu den Schwachverkehrszeiten und zum Teil schon in der Nebenverkehrszeit kein ÖV-Angebot, die Bedienungshäufigkeit ist 0. In diesen Fällen wurden jeweils sehr hohe "Dummywerte" (Reisezeit > 24 h) eingetragen. Im Gegensatz zum MIV enthält die ÖV-Widerstandsmatrix bereits Informationen zum Binnenwiderstand der Verkehrszellen.

Die vorliegenden ÖV-Daten stammen aus dem Analysefall 1995 des Forschungsprojektes WUMS. Die Parameter sind unabhängig von der Nachfrage; im Gegensatz zur MIV-Widerstandsmatrix muß die ÖV-Widerstandsmatrix nicht iterativ berechnet werden. Für die Beispielimplementierung werden die Angebotsdaten des ÖV sowohl für den Bezugsfall als

auch für den Maßnahmefall konstant gehalten. Die ÖV-Umlegung mit Analyse der Linienbelastung, Beförderungsleistung, Umsteigezeiten, etc. wurde nicht durchgeführt.

Nicht motorisierter Personenverkehr

Um die nicht motorisierten Verkehrsmittel in gleicher Weise behandeln zu können, wie die motorisierten Verkehrsmittel ist auch für sie eine Widerstandsmatrix erforderlich. In erster Näherung können die Entfernungen zwischen Verkehrsbezirken, die aus dem MIV-Netzmodell abgeleitet werden, herangezogen werden. Dies würde jedoch zum einen nicht berücksichtigen, daß dem Fuß- und Radverkehr erheblich mehr kleinräumige Wegeverbindungen zur Verfügung stehen als dem MIV. Außerdem wäre das Problem des Binnenverkehrs nicht gelöst. Bei den vorgegebenen Verkehrsbezirksgrößen muß ein ganz erheblicher Anteil des nicht motorisierten Verkehrs mit Quelle und Ziel jeweils innerhalb derselben Verkehrszelle modelliert werden. Die Verkehrszellen unterscheiden sich jedoch deutlich nach Größe und Besiedlungsdichte, sind somit unterschiedlich attraktiv für den nicht motorisierten Verkehr. Andere Einflußfaktoren, wie z. B. topographische Besonderheiten oder große, trennende Verkehrswege haben sicherlich auch Einfluß auf die Attraktivität für den NMIV. Hiller (1997) konnte jedoch anhand der im Projekt vorliegenden Daten keine signifikanten Zusammenhänge zum Verkehrsaufkommen nachweisen, dies dürfte jedoch im wesentlichen an der mangelhaften Qualität der empirischen Erhebungsdaten zum Rad- und Fußgängerverkehr gelegen haben.

Um überhaupt eine Differenzierung der Attraktivität unterschiedlicher Zellen für den NMIV vornehmen zu können, wurde eine Methodik angewendet, mit der die Besiedlungsdichte der Zellen beschrieben wird. Dies geht von der Überlegung aus, daß in kompakten, dicht besiedelten Verkehrsbezirken (z. B. Stadtteile einer Großstadt) bessere Möglichkeiten bestehen, attraktive Ziele in fußläufiger bzw. für den Radverkehr geeigneter Entfernung zu erreichen, als in großflächigen Bezirken mit verstreut lebender Bevölkerung (z. B. im ländlichen Raum).

Als Datengrundlage standen ATKIS-Daten[16] der Flächennutzung sowie die Einwohner- und Strukturdaten für alle Verkehrsbezirke zur Verfügung. Mit Hilfe der ATKIS-Daten läßt sich die bebauten Flächen zwischen reinen und allgemeinen Wohngebieten, Gewerbegebieten und Sonderflächen unterscheiden. Die spezifische Siedlungsdichte einzelner Teilflächen konnte leider nicht ermittelt werden. Je nach Fahrtzweck sollten die unterschiedlich genutzten Flächen stärker gewichtet werden (Beispielsweise sollten für die Fahrt Wohnung – Arbeit die Quellen an die Wohnflächen, die Ziele an die Gewerbegebiete oder Sondernutzungen angebunden werden). Dies ließ sich jedoch aus Aufwandsgründen nicht durchführen. Um den Binnenwiderstand eines Verkehrsbezirks für Fuß- und Radwege festzulegen, wurde eine gleichmäßige Nutzungsdichte für Einwohner, Arbeitsplätze, Schulplätze, Einkaufsgelegenheiten und Freizeitziele für alle Siedlungsflächen[17] unterstellt. Die Strukturgrößen sind dann gleichsam über die gesamte Siedlungsfläche des Verkehrsbezirks gleichverteilt.

Als Widerstandswert für die nicht motorisierten Verkehrsmittel wurde die durchschnittliche Entfernung $\bar{d}$ zwischen zwei beliebigen Punkten der Siedlungsfläche dieses Bezirks eingeführt. Diese Entfernung ist unabhängig vom realen Straßen- und Wegenetz des Verkehrsbezirks. Dabei wurde unterstellt, daß die Binnenerschließung aller Verkehrsbezirke gleich gut sei. Für einige Bezirke mit besonderen topographischen Schwierigkeiten führt das sicherlich

[16] Amtliches topographisch-kartographisches Informationssystem ATKIS

[17] Die Siedlungsfläche schließt alle baulich genutzten Teilflächen eines Verkehrsbezirks ein. Sie enthält nicht die landwirtschaftlichen Flächen, Wälder, Verkehrswege, Gewässer.

zu Verzerrungen, es bestand jedoch keine Möglichkeit das für den Rad- und Fußgängerverkehr geeignete Straßen- und Wegenetz aller Verkehrsbezirke vollständig zu erfassen und zu bewerten. Die Entfernung $\bar{d}$ wird gebildet als Mittelwert der Entfernungen d aller Punkte der Siedlungsfläche eines Bezirks mit allen anderen Punkten desselben Bezirks.

$$\bar{d}_i = \frac{\sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{N}\sqrt{(x_n - x_m)^2 + (y_n - y_m)^2}}{N^2} \qquad \text{(Formel 4-6)}$$

für alle (N) Punkte $P_n(x_n,y_n)$ und $P_m(x_m,y_m)$ der Siedlungsfläche eines Bezirkes i mit orthogonalen Koordinaten x und y

Diese Methodik eignet sich in gleicher Weise, um die Entfernung zu den jeweiligen Nachbarbezirken für den Fuß- und Radverkehr zu bewerten. In diesem Fall wird der Mittelwert der Entfernungen d aller Punkte des Bezirks i mit allen Punkten des Bezirks j gebildet.

$$\bar{d}_{ij} = \frac{\sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{M}\sqrt{(x_n - x_m)^2 + (y_n - y_m)^2}}{N \cdot M} \qquad \text{(Formel 4-7)}$$

für alle (N) Punkte $P_n(x_n,y_n)$ der Siedlungsfläche eines Bezirkes i und (M) Punkte $P_m(x_m,y_m)$ der Siedlungsfläche eines Bezirkes j mit orthogonalen Koordinaten x und y

Mit Hilfe eines geographischen Informationssystems wurden alle Siedlungsflächen im Untersuchungsgebiet erfaßt, gerastert, und ihren jeweiligen Verkehrsbezirken zugeordnet. Das angewendete Raster hatte 50 m Kantenlänge. Für jeden Verkehrsbezirk liegen die relevanten Siedlungsflächen in Form von Koordinatenpaaren jedes erfaßten Rasterpunkts vor. Die Entfernung zwischen je zwei dieser Punkte kann leicht aus ihren jeweiligen Koordinaten berechnet werden. Die Einzelentfernungen können klassifiziert und ihr Mittelwert bestimmt werden. Damit erhält man für jeden Bezirk eine durchschnittliche Binnenentfernung und eine zugehörige Entfernungsverteilung. Abbildung 4-1 zeigt beispielhaft einen Ausschnitt für 7 Bezirke der Stadt Kirchheim u. T.

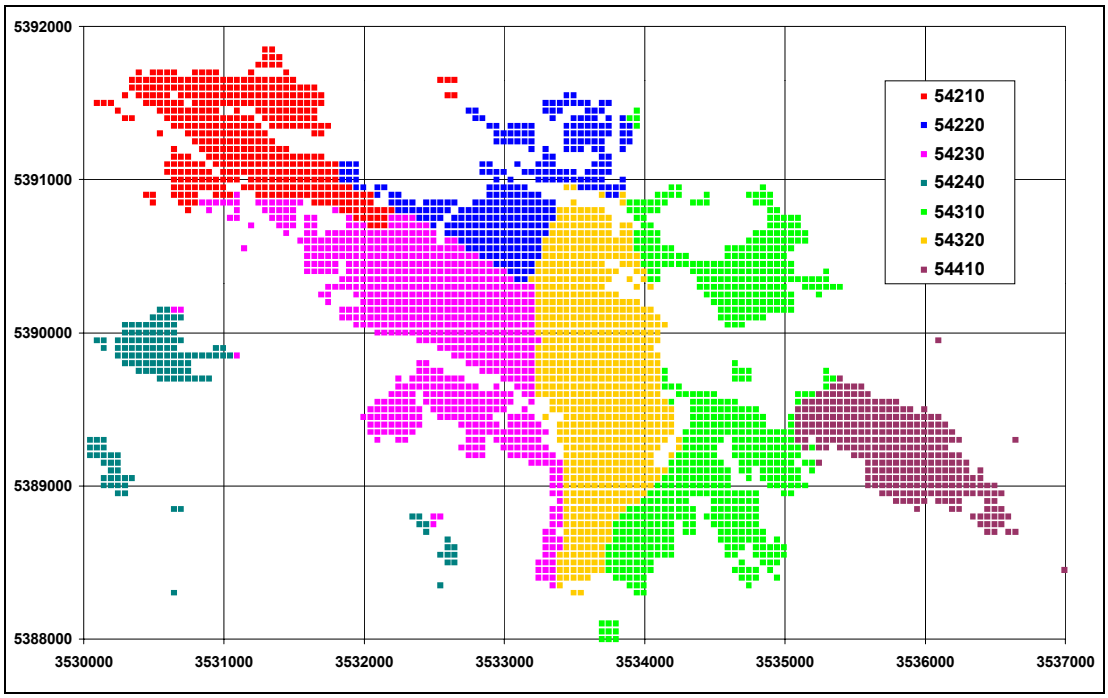


Abbildung 4-1: Siedlungsfläche der Verkehrsbezirke im 50m-Raster (Ausschnitt Kirchheim u. T., Gauß-Krüger-Koordinaten).

Tabelle 4-1 zeigt die durchschnittliche Binnenentfernung für die ausgewählten Verkehrsbezirke. Die Bezirke mit einer kleinen, kompakten Fläche, wie z. B. Bezirk 54410, haben erwartungsgemäß eine geringere durchschnittliche Binnenentfernung. Große oder weniger kompakte Bezirke zeigen eine größere Binnenentfernung. Alle Entfernungsangaben beziehen sich auf die Luftlinienentfernung. Um eine realistische Reiseweite für den NMIV zu erhalten, muß die Entfernung noch mit einem Umwegfaktor multipliziert werden.

Am Beispiel von 54240 lassen sich gut die Effekte von Bezirken mit mehreren Siedlungsflächen erläutern: Während die Wege innerhalb der einzelnen Siedlungsteile nur relativ kurze Distanzen ausmachen (erster Gipfel), sind die Wege zwischen den beiden westlichen Siedlungsteilen schon weiter (zweiter Gipfel). Der dritte Gipfel der Verteilung wird durch die Verknüpfungen der ersten beiden Siedlungsflächen mit dem kleinen östlichen Ortsteil erzeugt.

Verkehrs-bezirk	mittlere Entfernung [m]
54210	681
54220	665
54230	928
54240	886
54310	1.094
54320	815
54410	587

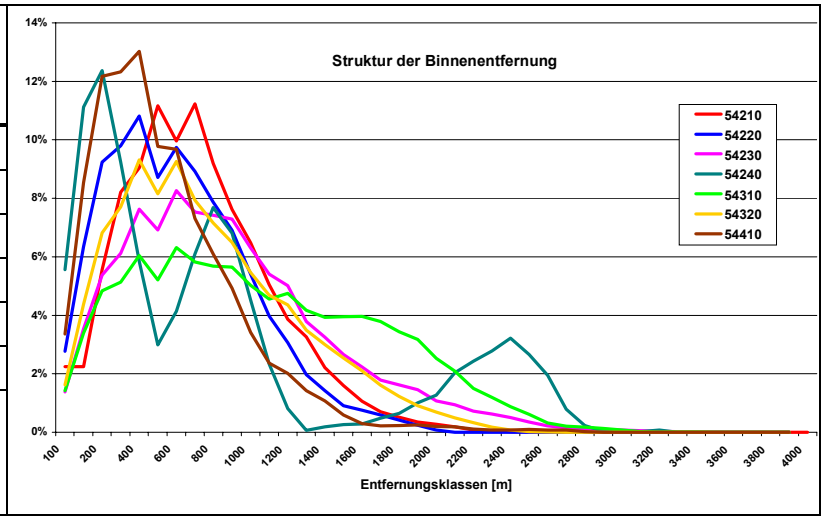


Tabelle 4-1: Mittlere Binnenentfernung (Luftlinie) und Entfernungsverteilung der ausgewählten Verkehrsbezirke.

Die durchschnittliche Entfernung und die relative Verteilung der Entfernung ist noch kein Maß für die Eignung eines Bezirks für den NMIV. Sie stellen lediglich Wahrscheinlichkeiten für die Länge eines zufälligen Weges dar, dessen Quelle und Ziel im selben Bezirk liegen (unter den oben erläuterten Annahmen der flächigen Gleichverteilung aller Strukturgrößen über die jeweiligen Teilflächen) und gelten unabhängig vom genutzten Verkehrsmittel. Die Verkehrsmittelaufteilung kann erst auf der Basis der verkehrsmittelspezifischen Bewertung der durchschnittlichen Entfernung erfolgen.

Hier tritt beim Fuß- und Radverkehr eine spezifische Problematik auf: Übliche Bewertungsverfahren messen ab einer relativ geringen Entfernung (ca. 5 km im Fußverkehr und 10 km im Radverkehr) den nicht motorisierten Verkehrsmitteln kein Potential mehr zu. Einem Verkehrsbezirk mit zwei weit auseinanderliegenden Teilflächen wird mit dem beschriebenen Verfahren eine sehr hohe durchschnittliche Entfernung zugewiesen. Dies kann dazu führen, daß dem NMIV keine Potential zugewiesen wird, obwohl die Bedingungen innerhalb jeder der Teilflächen durchaus günstig wären. Auch ein flächenmäßig extrem großer, aber kompakter Verkehrsbezirk erhielte mit dem beschriebenen Verfahren eine sehr große Durchschnittsentfernung. Dennoch könnten für den NMIV günstige kleinräumige Bedingungen bestehen. Es wäre also lohnenswert in Zukunft nicht nur die durchschnittliche Binnenentfernung sondern auch die Entfernungsverteilung innerhalb eines Bezirks bei der Bewertung zu berücksichtigen.

Das oben beschriebene Verfahren zur Berechnung der durchschnittlichen Entfernung wurde auch für alle Bezirkspaare durchgeführt. Da das Modell innerhalb der Region Stuttgart 624 Bezirke enthält und somit 194.376 Bezirkspaare zu bearbeiten waren, wurden in einem ersten Schritt alle Bezirkspaare ausgesondert, deren Mittelpunkte mehr als 15 km voneinander entfernt liegen. In diesem Entfernungsbereich wurde der Fuß- und Radverkehr tatsächlich als unerheblich erachtet. Es verblieben ca. 40.000 Relationen innerhalb der Region Stuttgart, auf denen Rad- und Fußverkehr möglich erschien. Für die Bezirke des Umgebungsraumes UR standen keine ATKIS-Daten der Siedlungsfläche zur Verfügung. Das beschriebene Verfahren wurde deshalb nur für die Bezirke innerhalb der Region Stuttgart angewendet. In der Verflechtung mit dem Umgebungsraum wurde kein nicht motorisierter Verkehr modelliert. Dies hatte selbstverständlich auch Konsequenzen für die randnahen Bezirke innerhalb der Region.

Ziel-Verkehrs-bezirk	mittlere Entfernung [m]
54210	3.013
54220	1.504
54230	1.454
54240	3.134
54310	1.326
54410	2.314

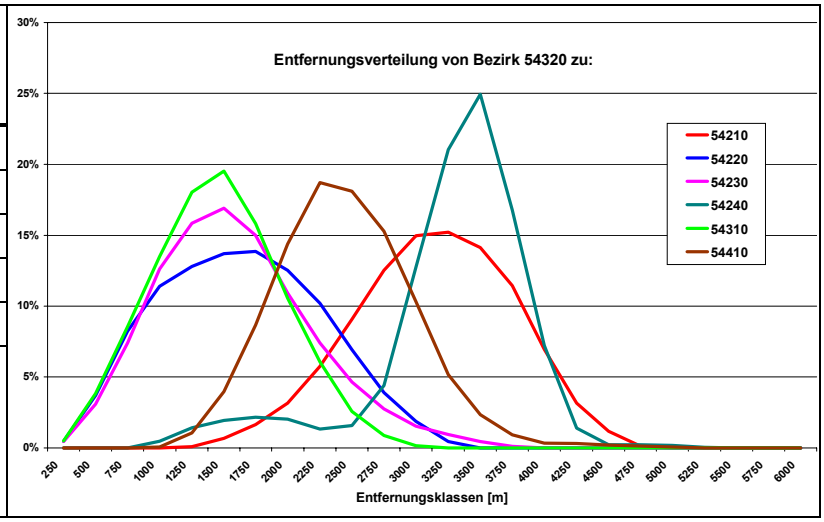


Tabelle 4-2: Mittlere Luftlinienentfernung und Entfernungsverteilung von Bezirk 54320 zu den ausgewählten Nachbarverkehrsbezirken.

Tabelle 4-2 zeigt die durchschnittliche Entfernung und ihre jeweilige Verteilung von Bezirk 54320 zu seinen ausgewählten Nachbarbezirken. Die direkt angrenzenden Nachbarbezirke 54220, 54230 und 54310 haben die kürzesten durchschnittlichen Entfernungen, die auch für die nicht motorisierten Verkehrsmittel erhebliches Potential bergen. Aber auch die anderen Bezirke liegen in einer Entfernung, die zumindest für den Radverkehr noch realistisch ist. Das gezeigte Verfahren lieferte realistischere Werte als das MIV-Netzmodell, das sich zwangsläufig auf einen fiktiven Schwerpunkt jedes Bezirkes stützen muß. Die hohe Ausstattung mit land- und forstwirtschaftlichen Wegen in der Region Stuttgart rechtfertigte die Annahme, daß dem nicht motorisierten Verkehr flächendeckend Verbindungen zu Verfügung stehen, die sich mit Hilfe eines einheitlichen Umwegfaktors aus der jeweiligen Luftlinienentfernung berechnen ließen.

Dennoch gelten auch für die Berechnung der durchschnittlichen Entfernung zu den Nachbarbezirken die oben angeführten Einwände. Ungünstige Größen und Zuschnitte der Verkehrsbezirke können zu der Situation führen, daß eine sehr hohe durchschnittliche Entfernung kein Potential für den NMIV ausweist, obwohl zwischen einzelnen Teilflächen durchaus günstige kurze Distanzen bestehen.

Die Widerstandsmatrix für den nicht motorisierten Verkehr enthält im Ergebnis gut 80.000 Relationen (Hin- und Rückrichtung getrennt, Zellbinnenverkehr einfach), die für den nicht motorisierten Verkehr geeignet erscheinen. Die mit dem beschriebenen Verfahren berechnete durchschnittliche Luftlinienentfernung zwischen den Siedlungsflächen der Bezirke ist hier je-

weils kürzer als 15 km. Die Widerstandsmatrix des NMIV ist in ihrer Rohform identisch für den Rad- und den Fußgängerverkehr. Den beiden nicht motorisierten Verkehrsarten werden unterschiedliche Umwegfaktoren[18] (Fuß: 1,1 und Rad: 1,3) und unterschiedliche durchschnittliche Reisegeschwindigkeiten[19] (Fuß: 1,2 m/s und Rad: 4,2 m/s) zugeordnet, so daß die Reisezeiten voneinander verschieden ausfallen. Es findet keine zeitliche Differenzierung statt, d. h. die Verkehrsqualität im NMIV ist unabhängig von der Tageszeit. Die Verkehrsnachfrage des NMIV beeinflußt im Modell die Verkehrsqualität nicht.

4.4.3 Tageszeitliche Wunschlinien der Verkehrsnachfrage

Vorbemerkung

Die Ermittlung der Wunschlinien der Verkehrsnachfrage ist ein Kernpunkt des vorgestellten Konzeptes. Dazu werden zum einen differenzierte Beobachtungen der realisierten Verkehrsnachfrage und zum anderen korrespondierende Informationen über das zeitgleich vorliegende Verkehrsangebot benötigt. Die Differenzierung ist räumlich (Verkehrszellen, Relationen), zeitlich (Wochentag, Zeitintervalle, kontinuierlich) und inhaltlich (Wegezweck, Wegekette, Verkehrsmittel, Personendaten) vorstellbar.

Wunschlinien der Verkehrsnachfrage lassen sich räumlich differenziert für einzelne Verkehrszellen oder Relationen nicht ermitteln. Selbst die Analyse auf Basis größerer Aggregate, z. B. Landkreise, ergibt wenig Sinn, da sie die Stichprobengröße reduziert und statistisch kaum verwertbare Erkenntnisse liefert. Die zeitliche Differenzierung hingegen ist unabdingbar für den Modellierungsansatz. Die in manchen Verkehrserhebungen abgefragten Startzeiten für Fahrten liegen in Form von kontinuierlichen Zeitangaben vor. Um jedoch interpretierbare Ganglinien mit ausreichenden Stichprobengrößen zu erhalten ist es notwendig, Zeitintervalle zu bilden. Die Einteilung der Klassen entsprechend den 24 Stunden eines Tages bietet sich an. Im allgemeinen sind nur Werktagsdaten verfügbar, die nicht weiter nach Wochentagen analysiert werden können. Bei der inhaltlichen Differenzierung stößt man bei empirischen Datensätze sehr schnell an die Grenze der Stichprobengrößen. Die Unterscheidung von konkretem Wegezweck und Verkehrsmittel stellt im Allgemeinen bereits das Maximum der Differenzierung dar, für die noch belastbare Aussagen getroffen werden können. Die Analyse nach soziodemographischen Merkmalen erzwingt die Aufgabe der wichtigen Merkmale Verkehrsmittel oder Wegezweck und wird deshalb nicht weiterverfolgt.

Die flächenhafte empirische Erhebung des Verkehrsangebotes bzw. der Verkehrsqualität für den MIV ist generell sehr aufwendig. Die stichprobenhafte Erhebung z. B. der Reisegeschwindigkeit oder anderer Kenngrößen einer Fahrt läßt sich nicht zur Beurteilung der Verkehrsqualität in der Fläche heranziehen. Es ist nahezu unmöglich, auch nur die Veränderungen der Verkehrsqualität auf einer einzigen Quelle-Ziel-Relation im Verlauf eines Tages empirisch zu dokumentieren, weil dazu wiederholt die gleiche Relation befahren werden müßte. Etwas besser stellt sich die Situation für den ÖV dar, weil die Qualität des ÖV-Angebotes weniger von der aktuellen Nachfrage abhängt und sie sich aus den Fahrplan- und Netzplandaten haltestellenscharf und zeitlich beliebig differenziert berechnen läßt. Letztlich können sowohl für den

[18] eigene Annahmen: es wird unterstellt, daß dem Fußgängerverkehr mehr kleinräumige Verbindungen zur Verfügung stehen als dem Radverkehr.

[19] eigene Annahmen: für Fußgängergeschwindigkeit 1,2 m/s = 4 km/h s. z. B. RILSA; für Radfahrgeschwindigkeit 4,2 m/s = 15 km/h s. z. B. Richard, H.: Handbuch für Radverkehrsanlagen und Radverkehr, Darmstadt, 1981

MIV wie den ÖV nur die oben beschriebenen, zeitlich differenzierten Widerstandsmatrizen aus den jeweiligen Umlegungsprogrammen zur Charakterisierung des Verkehrsangebotes verwendet werden. Diese sind räumlich hoch aufgelöst. Da die empirischen Nachfragedaten jedoch räumlich auf keinen Fall in gleichem Maße differenziert werden können, ist die Berechnung von relationsscharfen Kenngrößen des Verkehrsangebotes nicht sinnvoll. Angebots- und Nachfragedaten sollten auf dem gleichen Niveau aggregiert werden.

Im folgenden werden verschiedene Datenquellen vorgestellt, die empirische Informationen zu den realisierten Tagesganglinien der Verkehrsnachfrage liefern können (für die vollständige Auswertung der Daten s. a. Anhang 3). Anschließend werden die oben bereits vorgestellten Widerstandsmatrizen zu jeweils einer einzigen Ganglinie der Verkehrsqualität zusammengefaßt. Aus diesen Ganglinien lassen sich schließlich entsprechend Kapitel 3.4 die tageszeitlichen Wunschlinien der Verkehrsnachfrage berechnen.

Kontiv '89

In der KONTIV '89 läßt sich die Tabelle 29 nach Fahrtzeitpunkten für verschiedene Aktivitäten auswerten. Leider sind die Zeitintervalle nicht stundenscharf. Da die Rückwege von einer Aktivität ebenfalls der entsprechenden Aktivität zugeordnet wurden, sieht die zeitliche Verteilung deutlich anders aus als etwa bei den Auswertungen der Haushaltsbefragung unten.

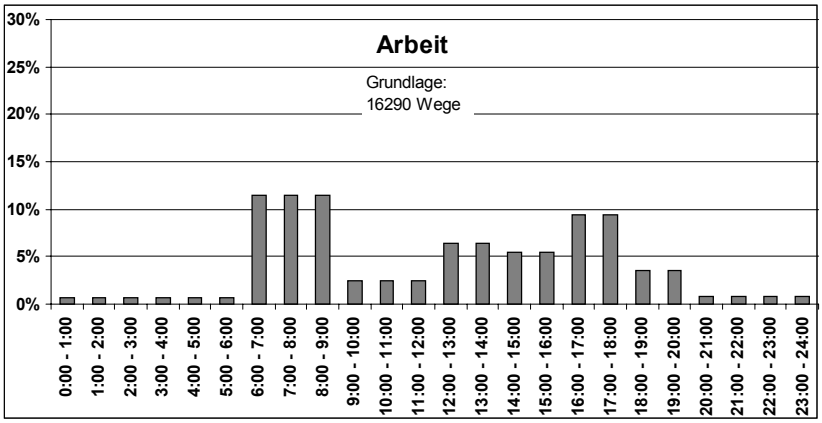


Abbildung 4-2: Verteilung der Fahrtzeitpunkte für die Aktivität Arbeit (nach KONTIV '89 Tabelle 29)

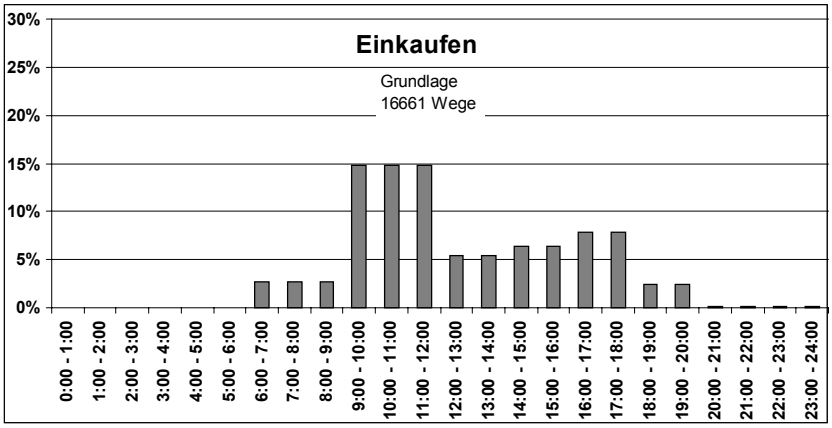


Abbildung 4-3: Verteilung der Fahrtzeitpunkte für die Aktivität Einkaufen (nach KONTIV '89 Tabelle 29)

Die Einteilung in 3- bzw. 2-Stunden-Intervalle ist zu grob, um die Morgen- bzw. Abendspitze gut wiederzugeben. Die Nachfragedaten können nicht nach Hin- und Rückweg unterschieden werden. Die Datenbasis ist ungeeignet, den zeitlichen Verlauf der Nachfrage auf Basis von Stunden-Intervallen und differenziert für einzelne Wege innerhalb eines Ausgangs wiederzugeben.

Ergebnisse des Regionalverkehrsplan

Vom bearbeitenden Konsortium des Regionalverkehrsplanes wurden umfangreiche Unterlagen der Analyseergebnisse 1995 angefertigt. Außer den Informationen zur räumlichen Nachfrage (s. u.) enthalten diese z. B. detaillierte zeitliche Aufschlüsselungen der einzelnen Aktivitätenübergänge die im Untersuchungsraum durchgeführt wurden (s. Anhang 3). Exemplarisch seien hier die zeitlichen Verteilungen für die sechs Aktivitätenübergänge 'zur Arbeit' graphisch dargestellt.

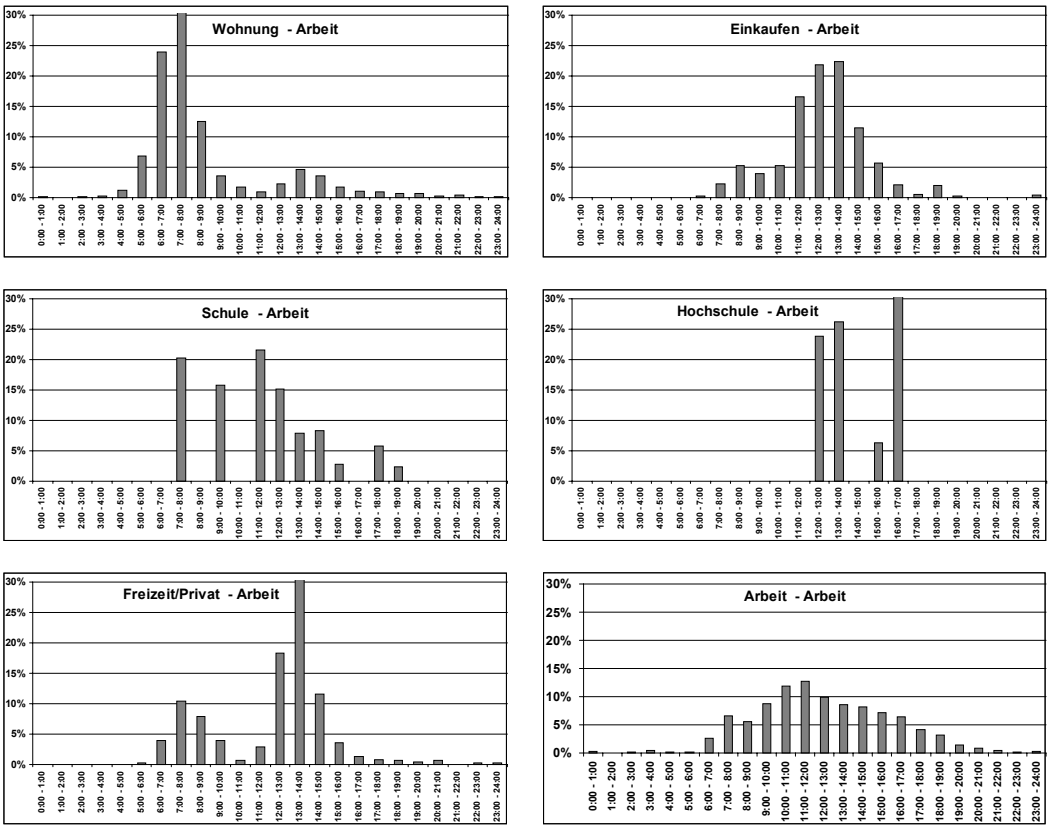


Abbildung 4-4: Zeitliche Verteilung der Aktivitätenübergänge zur Arbeit (nach VRS, 1996 b)

Diese Datenbasis stellt die differenziertesten Aussagen für den zeitlichen Verlauf der Nachfrage zur Verfügung. Da jedoch zur Beschränkung der Rechenzeit im simultanen Wahlmodell jeweils nur die Zielaktivität der Aktivitätenübergänge berücksichtigt werden kann (d. h. 5 Fahrtzwecke statt 30 Aktivitätenübergänge) wird die Anwendung dieser Ganglinien zurückgestellt, bis mit höherer Rechenleistung mehr Aktivitätenübergänge (evtl. mit Hilfe eines Parallelrechners) simultan abgearbeitet werden können.

RVP Haushaltsbefragung

Im Zuge der Vorbereitung des Regionalverkehrsplanes wurden vom auftragnehmenden Konsortium umfangreiche Verkehrserhebungen durchgeführt. Zwei Haushaltsbefragungen von Privathaushalten sowie eine Befragung von Unternehmen in der Region und Kordonzählungen an wichtigen Straßenquerschnitten sollten Aufschluß über das Aufkommen im Personen- und Güterverkehr erbringen. Die erste Haushaltsbefragung bestand aus einem umfangreichen Mobilitätsprotokoll für jeweils einen Stichtag (Montag – Freitag). Sie wurde im November '95 an ca. 6000 Personen in der Region verschickt. Der Rücklauf betrug ca. 45%. Die Daten wurden kodiert, auf Plausibilität geprüft und für die Modellierung des Verkehrs in der Region Stuttgart aufbereitet. Für die Belange des vorgestellten Modellierungsansatzes wurde der Datensatz in verschiedener Hinsicht ausgewertet. Die Kenngrößen, die im weiteren vorgestellt werden, erscheinen im großen und ganzen plausibel. Anzumerken ist jedoch, daß der Datensatz für differenzierte Aussagen zum Verkehrsverhalten von Privatpersonen, wie sie hier benötigt werden, zu klein war. Es lassen sich jedoch die prinzipiellen Schritte zur Extraktion der erforderlichen Ergebnisse für ein ausgewähltes Subset gut darstellen.

Anzahl	Aktivität 0	Aktivität 1	Aktivität 2	Aktivität 3	Aktivität 4
744	W	A	W		
629	W	E	W		
503	W	F	W		
251	W	B	W		
141	W	W			
140	W	S	W		
65	W	A	E	W	
59	W	E	E	W	
47	W	W	W		
39	W	F	F	W	
35	W	D	W		
34	W	A	F	W	
29	W	F	E	W	
24	W	A	E	A	W
20	W	E	E	E	W
17	W	E	F	W	
14	W	S	E	W	
13	W	B	E	W	
12	W	A	D	D	W
11	W	E	A	W	
10	W	A	A	W	

Tabelle 4-3: Auftreten von Wegeketten im Datensatz RVP-Haushaltsbefragung '95. Ketten mit weniger als 10-maligem Auftreten sind nicht aufgeführt.

mit:	A	Arbeit	F	Freizeit
	B	Ausbildung, Schule	H	Hochschule
	D	Dienstlich	S	privater Service, Hol- und Bringdienste
	E	Einkaufen	W	Wohnung

Nach der Eliminierung von 375 fehlerhaften Datensätzen stehen 7308 Datensätze zur weiteren Auswertung zur Verfügung. Jeder Datensatz beschreibt einen Weg einer Person innerhalb einer Wegekette. Diese Wege lassen sich in 3019 Wegeketten und 165 einzelne Wege (Fragmente unvollständiger Wegeketten) zusammenfassen. Die Wegeketten folgen ca. 190 unterschiedlichen Mustern. Am häufigsten tritt die Wegekette Wohnung (W) – Arbeit (A) – Wohnung (W) auf, gefolgt von Wohnung (W) – Einkauf (E) – Wohnung (W), Wohnung (W) – Freizeit (F) – Wohnung (W) und Wohnung (W) – Ausbildung (B) – Wohnung (W). Die Aktivität Wohnung wird bei allen Wegeketten als Startpunkt unterstellt, obwohl sie nicht explizit kodiert ist. Dies führt bei Ketten-Fragmenten (s. vor allem die 141 abgetrennten Heimfahrten) zu unsinnigen Aussagen. Die längsten registrierten Ketten haben 8 Wege, solche Ketten treten jedoch nur sehr selten auf.

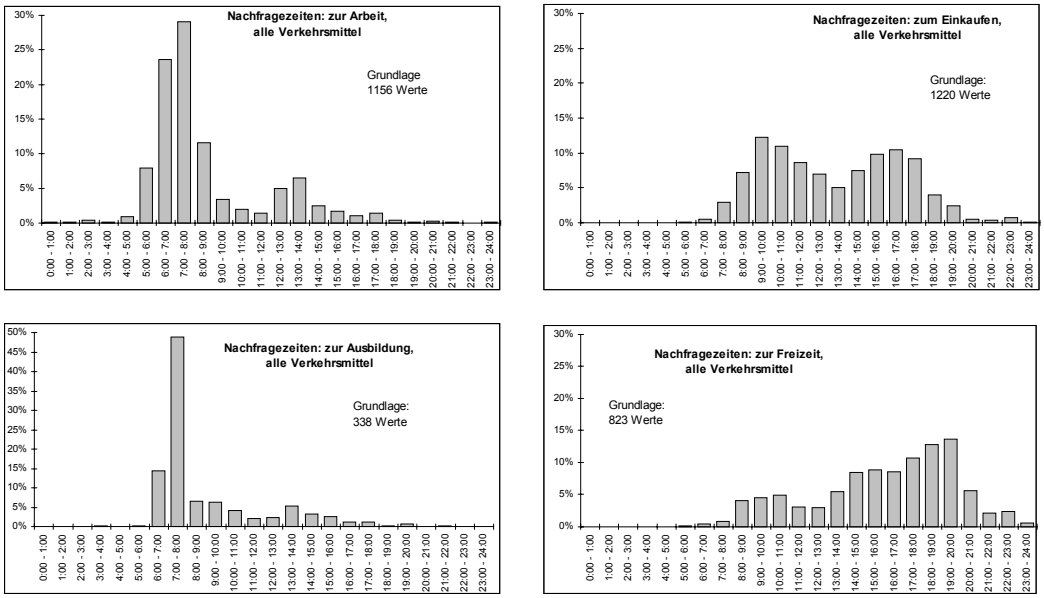


Abbildung 4-5: Startzeitpunkte für die Aktivitätenübergänge Arbeit, Einkaufen, Ausbildung und Freizeit in der Region Stuttgart (verschiedene Maßstäbe!). (nach RVP-Haushaltsbefragung '95)

Für diese Untersuchung sind Auswertungen hinsichtlich des Fahrtzeitpunktes von einzelnen Aktivitätenübergängen von besonderer Bedeutung. Für jeden Aktivitätenübergang (Weg) enthält der Datensatz sowohl Beginn als auch Ende des Weges. In einem ersten Schritt werden die Startzeitpunkte der Aktivitätenübergänge differenziert nach Fahrtzwecken, aber losgelöst aus dem Kontext der Kette untersucht.

Erwartungsgemäß konzentrieren sich die Nachfragezeiten für die Aktivitätenübergänge zur Arbeit und zur Ausbildung auf die morgendliche Hauptverkehrszeit, während die Nachfragezeiten für die Aktivitätenübergänge zur Einkaufen und zu Freizeitaktivitäten sich über größere Bereiche des Tages erstrecken. Heimfahrten sind in dieser Untersuchung nicht berücksichtigt.

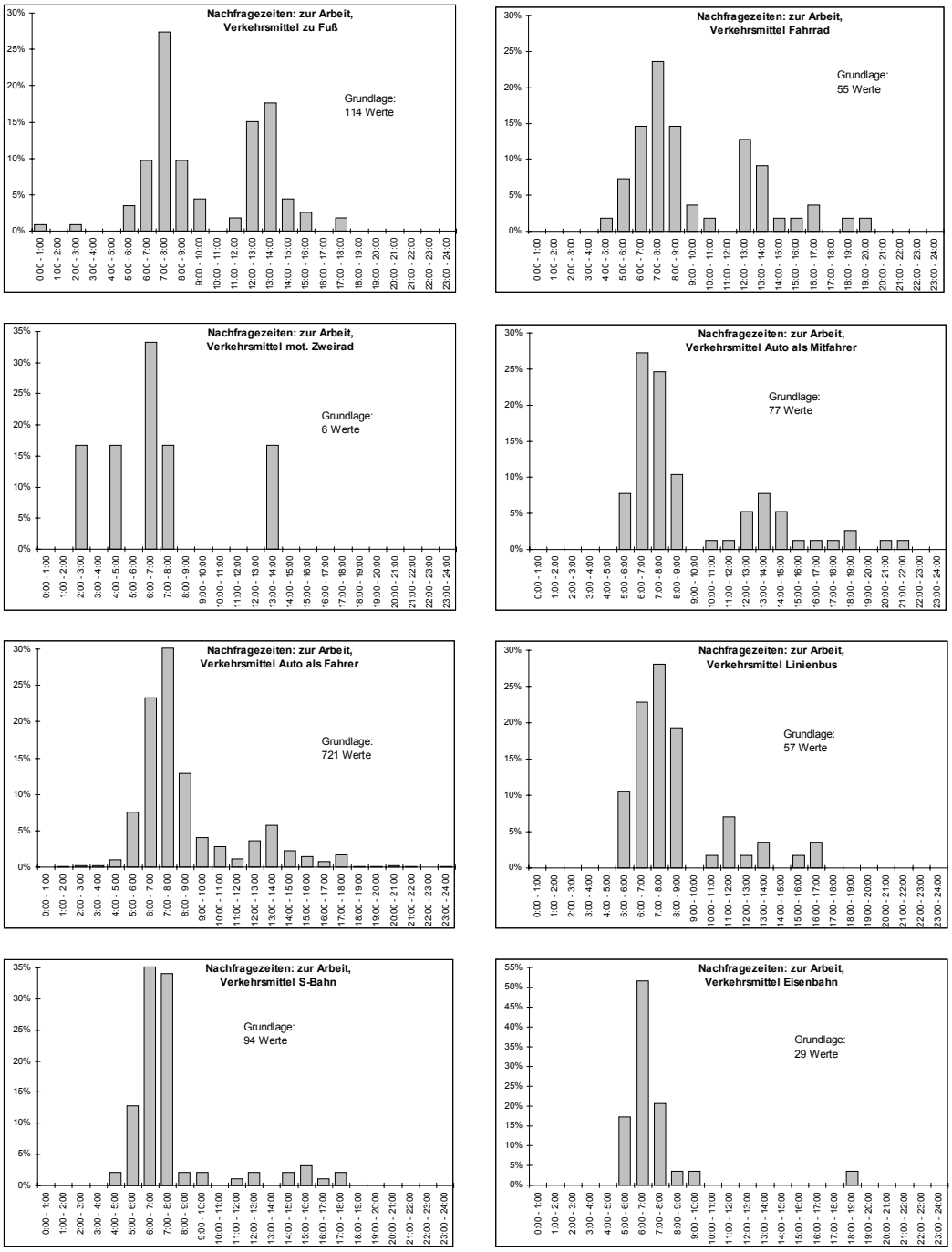


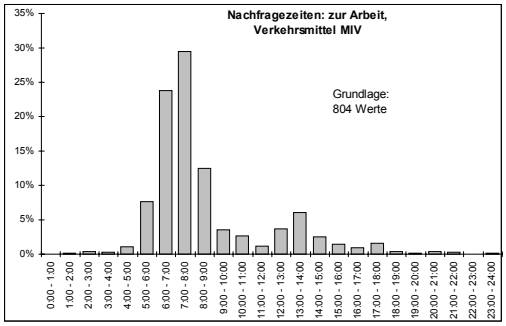
Abbildung 4-6: Startzeitpunkte für den Aktivitätenübergang Arbeit in der Region Stuttgart differenziert nach verwendeten Hauptverkehrsmitteln (unterschiedliche Maßstäbe!). (nach RVP-Haushaltsbefragung '95)

Im nächsten Schritt wird untersucht, ob die Startzeitpunkte bei der Verwendung unterschiedlicher Verkehrsmittel voneinander abweichen. Exemplarisch wird diese Auswertung für den Aktivitätenübergang zur Arbeit dargestellt. Die Auswertung wird für das jeweils genannte Hauptverkehrsmittel durchgeführt, bei gebrochenen Verkehren (z. B. Bike & Ride) bleibt das Vor- bzw. Nachtransportmittel unberücksichtigt.

Es fällt auf, daß die oben dargestellte Nachfragekurve für alle Verkehrsmittel (s. Abbildung 4-5) sehr stark durch das Verkehrsmittel Pkw als Fahrer geprägt wird. Es repräsentiert über 60% der Nennungen. Die nichtmotorisierten Verkehrsmittel (Fahrrad, zu Fuß) zeigen relativ

hohe Spitzen am frühen Nachmittag. Dies könnte zum einen damit zusammenhängen, daß Personen, die nur einen kurzen Weg zu ihrem Arbeitsplatz zurücklegen müssen, der sich zu Fuß oder mit dem Fahrrad bewältigen läßt, häufiger zum Mittagessen nach Hause zurückkehren. Andererseits dürften die nichtmotorisierten Verkehrsmittel bei Personen, die Halbtagstätigkeiten nachgehen, häufiger vertreten sein; sei es, daß sie sich keinen Pkw leisten können, bzw. dieser vom Hauptverdiener einer Familie benutzt wird. Die Fallzahlen für die einzelnen Verkehrsmittel ÖV sind leider so niedrig, daß gesicherten Aussagen über die zeitliche Verteilung der Arbeitsfahrten mit dem ÖV auf dieser Aggregationsstufe nicht getroffen werden können.

Faßt man die Verkehrsmittel Pkw als Fahrer, Pkw als Mitfahrer und motorisiertes Zweirad zur Verkehrsmittelgruppe MIV, sowie die Verkehrsmittel Linienbus, S-Bahn und Eisenbahn zur Verkehrsmittelgruppe ÖV zusammen, ergeben sich etwas klarere Bilder.



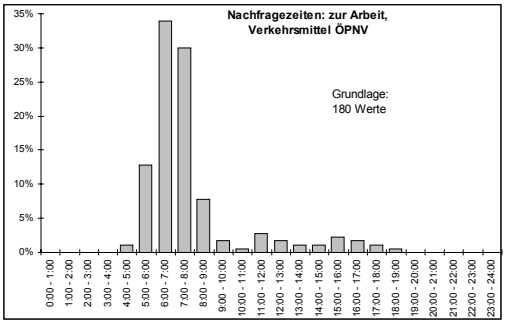


Abbildung 4-7: Startzeitpunkte für den Aktivitätenübergang Arbeit in der Region Stuttgart differenziert für aggregierte Hauptverkehrsmittelgruppen MIV und ÖV. (nach RVP-Haushaltsbefragung '95)

Um einen X^2-Text durchführen zu können, müssen die Klassen mit geringen Fallzahlen zusammengefaßt werden. Dann läßt sich die Null-Hypothese, daß die nach Verkehrsmittelgruppen (MIV, ÖV, NMIV) differenzierten Stichproben gleiche Verteilungsparameter aufweisen, auf jedem Signifikanzniveau ablehnen. Lediglich die zeitlichen Verteilung der Abfahrtszeiten für die Verkehrsmittelgruppe MIV scheint mit der Verteilung für alle Verkehrsmittel (s. Abbildung 4-5) übereinzustimmen; dies ist insofern nicht überraschend, als diese Unterstichprobe fast 70% der Gesamtstichprobe ausmacht.

Folgende Beobachtungen treffen zu:

- Die Spitze in der ÖV-Nachfrage ist stärker ausgeprägt.
- Die Spitze in der ÖV-Nachfrage zeigt sich ein Intervall (eine Stunde) früher als im MIV.
- Die MIV-Nachfrage hat eine deutlichere Sekundärspitze am frühen Nachmittag.

Mögliche Erklärungsmuster: ÖV-Fahrten dauern durchschnittlich länger, die Personen müssen ihre Fahrten daher früher antreten, um zur gleichen Zeit am Ziel zu sein. ÖV-Nutzer haben seltener flexible Arbeitszeiten und müssen früher am Arbeitsplatz eintreffen. Personen, die mit dem ÖV zur Arbeit kommen, fahren nur selten zum Mittagessen nach Hause.

Die betrachteten Fahrten stehen in der Realität nicht isoliert im Raum, sondern sind in einen Wegekettenkontext eingebettet. Für die häufigsten Ketten im untersuchten Datensatz lassen sich die zeitlichen Verteilungen auch auswerten.

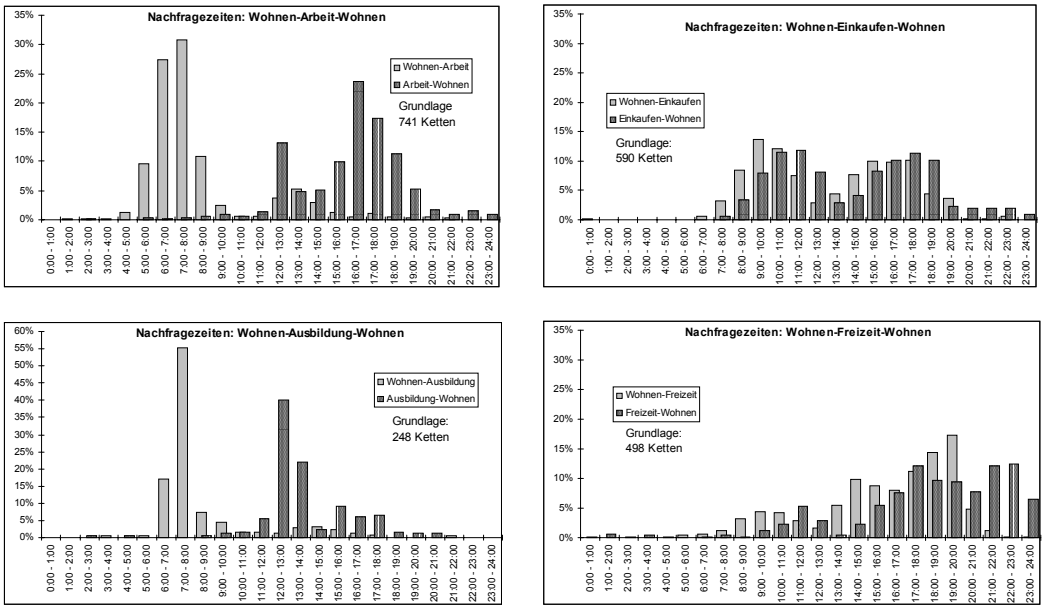


Abbildung 4-8: Startzeitpunkte für die Aktivitätenübergänge der Elementarketten: Wohnung – Arbeit - Wohnung, Wohnung – Einkaufen - Wohnung, Wohnung – Ausbildung - Wohnung und Wohnung – Freizeit - Wohnung in der Region Stuttgart (unterschiedliche Maßstäbe!). (nach RVP-Haushaltsbefragung '95)

Es zeigt sich, daß die zeitliche Nachfrage eines isoliert betrachteten Aktivitätenübergangs (z. B. zur Arbeit) (s. Abbildung 4-5) maßgeblich durch die zeitliche Nachfrage in der zugehörigen Elementarkette (z. B. W – A – W) geprägt wird. Diese haben anschaulich den größten Anteil an den isolierten Aktivitätenübergängen. Zum Vergleich werden im folgenden die Nachfragezeitverteilungen der häufigsten Ketten mit 3 Wegen dargestellt.

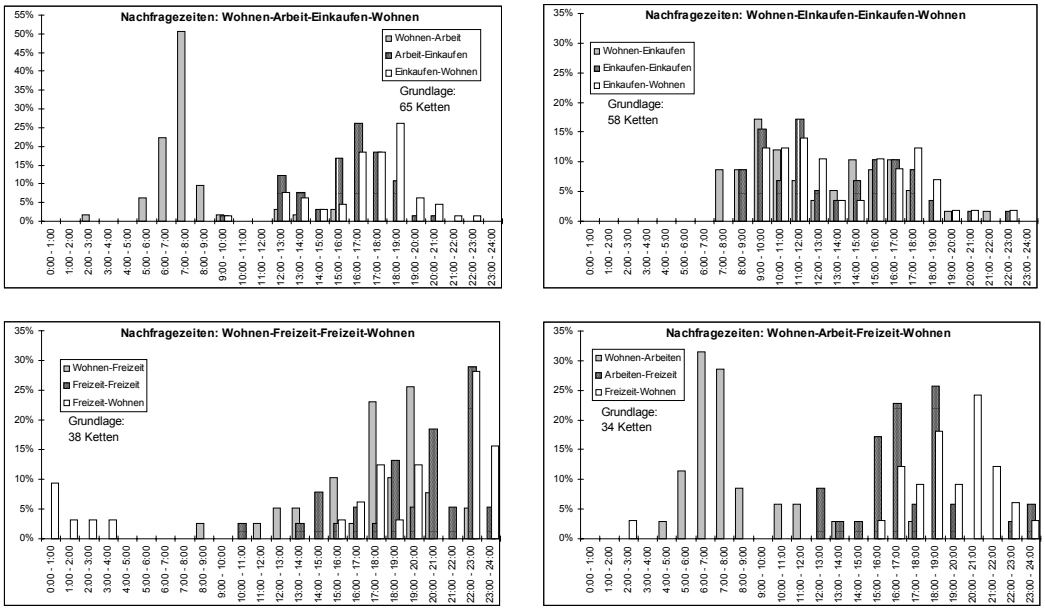
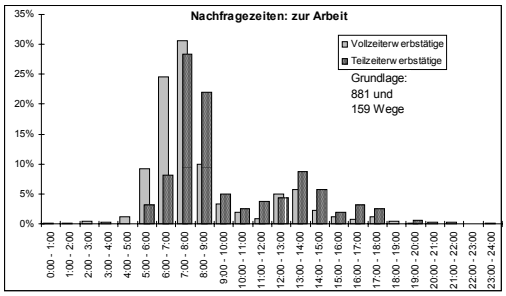


Abbildung 4-9: Startzeitpunkte für die Aktivitätenübergänge der Wegeketten Wohnung – Arbeit – Einkaufen - Wohnung, Wohnung – Einkaufen - Einkaufen - Wohnung, Wohnung – Freizeit - Freizeit - Wohnung und Wohnung – Arbeit – Freizeit - Wohnung in der Region Stuttgart (unterschiedliche Maßstäbe!). (nach RVP-Haushaltsbefragung '95)

Die zweite Nachfragespitze (am frühen Nachmittag) des Aktivitätenübergangs zur Arbeit ist in den beiden gezeigten längeren Ketten kaum mehr zu erkennen. Stattdessen ist bei der Kette W – A – E – W die Morgenspitze deutlich stärker ausgeprägt als für den isolierten Aktivitätenübergang zur Arbeit, während die Morgenspitze bei der Kette W – A – F – W eher durchschnittlich ausfällt. Deutlicher noch sind die Unterschiede für die zeitliche Verteilung des Übergangs zum Einkaufen in der Kette W – A – E – W gegenüber der Elementarkette W – E – W: Aus naheliegenden Gründen setzt die Verteilung erst mittags ein. In der Kette W – E – E – W fällt die Verteilung für die beiden Ganglinien der Aktivitätenübergänge zum Einkaufen recht ähnlich zur isolierten Darstellung des Aktivitätenübergangs und zur Elementarkette W – E – W aus. In diesen drei Fällen ist jeweils deutlich eine sanfte Vormittags- und Nachmittagsspitze zu erkennen.

Doch nicht nur die Einbettung des betrachteten Aktivitätenübergangs in Wegeketten sondern auch soziodemografische Merkmale der Person führen zu signifikanten Unterschieden in der Verteilung der Nachfragezeiten.



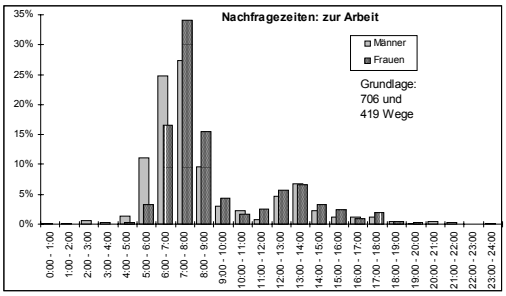


Abbildung 4-10: Startzeitpunkte für den Aktivitätenübergang ‚zur Arbeit' differenziert nach Vollzeiterwerbstätigen/Teilzeiterwerbstätigen und Männer/Frauen. (nach RVP-Haushaltsbefragung '95)

Teilzeiterwerbstätige verlassen ihre Wohnung morgens deutlich später als Vollzeiterwerbstätiger. Überraschender ist jedoch die Beobachtung, daß die Nachmittagsspitze bei Teilzeiterwerbstätigen nur unwesentlich höher ausfällt als bei den Vollzeiterwerbstätigen. Offensichtlich werden die meisten Teilzeittätigkeiten vormittags ausgeübt. Beim Vergleich zwischen Männern und Frauen fällt die schärfere Spitze der Frauen in der Morgenspitze auf. Tendenziell beginnen Frauen ihren Ortswechsel später als Männer, sei es, daß sie kürzere Wege zurücklegen müssen, sei es, daß sie einen späteren Arbeitszeitbeginn wählen.

Die beiden Merkmale Geschlecht und Berufstätigkeit sind natürlich nicht unabhängig sondern korreliert; von den Männern sind 98% vollzeiterwerbstätig, während über 90% der Teilzeiterwerbstätigen Frauen sind.

Die vorgestellten Ergebnisse zum Zeitwahlverhalten beim Aktivitätenübergang zur Arbeit erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die Stichprobe läßt sich nach vielen Merkmalen differenzieren, Abhängigkeiten und Interdependenzen können herausgearbeit werden. Je differenzierter man die Daten untersucht, desto kleiner und von Zufällen geprägter werden die Datensets. Bei Untersuchungen, in denen nur der Mittelwert und die Streuung einer Verteilung von Interesse sind, können mit statistischen Mitteln die erforderlichen minimalen Stichproben berechnet werden, die noch ein tragfähiges Ergebnis zu liefern imstande sind. Bei den hier vorliegenden ordinal klassifizierten Daten kann ein X^2-Text Aussagen zur Übereinstimmung mit Vergleichsverteilungen liefern. Da er jedoch Mindestbesetzungen der einzelnen Klassen

erfordert, werden die Aussagen mit zunehmender Aggregation von Zeitintervallen immer unschärfer.

Der Aktivitätenübergang zur Arbeit tritt im Datensatz am häufigsten auf, deshalb wurde er hier exemplarisch zur Analyse herangezogen. Für die Entwicklung eines in der Praxis anwendbaren Modells ist es erforderlich, daß alle Verhaltensmuster in der gleichen Tiefe analysiert und aufbereitet werden. Die Untersuchung der Fahrtantrittszeitpunkte differenziert nach Verkehrsmitteln ist unkritisch. Aber schon die Zuordnung zu den wichtigsten Aktivitätenketten, wie sie für den Regionalverkehrsplan aufgestellt wurden (s. Anhang 2) liefert für die längeren Ketten keine tragfähigen Ergebnisse mehr. Die Differenzierung der Verteilung der Fahrtzeitpunkte nach einzelnen Merkmalen mit wenigen Ausprägungen (männlich/weiblich, Erwerbstätigkeit, etc.) wäre möglich. Für den gewählten Modellierungsansatz würde sich entsprechender Mehraufwand ergeben, da die simultane Verteilungsrechnung für jede Untergruppe mit abweichender Verteilung der Startzeitpunkte separat durchgeführt werden müßte. Aus den genannten Gründen wird die Differenzierung bei der Ermittlung der beobachteten zeitlichen Verteilung der Fahrtantrittszeitpunkte auf die Zielaktivität des jeweiligen Aktivitätenübergangs beschränkt. Die folgenden Tagesganglinien der Nachfrage wurden aus dem empirischen Datenmaterial der RVP-Haushaltsbefragung aufgestellt:

Intervall	Arbeit	Ausbildung	Freizeit	Einkaufen	Service	Dienstlich
0:00 - 1:00	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
1:00 - 2:00	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2:00 - 3:00	0,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
3:00 - 4:00	0,2%	0,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
4:00 - 5:00	1,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
5:00 - 6:00	8,0%	0,3%	0,1%	0,2%	0,3%	0,4%
6:00 - 7:00	23,6%	14,5%	0,4%	0,6%	0,3%	3,1%
7:00 - 8:00	29,1%	48,8%	0,9%	3,0%	6,4%	9,3%
8:00 - 9:00	11,6%	6,5%	4,1%	7,3%	15,1%	8,8%
9:00 - 10:00	3,4%	6,2%	4,5%	12,3%	7,4%	11,5%
10:00 - 11:00	2,0%	4,1%	4,9%	11,0%	3,3%	10,6%
11:00 - 12:00	1,4%	2,1%	3,0%	8,7%	12,7%	10,2%
12:00 - 13:00	5,0%	2,4%	2,9%	7,0%	7,7%	7,5%
13:00 - 14:00	6,6%	5,3%	5,5%	5,0%	5,4%	6,2%
14:00 - 15:00	2,4%	3,3%	8,5%	7,5%	4,0%	6,2%
15:00 - 16:00	1,7%	2,7%	8,9%	9,8%	9,7%	7,1%
16:00 - 17:00	1,0%	1,2%	8,6%	10,4%	9,4%	7,1%
17:00 - 18:00	1,5%	1,2%	10,7%	9,2%	6,0%	4,4%
18:00 - 19:00	0,4%	0,3%	12,8%	4,0%	5,4%	3,1%
19:00 - 20:00	0,2%	0,6%	13,6%	2,5%	3,0%	4,0%
20:00 - 21:00	0,3%	0,0%	5,6%	0,5%	1,0%	0,4%
21:00 - 22:00	0,2%	0,3%	2,1%	0,3%	1,3%	0,0%
22:00 - 23:00	0,0%	0,0%	2,4%	0,7%	0,7%	0,0%
23:00 - 24:00	0,1%	0,0%	0,6%	0,1%	1,0%	0,0%
	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Tabelle 4-4: Empirische tageszeitliche Ganglinien der fahrtzweckspezifischen Verkehrsnachfrage in der Region Stuttgart.

Einige Anmerkungen dazu:

- Diese Ganglinien wurden für alle benutzen Verkehrsmittel aggregiert aufgestellt, obwohl oben am Beispiel des Fahrtzweckes Arbeit nachgewiesen wurde, daß die Nachfrageganglinien für unterschiedliche Verkehrsmittel signifikant unterschiedlich verlaufen. Der Unterschied im zeitlichen Verlauf läßt sich nicht alleine mit der dem tageszeitlich unterschiedlichen Verlauf der Verkehrsqualität der verschiedenen Verkehrsmittel begründen. Diese Scheinkorrelationen beruhen auf unterliegenden Zusammenhängen der soziodemographischen Merkmale der Verkehrsteilnehmer und ihrer Verkehrsmittelwahl. Das beobachtete unterschiedliche Verhalten ist vermutlich stärker von diesen, hier exogen genannten Einflußgrößen, abhängig, als von der Verkehrsqualität. Insofern wäre es konsequent für jedes betrachtete Verkehrsmittel oder Verkehrssystem eine eigene fahrtzweckspezifische Ganglinie für die typischen Benutzer dieses Verkehrsmittels aufzustellen. Der untersuchte Befragungsdatensatz enthält jedoch für einige Fahrtzweck-/Verkehrsmittelkombinationen so wenige Einträge, daß die resultierenden Ganglinien hochgradig unplausibel erscheinen. Deshalb wird zur Demonstration des Prinzips hier nur eine einheitliche Nachfrageganglinie für alle Verkehrsmittel verwendet. Diese zusätzliche Differenzierung wäre jedoch eine lohnende Erweiterung des Modellierungsansatzes, wenn umfangreichere empirische Daten zur Verfügung stehen.
- Die Kodierung der Fahrtzwecke unterscheidet sich in der Haushaltsbefragung von den veröffentlichten Aktivitätenmuster, die dem Erzeugungsmodell (s. Kapitel 4.3) zugrunde liegen. Diese Diskrepanz konnte nicht ausgeräumt werden. Die Zuordnung der Fahrtzwecke Arbeit, Ausbildung, Einkaufen und Freizeit ist trivial, für den in der Erzeugung separat ausgewiesenen Fahrtzweck Hochschule wird die Ganglinie der Ausbildung übernommen. Die Ganglinien für die Fahrtzwecke Service und dienstliche Erledigung liegen vor, werden jedoch vorerst nicht verwendet.
- Die verwendeten Zeitintervalle erfassen jeweils den Startzeitpunkt der Ortsveränderungen. Die Verkehrsleistung bzw. -belastung kann in der Realität durchaus überwiegend im nächsten oder sogar übernächsten Zeitintervall entstehen. Im unten beschriebenen MIV-Umlegungsprogramm wird die Fahrleistung aber nur dem Startzeitintervall zugeordnet. Dies führt dazu, daß Belastungsspitzen der Nachfrageganglinie im Modell höhere Spitzenbelastungen auf den Strecken verursachen als in der Realität. Idealerweise sollte hier ein dynamisches MIV-Umlegungsmodell zum Einsatz kommen (Serwill, 1994).

Das beschriebene Verfahren zum Aufstellen der empirischen Nachfrageganglinien enthält – durch die Beschränkungen der zur Verfügung stehenden Datenbasis begründet – eine Vielzahl von Annahmen und Vereinfachungen. Andererseits sollen die gewonnenen Ganglinien überwiegend dazu dienen, die Verwendbarkeit des beschriebenen Ansatzes der simultanen Ziel-, Zeit- und Verkehrsmittelwahl nachzuweisen.

Verkehrsqualität

Der Modellierungsansatz gründet auf der Überlegung, daß das empirisch beobachtbare Verkehrsverhalten bereits vom Verkehrsangebot und der Verkehrsqualität (wie in der Widerstandsmatrix beschrieben) beeinflußt ist und sich deshalb von der eigentlichen Wunschlinie der Nachfrage unterscheidet. Um die Effekte der Verkehrsqualität aus der beobachteten Ganglinie herauszurechnen ist es notwendig den tageszeitlichen Verlauf von Verkehrsangebot und –qualität zu erfassen. Dazu einige Überlegungen:

- Genau wie die empirischen Nachfrageganglinien unterscheiden sich auch die Ganglinien des Verkehrsangebotes und der Verkehrsqualität für unterschiedliche Verkehrsmittel/Verkehrssysteme. Da jedoch aus den oben dargestellten Gründen nur eine einzige Nachfrageganglinie je Fahrtzweck abgeleitet wurde, muß auch die Verkehrsqualität für alle Verkehrsmittel aggregiert ermittelt werden.
- Es ist unmöglich aus der beschränkten Anzahl vorhandener empirischer Daten eine flächendeckend gültige Beschreibung des zeitlichen Verlaufs der Qualität des Verkehrsangebotes abzuleiten. Aus den Daten der RVP-Haushaltsbefragung konnten mit Hilfe der berichteten Fahrzeiten und Reiseweiten Durchschnittsgeschwindigkeiten berechnet werden. Um diese zur Charakterisierung der Verkehrsqualität heranzuziehen, wäre es notwendig, daß die Zusammensetzung der erfaßten Fahrten nach Länge und räumlicher Verteilung in allen Zeitintervallen vergleichbar ist. Das war nicht gewährleistet; vielmehr wäre in manchen Zeitintervallen (besonders nachts) die Verkehrsqualität durch sehr wenige oder sogar nur eine einzige erfaßte Fahrt charakterisiert worden. Die Befragungsdaten eignen sich deshalb nicht zur Charakterisierung der Verkehrsqualität in der Region, weder aggregiert noch differenziert nach den Verkehrssystemen.
- Nur mit extrem hohem Aufwand erscheint es möglich, den zeitlichen Verlauf der Qualität des Verkehrsangebotes flächendeckend empirisch zu erfassen. Vorstellbar wäre dazu die wiederholte Befahrung der gleichen Quelle-Ziel-Relation zur Messung der jeweils erforderlichen Fahrzeit. Selbst wenn dies gelingen würde, wäre die Datenreihe nur für die spezielle Relation und bestenfalls eine eng begrenzte räumliche Umgebung gültig. Schon auf der Rückrichtung der untersuchten Relation könnten völlig andere Verhältnisse herrschen. Vor allem im MIV kann die Verkehrsqualität flächenhaft nur mit Hilfe eines Netzmodells beschrieben werden. Dabei können unter kontrollierten Bedingungen die Reisezeiten auf allen Relationen auch im belasteten Netz ausgewertet werden. Auch zur Beurteilung der Verkehrsqualität im öffentlichen Verkehr ist die vollständige Auswertung des in Fahr- und Netzplänen verfügbaren Verkehrsangebotes der geeignete Weg.

Das Verkehrsangebot für den MIV steht primär während des ganzen Tages unverändert zur Verfügung. Bis heute gibt es nur wenige betriebliche Regelungen, welche die Kapazität der Straßen tageszeitlich signifikant ändern (Fahrstreifensignalisierung, Signalprogramme, Ein- und Durchfahrverbote, zeitlich beschränkte Park- und Halteverbote). Dem aktuellen Stand der Modellierungstechnik entsprechend sind solche zeitlich veränderlichen Angebotskenngrößen weder im Netzmodell zum Regionalverkehrsplan noch im Forschungsprojekt WUMS abgebildet und können deshalb auch nicht für diese Implementierung verwendet werden. Die Qualität des MIV-Verkehrsangebotes wird jedoch maßgeblich von der augenblicklichen Nachfrage auf den Netzelementen geprägt. Diese läßt sich mit Hilfe des unten beschriebenen Umlegungsprogramms einfach berechnen und in der Widerstandsmatrix relationsscharf ausgeben. Um das Modell zu initialisieren wird zum Zweck der Vorbelastung des MIV-Netzes die Analyse-Nachfragematrix 1995 aus dem Forschungsprojekt WUMS umgelegt.

Das Verkehrsangebot im öffentlichen Verkehr ergibt sich aus dem betrieblichen Angebot, welches in Linien- und Fahrplänen beschrieben wird. Es schwankt stark im Verlaufe eines Tages. So wird z. B. nachts nahezu kein öffentlicher Verkehr angeboten und auch in den Schwachlastzeiten ist das Angebot merklich ausgedünnt, so daß manche Relationen nicht mehr bedient werden. Die subjektiv empfundene Verkehrsqualität hängt auch von der Nachfrage ab; überfüllte Verkehrsmittel werden ungünstiger wahrgenommen. Die aus dem Forschungspro-

jekt WUMS übernommene ÖV-Widerstandsmatrix enthält jedoch nur die objektiv meßbaren Qualitätskriterien wie Reisezeit, Umsteigehäufigkeit oder Entfernung.

Das Verkehrsangebot im Rad- und Fußgängerverkehr ist physisch nicht von der Tageszeit abhängig, Straßen und Wege stehen rund um die Uhr zur Verfügung. Die Qualität wird auch nicht merklich durch die Nachfrage auf einzelnen Netzelementen beeinflußt. Nachgewiesenermaßen empfinden viele Verkehrsteilnehmer Unsicherheit, wenn sie sich bei Dunkelheit zu Fuß oder mit dem Rad fortbewegen müssen; die subjektiv wahrgenommene Attraktivität der nicht motorisierten Verkehrsmittel schwankt erheblich im Tagesverlauf. Außerdem haben Niederschläge und jahreszeitliche Witterungseffekte wesentlichen Einfluß auf das Aufkommen dieser Verkehrsarten. Da sich all diese Einflüsse nicht ausreichend quantifizieren lassen, wird das Verkehrsangebot für den nicht motorisierten Verkehr im Tagesverlauf konstant betrachtet.

Um das Verkehrsangebot und die Verkehrsqualität der verschiedenen Verkehrssysteme für die weitere Berechnung zugänglich zu machen wird folgendes Vorgehen gewählt:

- Um die Region Stuttgart flächenhaft zu berücksichtigen, werden die Widerstandsmatrizen des MIV und ÖV ausgewertet.
- Als Indikator für die Verkehrsqualität wird die erzielbare Reisegeschwindigkeit auf einer Quelle-Ziel-Relation ausgewählt. Diese wird aus der Reiseentfernung und der Reisezeit gebildet und hat die Einheit [km/h].
- Im Aggregationsverfahren wird der Verkehrsqualitätsindikator auf jeder Relation mit der jeweiligen Verkehrsnachfrage gewichtet.
- Es werden nur Relationen innerhalb der Region Stuttgart berücksichtigt.
- Der Verkehrsqualitätsindikator wird in den 24 Zeitintervallen, die für die Analyse der Nachfragezeitpunkte definiert wurden, separat berechnet.
- Der Verlauf der Verkehrsqualität kann auch als prozentuale Abweichung von einem Mittelwert dargestellt werden.

Im Ergebnis erhält man für jedes untersuchte Verkehrssystem eine einzige, nachfragegewichtete Ganglinie der Verkehrsqualität in der Region Stuttgart. Dieses Verfahren kann sinnvoll für den MIV und den ÖV durchgeführt werden, die Verkehrsqualität im NMIV wird entsprechend den Ausführungen oben als konstant definiert. Tabelle 4-5 zeigt die resultierenden Ganglinien der Verkehrsqualität für MIV, ÖV und NMIV.

Zeitintervall	MIV	ÖV	NMIV
0:00 - 1:00	102 % (33,3 km/h)	0 %	100 %
1:00 - 2:00	104 % (33,9 km/h)	0 %	100 %
2:00 - 3:00	107 % (34,9 km/h)	0 %	100 %
3:00 - 4:00	111 % (36,3 km/h)	0 %	100 %
4:00 - 5:00	111 % (36,2 km/h)	0 %	100 %
5:00 - 6:00	110 % (35,8 km/h)	108 % (21,0 km/h)	100 %
6:00 - 7:00	88 % (28,9 km/h)	110 % (21,4 km/h)	100 %
7:00 - 8:00	73 % (23,9 km/h)	107 % (20,9 km/h)	100 %
8:00 - 9:00	103 % (33,6 km/h)	105 % (20,4 km/h)	100 %
9:00 - 10:00	101 % (33,1 km/h)	96 % (18,7 km/h)	100 %
10:00 - 11:00	95 % (31,0 km/h)	90 % (17,4 km/h)	100 %
11:00 - 12:00	93 % (30,4 km/h)	89 % (17,3 km/h)	100 %
12:00 - 13:00	100 % (32,7 km/h)	99 % (19,2 km/h)	100 %
13:00 - 14:00	102 % (33,4 km/h)	100 % (19,4 km/h)	100 %
14:00 - 15:00	103 % (33,7 km/h)	101 % (19,7 km/h)	100 %
15:00 - 16:00	100 % (32,6 km/h)	102 % (19,9 km/h)	100 %
16:00 - 17:00	93 % (30,3 km/h)	104 % (20,2 km/h)	100 %
17:00 - 18:00	96 % (31,5 km/h)	100 % (19,4 km/h)	100 %
18:00 - 19:00	98 % (31,9 km/h)	99 % (19,3 km/h)	100 %
19:00 - 20:00	102 % (33,3 km/h)	101 % (19,6 km/h)	100 %
20:00 - 21:00	102 % (33,4 km/h)	100 % (19,4 km/h)	100 %
21:00 - 22:00	102 % (33,4 km/h)	98 % (19,0 km/h)	100 %
22:00 - 23:00	102 % (33,3 km/h)	99 % (19,3 km/h)	100 %
23:00 - 24:00	102 % (33,2 km/h)	96 % (18,7 km/h)	100 %

Tabelle 4-5: Verkehrsmittelspezifische Ganglinien der aggregierten Verkehrsqualität in der Region Stuttgart

Die verschiedenen Verkehrssysteme spielen fahrtzweckabhängig unterschiedlich große Rollen. Die beobachtete zeitliche Nachfrage im Schülerverkehr ist – unabhängig von den i. A. härteren Randbedingungen des Unterrichtsbeginns – nach dem vorgestellten Modellierungsansatz weit weniger von der Qualität des MIV geprägt als z. B. der Berufsverkehr, da ein geringerer Teil der Nachfrage im Schülerverkehr mit dem MIV befriedigt wird. Um die drei Ganglinien der Verkehrsqualität zu aggregieren bedarf es entsprechender Nachfragegewichte. Die Nachfrageverteilung nach KONTIV '89 kann dafür geeignete Werte liefern.

Intervall	Arbeit	Ausbildung	Freizeit	Einkaufen	Service	Dienstlich
MIV	70,0 %	22,7 %	48,2 %	42,7 %	69,5 %	72,0 %
ÖV	11,8 %	33,4 %	7,1 %	8,6 %	2,0 %	8,6 %
NMIV	18,2 %	43,9 %	44,7 %	48,7 %	28,5 %	19,4 %

Tabelle 4-6: Aggregationsgewichte zur Berechnung der fahrtzweckspezifischen Ganglinien der Verkehrsqualität (nach KONTIV '89, Tabelle 35).

Wenn die oben dargestellten verkehrsmittelspezifischen Ganglinien mit diesen Gewichten ausmultipliziert und dann addiert werden, erhält man fahrtzweckspezifisch leicht variierende Ganglinien der Verkehrsqualität. In Tabelle 4-7 und Abbildung 4-11 ist gut zu erkennen, daß

die fahrtzweckspezifisch unterschiedlich wahrgenommenen Ganglinien der Verkehrsqualität zwischen den Extremen der MIV-Ganglinie und der ÖV-Ganglinie angesiedelt sind. Alle Ganglinien sind deutlich vom Einbruch der MIV-Verkehrsqualität in der Morgenspitze geprägt. Die Varianz wird durch den unterschiedlich großen Einfluß von ÖV und NMIV erzeugt.

Intervall	Arbeit	Ausbildung	Freizeit	Einkaufen	Service	Dienstlich
0:00 - 1:00	89,5%	67,0%	93,8%	92,2%	99,3%	92,8%
1:00 - 2:00	90,8%	67,5%	94,7%	93,0%	100,6%	94,1%
2:00 - 3:00	93,0%	68,2%	96,2%	94,3%	102,8%	96,3%
3:00 - 4:00	96,0%	69,1%	98,3%	96,2%	105,8%	99,5%
4:00 - 5:00	95,8%	69,1%	98,1%	96,0%	105,6%	99,2%
5:00 - 6:00	107,6%	104,7%	105,1%	104,7%	106,8%	107,5%
6:00 - 7:00	93,0%	100,6%	95,1%	95,9%	92,1%	92,4%
7:00 - 8:00	82,0%	96,3%	87,5%	89,1%	81,4%	81,2%
8:00 - 9:00	102,4%	102,1%	101,6%	101,6%	102,0%	102,4%
9:00 - 10:00	100,5%	99,0%	100,4%	100,2%	100,8%	100,6%
10:00 - 11:00	95,2%	95,4%	96,8%	96,9%	96,2%	95,4%
11:00 - 12:00	93,8%	94,6%	95,8%	96,0%	94,9%	94,0%
12:00 - 13:00	100,0%	99,6%	100,0%	100,0%	100,1%	100,0%
13:00 - 14:00	101,5%	100,3%	101,0%	100,9%	101,5%	101,6%
14:00 - 15:00	102,4%	101,1%	101,7%	101,5%	102,3%	102,5%
15:00 - 16:00	100,1%	100,6%	100,1%	100,1%	99,9%	100,1%
16:00 - 17:00	95,3%	99,7%	96,8%	97,2%	95,0%	95,1%
17:00 - 18:00	97,4%	99,1%	98,2%	98,4%	97,5%	97,4%
18:00 - 19:00	98,3%	99,2%	98,8%	99,0%	98,4%	98,3%
19:00 - 20:00	101,4%	100,6%	100,9%	100,8%	101,3%	101,4%
20:00 - 21:00	101,6%	100,4%	101,1%	101,0%	101,6%	101,7%
21:00 - 22:00	101,3%	99,7%	100,9%	100,8%	101,5%	101,4%
22:00 - 23:00	101,3%	100,1%	100,9%	100,8%	101,4%	101,4%
23:00 - 24:00	100,6%	99,0%	100,5%	100,3%	101,0%	100,8%

Tabelle 4-7: Fahrtzweckspezifische Ganglinien der Verkehrsqualität.

In Abbildung 4-11 sind nur die verkehrsmittelspezifischen Ganglinien aus Tabelle 4-5 farbig hervorgehoben, die fahrtzweckspezifischen Ganglinien (schwarz) setzen sich anteilsmäßig aus ihnen zusammen. Die Darstellung vermittelt einen Überblick über das Spektrum, während die Werte aus Tabelle 4-7 entnommen werden können. Zwischen 0.00 Uhr und 5.00 besteht kein ÖV-Angebot, die ÖV-Verkehrsqualität wird für diesen Zeitraum mit 0,0% angesetzt.

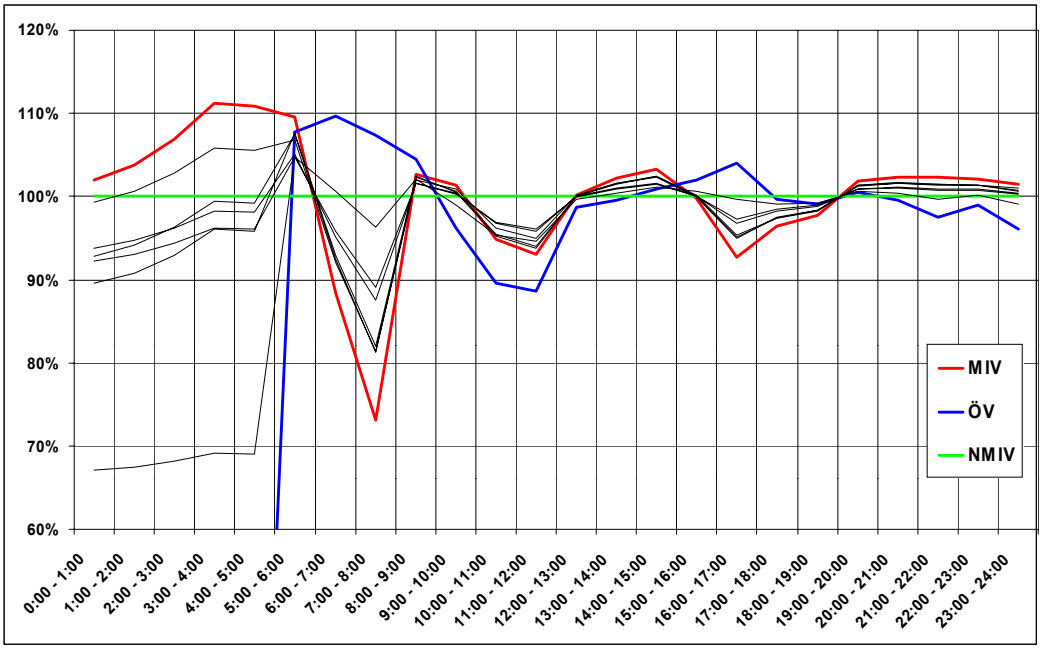


Abbildung 4-11: Verkehrsmittel- und fahrtzweckspezifische Ganglinien der Verkehrsqualität.

Zeitliche Wunschlinie der Nachfrage

Aus dem beobachteten Verlauf der Nachfrage wird der Einfluß des Verkehrsangebots und der Verkehrsqualität herausgerechnet, so daß man die zeitliche Wunschlinie der Nachfrage erhält.

$$n^w(t) = \frac{n^b(t)}{vq(t)} \qquad \text{(Formel 4-8)}$$

mit: $n^w(t)$ Wunschnachfrage im Zeitintervall t
$n^b(t)$ beobachtete Nachfrage im Zeitintervall t
$vq(t)$ Indikator der Verkehrsqualität im Zeitintervall t

Die so berechnete Ganglinie muß noch normiert werden, damit die Gesamtnachfrage des Tages wieder 100% beträgt. Als Ergebnis stehen fahrtzweckspezifische Ganglinien der bevorzugten Fahrtzeitpunkte ohne die Einflüsse des Verkehrs zur Verfügung (Tabelle 4-8).

Intervall	Arbeit	Ausbildung	Freizeit	Einkaufen	Service	Dienstlich
0:00 - 1:00	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
1:00 - 2:00	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2:00 - 3:00	0,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
3:00 - 4:00	0,2%	0,4%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
4:00 - 5:00	1,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
5:00 - 6:00	6,9%	0,3%	0,1%	0,2%	0,3%	0,4%
6:00 - 7:00	23,6%	14,1%	0,4%	0,6%	0,3%	3,2%
7:00 - 8:00	32,9%	49,6%	1,0%	3,3%	7,7%	11,1%
8:00 - 9:00	10,5%	6,2%	4,0%	7,1%	14,4%	8,3%
9:00 - 10:00	3,1%	6,1%	4,5%	12,1%	7,2%	11,1%
10:00 - 11:00	2,0%	4,2%	5,0%	11,2%	3,3%	10,7%
11:00 - 12:00	1,4%	2,2%	3,1%	8,9%	13,1%	10,5%
12:00 - 13:00	4,6%	2,4%	2,9%	6,9%	7,5%	7,3%
13:00 - 14:00	6,0%	5,2%	5,4%	4,9%	5,2%	5,9%
14:00 - 15:00	2,2%	3,2%	8,3%	7,3%	3,8%	5,9%
15:00 - 16:00	1,6%	2,6%	8,8%	9,7%	9,5%	6,9%
16:00 - 17:00	1,0%	1,2%	8,8%	10,6%	9,7%	7,2%
17:00 - 18:00	1,4%	1,2%	10,8%	9,2%	6,0%	4,4%
18:00 - 19:00	0,4%	0,3%	12,9%	4,0%	5,4%	3,1%
19:00 - 20:00	0,2%	0,6%	13,4%	2,4%	2,9%	3,8%
20:00 - 21:00	0,3%	0,0%	5,5%	0,5%	1,0%	0,4%
21:00 - 22:00	0,2%	0,3%	2,1%	0,3%	1,2%	0,0%
22:00 - 23:00	0,0%	0,0%	2,4%	0,7%	0,7%	0,0%
23:00 - 24:00	0,1%	0,0%	0,6%	0,1%	1,0%	0,0%
	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Tabelle 4-8: Zeitliche Wunschlinien der Nachfrage.

4.4.4 Bewertungs- und Verteilungsmodell

Vorbemerkung

Neben den zeitlichen Wunschlinien der Nachfrage, die als Eingangsgröße in das Modell eine wesentliche Rolle spielen, müssen sowohl für den resultierenden Modal Split, als auch für die Fahrtweitenverteilung Rahmengrößen als Zielwerte bereitgestellt werden. Der Modal Split, d. h. die Aufteilung der Verkehrsnachfrage auf die einzelnen Verkehrssysteme, ist ein wesentliches Ergebnis des Modellierungsprozeßes und kann nicht detailliert vorgegeben werden. Auf jeder Relation, bzw. für jeden Quell- und Zielbezirk, stellt sich die Aufteilung entsprechend den unterschiedlichen Verkehrsangeboten zur Überwindung der Distanz zu den relevanten Zielen ein. Wesentliche Kalibrierungsmöglichkeit zur Steuerung des Modells sind die Funktionen zur Bewertung des jeweiligen Verkehrsangebotes. Die Bewertungswerte dienen dann in der Form von Logit- oder Probit-Ansätzen zur Bestimmung der Verkehrsmittelanteile.

In vielen Modellen wird versucht, diese Bewertungsfunktionen zu schätzen, indem auf ausgewählten Relationen wesentliche Kenngrößen des Verkehrsangebotes erhoben und mit dem resultierenden, realen Modal Split in einen funktionalen Zusammenhang gebracht werden. Die Schwierigkeit besteht dabei weniger in der Erhebung des Verkehrsangebotes als des zugehörigen, relationsscharfen Modal Splits, so daß die Schätzungen meist auf wenigen Datenpunk-

ten beruhen. Alternativ kann versucht werden, z. B. mit Hilfe von stated preference Methoden die Wichtigkeit verschiedener Komponenten des Verkehrsangebotes mit der Verkehrsmittelwahl zu korrelieren und auf diese Weise Bewertungsfunktionen zu entwickeln. Bei den Schätzverfahren ist zu kritisieren, daß die beobachtete Verkehrsmittelwahl nur mit dem konkurrierenden Verkehrsangebot der betrachteten Verkehrssysteme (zumeist nur MIV und ÖV) auf jeweils einzeln isolierten Nachfragerelationen erklärt wird. Die räumliche Verteilung alternativer Ziele und ihre Erreichbarkeit mit unterschiedlichen Verkehrsmitteln werden dabei nicht berücksichtigt. Die Bewertungsfunktionen liefern z. B. mit einem Logit-Ansatz plausible Verkehrsmittelanteile für eine einzelne, typische Relation und deren jeweiliges Verkehrsangebot. Die räumliche Verteilung der Verkehrsangebote und der Verkehrsnachfrage in einer Untersuchung führt jedoch häufig dazu, daß der resultierende globale Modal Split im Untersuchungsgebiet oder größeren Teilräumen davon unglaubwürdig wird. Zur Korrektur werden die Bewertungsfunktionen üblicherweise linear korrigiert, bis der gewünschte globale Modal Split sich einstellt.

Für die hier vorgestellte beispielhafte Implementierung wurde die im folgenden beschriebene, auch aus Gründen der Datenverfügbarkeit eher einfache Vorgehensweise gewählt. Als Bewertungsfunktionen werden in der Literatur diskutierte, einfache Funktionen aufgestellt. Eine explizite Parameterschätzung findet nicht statt, da die vorliegenden empirischen Daten bereits im Forschungsprojekt WUMS keine befriedigenden Ergebnisse zugelassen hatten. Stattdessen werden globale Zielwerte ('Rahmenwerte') für Modal Split und Fahrtweitenverteilung vorgegeben. Mit trial-and-error Methoden werden anschließend die Parameter so lange variiert, bis die Zielwerte hinreichend genau eingehalten werden.

Bewertungsfunktion

EVA-Modell

Lohse beschrieb schon 1977 einen Bewertungsansatz, in dem die Zielwahl in Abhängigkeit von Potentialen und Entfernung sowie die Verkehrsmittelwahl für vier Verkehrsmittel simultan berechnet wird. Dies ist insofern bemerkenswert, als die meisten in Westdeutschland publizierten Ansätze für Zielwahl und Modal Split nur die motorisierten Verkehrsmittel näher betrachten. Der NMIV wird oftmals mit Hilfe von globalen Faktoren vom gesamten erzeugten Verkehr abgespalten, bzw. es wird argumentiert, daß der nicht behandelte motorisierte Zellbinnenverkehr mit dem ebenfalls nicht gut modellierten verkehrsbezirkübergreifenden NMIV aufzurechnen sei. Ein solcher Ansatz ist vertretbar, wenn die Berechnung Grundlage für die kapazitative Bemessung von Straßen ist; für die Betrachtung von Verlagerungen zwischen motorisierten und nicht motorisierten Verkehrsmitteln ist er ungeeignet.

Wie der in dieser Arbeit vorgestellte Modellansatz basiert das simultane Erzeugung-, Verteilung- und Aufteilung- (EVA) Modell von Lohse auf der Logit-Modellierung für multimodale Entscheidungsprobleme. Die Zielwahl und Verkehrsmittelwahl wird allerdings nicht, wie im angelsächsischen Raum heute üblich, in Form eines hierarchischen Logit-Ansatzes formuliert, sondern es wird ein gemeinsamer Bewertungswert für alle möglichen Quelle-Ziel-Verkehrsmittel-Kombinationen gebildet. Dieser Bewertungswert besteht aus der unbedingten Wahrscheinlichkeit für Q_i als Startbezirk, Z_j als Zielbezirk und V_m als gewähltes Verkehrsmittel multipliziert mit der bedingten Wahrscheinlichkeit, daß genau die Ortsveränderung ij mit Verkehrsmittel m durchgeführt wird. Die unbedingte Wahrscheinlichkeit wird durch die Randsummen der Matrix

beschrieben (der Quell- und Zielverkehr sowie die globalen Verkehrsmittelanteile stehen fest) während die bedingte Wahrscheinlichkeit durch die Bewertung des Aufwandes (Widerstands) für die Benutzung des Verkehrsmittels m auf der Relation ij berechnet wird. Der Bewertungswert wird dann zur Summe der Bewertungswerte aller anderen Alternativen in Relation gesetzt.

Der interessante Aspekt an Lohses Ansatz ist in diesem Zusammenhang die Bewertungsfunktion des Aufwandes für unterschiedliche Verkehrsmittel. Sie muß den direkten Vergleich zwischen der Benutzung von Verkehrsmittel A auf der einen Relation mit der Benutzung von Verkehrsmittel B auf der anderen Relation zulassen, auch wenn die Rahmenbedingungen auf diesen beiden Relationen sich erheblich unterscheiden. In (Schnabel, Lohse, 1997) wird in einem Beispiel diese Bewertungsfunktion beschrieben. Der Verkehrsaufwand wird nur in Form von Zeitkosten berücksichtigt. Allerdings gehen bei den verschiedenen Verkehrsmitteln die einzelnen Komponenten (Zugang, Abgang, Wartezeit, Umsteigezeit, Fahrzeit) der Reisezeit mit unterschiedlichen Ansätzen für E, F, G bzw. WP ein.

$$F(t) = \frac{1}{(1+t)^{\varphi(t)}} \qquad \text{(Formel 4-9)}$$

$$\varphi(t) = \frac{E}{1+e^{(F-G\cdot t)}} = \frac{E}{1+e^{\left(F\cdot\left(1-t/WP\right)\right)}} \qquad \text{(Formel 4-10)}$$

mit: F(t) Bewertungswert des Zeitaufwandes t
t Zeitaufwand für eine Komponente der Reisezeit
E, F, G, WP Bewertungsparameter

Außerdem wird die Reisezeit insgesamt mit diesem Verfahren bewertet. Der Bewertungswert für die motorisierten Verkehrsmittel wird jeweils noch um einen Anteil des Bewertungswertes für den konkurrierenden Fußweg abgemindert. Die Bewertungswerte F(t) der einzelnen Komponenten t werden für jedes Verkehrsmittel multiplikativ verknüpft. Abbildung 4-12 zeigt exemplarisch solche Bewertungswahrscheinlichkeiten für vier Verkehrsmittel bei unterschiedlichen Entfernungen. Annahmen über konstante Geschwindigkeiten der einzelnen Verkehrsmittel unabhängig von der Entfernung sowie bzgl. Zugangs-, Abgangs-, Warte- und Umsteigezeiten sind in diesem Ansatz enthalten. Anders ließe sich keine Verknüpfung zu einer Entfernungsskalierung herstellen. Die Abbildung des Beispiels kann nicht zur Beurteilung der verschiedenen Verkehrsmittel auf einer spezifischen Relation herangezogen werden, da die verschiedenen Zeitkomponenten unterschiedlichen Einflüssen unterliegen und nicht direkt proportional zur Entfernung (hier: Luftlinie) sind.

Auf Basis dieser Aufwandsbewertungen werden die Wahrscheinlichkeiten für die Realisierung einer bestimmten Ortsveränderung ij mit dem Verkehrsmittel m unter Beachtung der Randsummen für Quellverkehr, Zielverkehr und globale Verkehrsmittelanteile berechnet.

Der in Abbildung 4-12 dargestellte Modal-Split ist aber keinesfalls als feste Aufteilung in Abhängigkeit von der Entfernung zu verstehen, da die Verkehrsmittelwahl auf einzelnen Relationen immer von den spezifischen Aufwandswerten für die einzelnen Verkehrsmittel abhängt. Die dargestellten Modal Split Werte müssen nicht einmal im globalen Durchschnitt für alle Relationen einer bestimmten Entfernung (Entfernungsklasse) gelten. Der Ansatz erlaubt in seiner Grundform lediglich, den Modal Split für alle Relationen in der Untersuchung als Randbedingung festzulegen. Lohse beschreibt im weiteren Verfahren, zusätzliche Randbedingungen für den Quell- und Zielverkehr oder den Modal Split einzelner Verkehrsbezirke einzubringen.

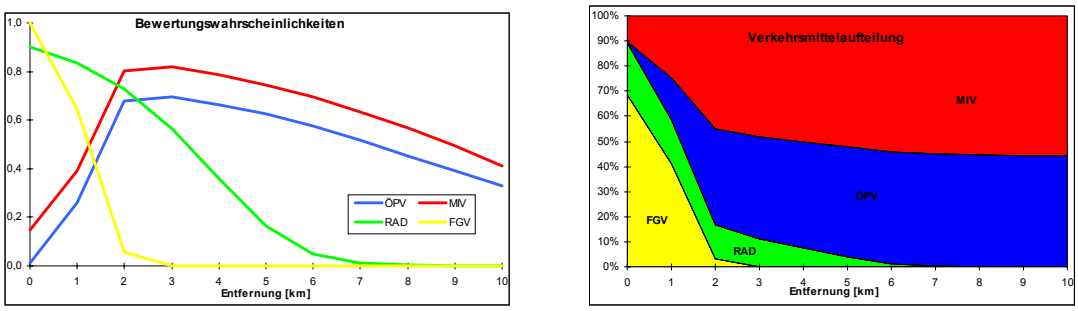


Abbildung 4-12: Bewertungswahrscheinlichkeiten und zugehörige Verkehrsmittelaufteilung nach dem EVA-Modell (0-10 km) (nach: Schnabel, Lohse, 1997).

Leider treten bei der Anwendung des beschriebenen Bewertungsansatzes auf größere Distanzen nicht plausible Effekte auf. Die gleichen Parameter, die in Abbildung 4-12 für den Entfernungsbereich 0 – 10 km gute Ergebnisse liefern, führen bei der Anwendung auf den Bereich von 0 – 100 km zu einer starken Überbewertung des ÖV. Lohse konnte freundlicherweise empirische Bewertungswerte aus einer neueren Untersuchungen für das 'Obere Elbtal' (Raum Dresden) zur Verfügung stellen. Versuche, diese Bewertungswerte auf das Untersuchungsgebiet Region Stuttgart anzuwenden, ergaben jedoch ebenfalls unrealistische Bewertungsergebnisse.

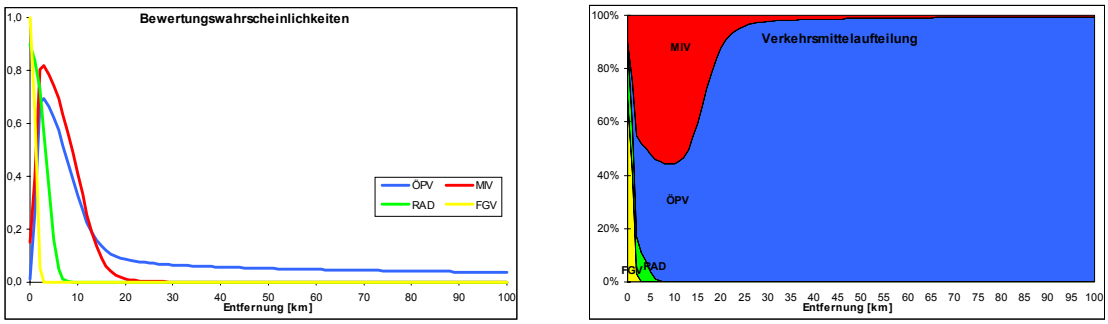


Abbildung 4-13: Bewertungswahrscheinlichkeiten und zugehörige Verkehrsmittelaufteilung nach dem EVA-Modell (0-100 km) (eigene Berechnung).

In mehreren aufwendigen Versuchen ist es nicht gelungen, den Bewertungsansatz mit Hilfe der in Formel 4-9 und Formel 4-10 vorgestellten Bewertungsparameter zielgerichtet auf vorgegebene Modal Split Werte und Entfernungsverteilungen hin zu kalibrieren, so daß der Einsatz der EVA-Bewertungsfunktionen schließlich verworfen wurde. Ein Grund mag die Tatsache gewesen sein, daß die einzelnen, explizit geforderten Teilkomponenten der Reisezeit nicht im erforderlichen Detail zur Verfügung standen und z. T. verallgemeinernde Annahmen getroffen werden mußten.

Potenz-Exponential-Bewertung

Alternativ wurden einfache Potenz-Exponentialfunktionen zur Bewertung des verkehrlichen Widerstandes untersucht. Ihre Parameter lassen sich deutlich einfacher zur Erreichung von gewünschten, globalen Ergebniswerten modifizieren, da die Wirkungsrichtung überschaubar bleibt. Die untersuchte Potenz-Exponentialfunktion hat die allgemeine Form:

$$f_m(w_{i,j,m}(t)) = w_{i,j,m}(t)^{\alpha_m} \cdot e^{-\beta_m \cdot w_{i,j,m}(t)} \cdot \gamma_m \qquad \text{(Formel 4-11)}$$

mit: $f_m(w_{i,j,m}(t))$ Bewertungswert
$w_{i,j,m}(t)$ Widerstandswert auf der Relation i, j, Verkehrsmittel m im Zeitintervall t
i Quelle der Relation
j Ziel der Relation
m Verkehrsmittel
t Zeitintervall
α_m, β_m, γ_m Bewertungsparamter

Diese Funktion bietet sich für die Bewertung der MIV- und ÖV-Alternativen an, da diese beiden Verkehrsmittel auf ganz kurzen Entfernungen nur wenig Potential aufweisen. Mit $\alpha = 0$ wird aus der Potenz-Exponentialfunktion eine negative Exponentialfunktion. Diese eignet sich zur Beurteilung der Alternativen Rad- und Fußgängerverkehr.

In umfangreichen trial-and-error Verfahren konnten für die fünf untersuchten Fahrtzwecke die folgenden Parameter der Potenz-Exponentialfunktion festgelegt werden (s. Tabelle 4-9). Mit diesen Parametern wurden die unten dargestellten Zielwerte der Fahrtweitenverteilung und des Modal Splits in befriedigender Weise eingehalten.

		Arbeit	**Einkauf**	**Ausbildung**	**Hochschule**	**Freizeit**
MIV	**α**	1,55	1,75	1,7	1,65	1,6
	β	0,0018	0,0035	0,0025	0,0025	0,0022
	γ	0,0045	0,003	0,0005	0,004	0,005
ÖV	**α**	1,7	1,9	1,85	1,85	1,7
	β	0,0018	0,004	0,003	0,004	0,0018
	γ	0,0009	0,0015	0,0035	0,005	0,0008
Rad	**α**	0	0	0	0	0
	β	0,003	0,005	0,003	0,003	0,002
	γ	200	500	800	1000	400
Fuß	**α**	0	0	0	0	0
	β	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
	γ	1000	1200	1000	500	4000

Tabelle 4-9: Bewertungsparameter der Potenz-Exponentialfunktion

Ganz wesentlich ist neben der Bewertungsfunktion natürlich die Widerstandsfunktion, in der die einzelnen Komponenten des Widerstandes zu einem einzigen Wert zusammengeführt werden. In ihrer allgemeinen Form stellt sie eine Linearkombination aller Widerstandskomponenten dar:

$$w_{i,j,m}(t) = a_0 + a_1 \cdot ZU_{i,m} + a_2 \cdot AB_{j,m} + a_3 \cdot FZ_{i,j,m}(t) + a_4 \cdot Dist_{i,j,m}(t) + a_5 \cdot Kost_{i,j,m}(t)$$

(Formel 4-12)

mit: $w_{i,j,m}(t)$ Widerstandswert auf der Relation i, j, Verkehrsmittel m im Zeitintervall t
i Quelle der Relation
j Ziel der Relation
m Verkehrsmittel
t Zeitintervall
ZU Zugangszeit in [sec]
AB Abgangszeit in [sec]
FZ Fahrzeit in [sec]
Dist Fahrstrecke in [m]
Kost monetäre Kosten
a_0 bis a_5 Bewertungsparameter

Diese allgemeine Funktion wird durch unterschiedliche Bewertungsparamter für die verschiedenen Verkehrsmittel stark variiert, weil in den entsprechenden Widerstandsmatrizen auch unterschiedliche Komponeneten zur Verfügung stehen.

	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
MIV	0	1	1	0,3	0,085	0
OEV	0	1	1	1	0	0
Rad	0	1	1	0	0,312	0
Fuß	0	0	0	0	0,92	0

Tabelle 4-10: Bewertungsparameter für die Widerstandsfunktionen der Verkehrsmittel

Einige Anmerkungen zu den Bewertungsparametern für die Widerstandsfunktionen:

- Der Offset-Parameter a_0 wurde nicht verwendet, da keine entsprechenden Anhaltswerte vorlagen. Er ist nur aus Gründen der Vollständigkeit aufgeführt. Zusätzliche Bewertungsparameter für weitere, zwar vorstellbare, aber nicht verwendete, Widerstandskomponenten (z. B. Parkgebühren, Parksuchzeiten, Warte- und Umsteigezeiten) wurden nicht dargestellt.
- Die jeweilige Zu- und Abgangszeit zum Verkehrsmittel am Quell- und Zielbezirk wurde für die Verkehrsmittel MIV, ÖV und Rad mit dem Standardbewertungswert 1 in die Bewertung aufgenommen. Für den MIV wurden als Zugangszeit pauschal 120 sec angesetzt, als Abgangszeit 180 sec. Die ÖV-Zu- und Abgangszeit ist in der vorliegenden Widerstandsmatrix bereits in der Fahrzeit enthalten und wird dort ebenfalls mit dem Faktor 1 gewichtet. Zu- und Abgangszeit des Radverkehrs betragen jeweils 60 sec. Für den Fußgängerverkehr wird unterstellt, daß keine solche Zeitkosten auftreten.
- Im MIV wurden beide entfernungsabhängigen Komponenten Fahrzeit und Entfernung berücksichtigt. Bei einer Geschwindigkeit von 30 km/h hat die Fahrzeit einen Anteil von 30% und die Entfernung einen Anteil von 70% an der Gesamtbewertung der variablen Kosten. Bei dieser Geschwindigkeit entspricht die gemeinsame Bewertung der variablen Kosten einer reinen Zeitkostenbewertung mit dem Faktor 1. Bei höheren Geschwindigkeiten gewinnt der Entfernungsanteil an Bedeutung und die beiden Komponenten ergeben zusammen einen äquivalenten Zeitbewertungsansatz > 1; bei niedrigeren Geschwindigkeiten sinkt der Anteil der Komponente Entfernung unter 70% und die äquivalente reine Fahrzeitbewertung wird < 1. Mit einer reinen Fahrzeitbewertung reagiert das Modell zu sensibel auf die Schwankungen in der Verkehrsqualität.
- In den Parametern zur Bewertung der Entfernung im Rad- und Fußgängerverkehr steckt zum einen der Umwegfaktor von 1,3 im Radverkehr und 1,1 im Fußgängerverkehr gegenüber der in der Widerstandsmatrix abgelegten Luftlinienentfernung und zum anderen die unterstellten Bewegungsgeschwindigkeiten von 4,2 m/s (15 km/h) respektive 1,2 m/s (4 km/h) für die beiden Verkehrsarten.
- Monetäre Kostenkomponenten wurde für die Kalibrierung des Modells noch nicht berücksichtigt. Sie sind jedoch für die Maßnahmenmodellierung vorgesehen.

Im Prinzip werden in diesem Ansatz alle Widerstandskomponenten in Zeitkosten umgerechnet und mit dem Standardbewertungswert 1 berücksichtigt. Selbstverständlich würde die Qualität des Modells verbessert, wenn hier ein differenzierter und empirisch besser abgesicherter An-

satz zur Anwendung käme. Dies setzt neben der methodischen Verfeinerung auch die differenzierte Datenverfügbarkeit voraus, die nicht gegeben war.

Zielwerte Fahrtweiten

Die Bewertungsfunktion des aggregierten Widerstandswertes bildet die Akzeptanz der Verkehrsteilnehmer ab, einen bestimmten Widerstand (Entfernung) zur Erreichung eines Zieles zu überwinden. In die tatsächlich realisierten Fahrten geht außerdem die räumliche Verteilung der potentiellen Zielgelegenheiten ein. Im unmittelbaren Nahbereich eines Startpunktes sind nur wenige Ziele erreichbar, während ihre Zahl mit zunehmender Entfernung stetig anwächst. Die Überlagerung der beiden Verteilungen (mit zunehmender Entfernung steigende Anzahl potentieller Ziele bei gleichzeitig abnehmender Akzeptanz, die Fahrt zu unternehmen) führt zu linksschiefen Verteilungen der Fahrtweiten.

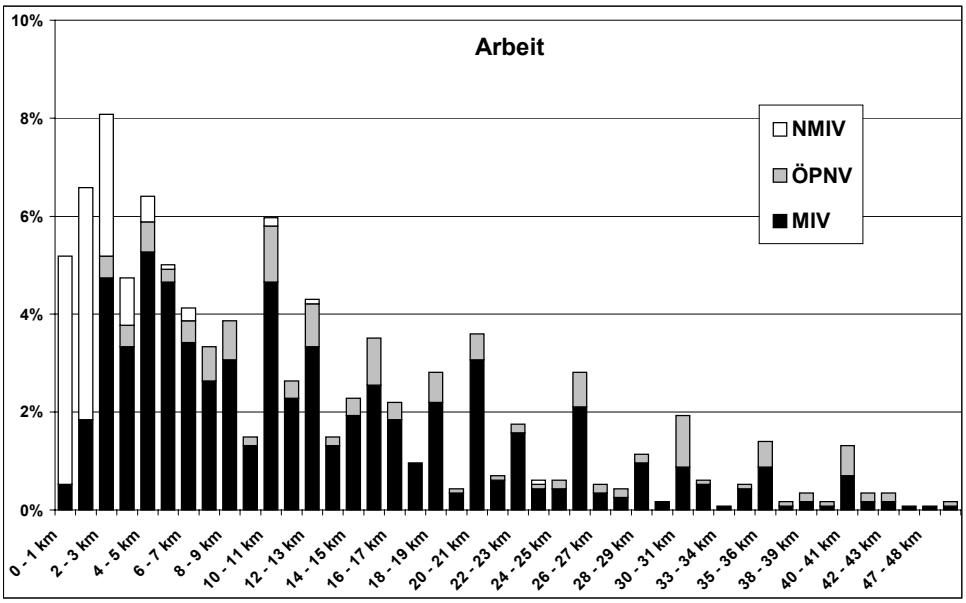


Abbildung 4-14: Fahrtweitenverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zur Arbeit' in Klassen von 1 km. (nach RVP-Haushaltsbefragung '95)

Die berichteten Fahrtweiten aus dem untersuchten Datensatz der Region Stuttgart lassen sich – getrennt nach Fahrtzwecken – klassifizieren und darstellen. Dabei fällt auf, daß die Einteilung in 1 km-Klassen zu starken Schwankungen führt. Dies liegt offensichtlich daran, daß die befragten Personen die – geschätzten – Fahrtweiten gerne auf volle 5 oder 10 km auf- bzw. abgerundet haben. Die Einteilung in 5 km-Klassen führt zu einer harmonischeren Kurve. Differenziert nach Verkehrsmitteln ist zu sehen, daß sich der NMIV gut durch eine negative Exponentialverteilung, MIV und ÖV durch Potenz-Exponentialkurven modellieren lassen. Die folgenden Abbildung 4-14 bis Abbildung 4-17 zeigen dies beispielhaft für die Fahrzwecke Arbeit und Einkaufen.

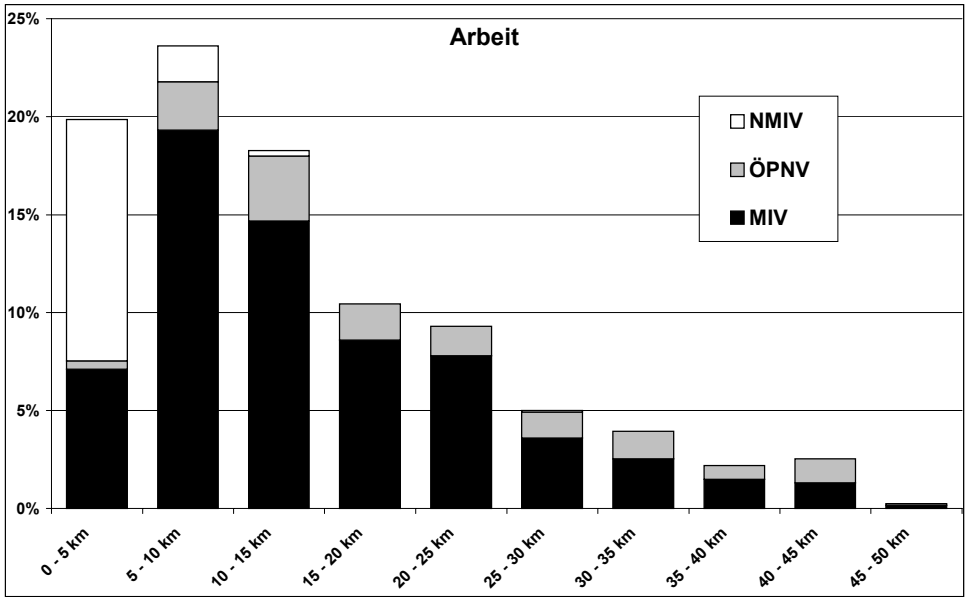


Abbildung 4-15: Fahrtweitenverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zur Arbeit' in Klassen von 5 km.
(nach RVP-Haushaltsbefragung '95)

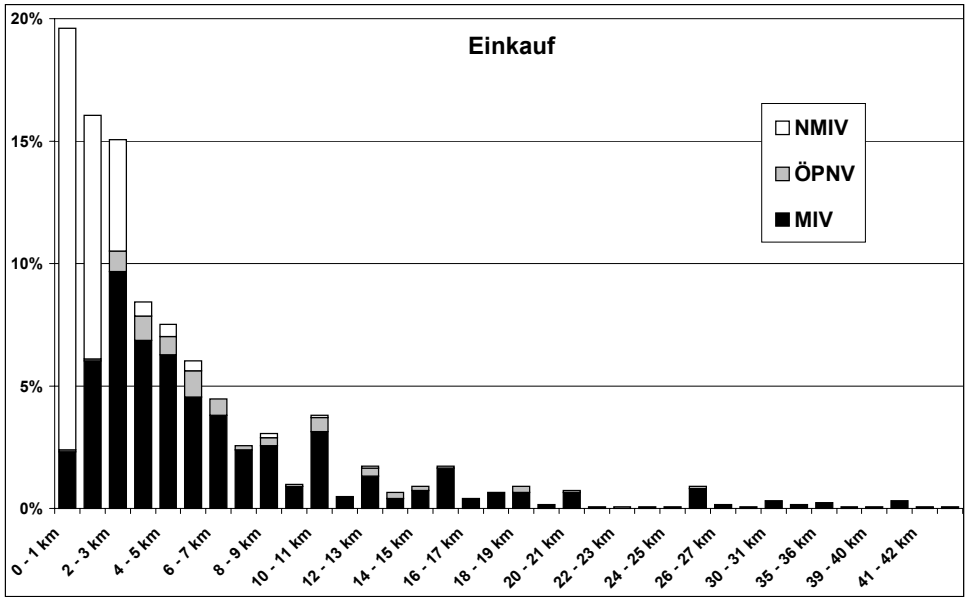


Abbildung 4-16: Fahrtweitenverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zum Einkaufen' in Klassen von 1 km.
(nach RVP-Haushaltsbefragung '95)

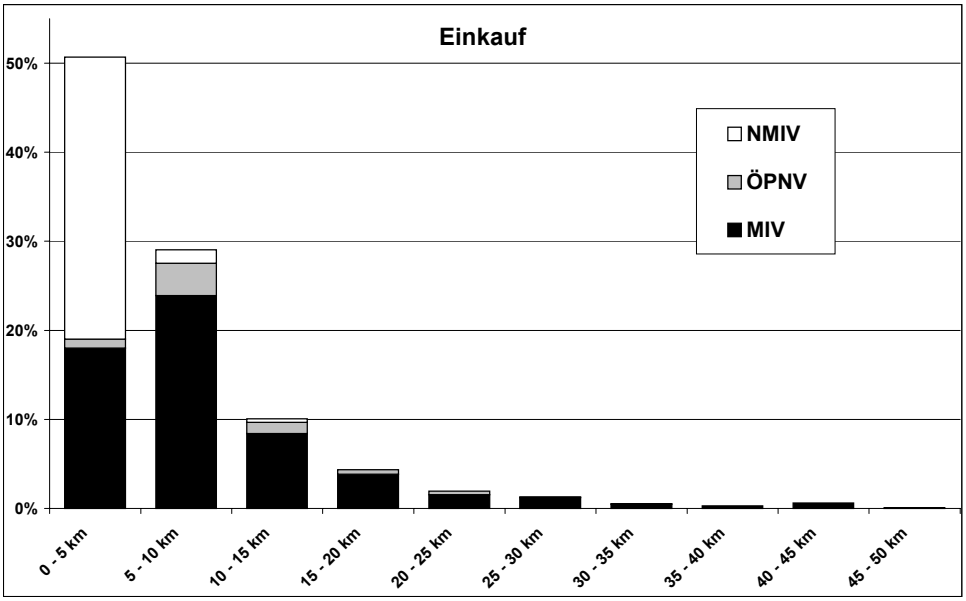


Abbildung 4-17: Fahrtweitenverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zum Einkaufen' in Klassen von 5 km. (nach RVP-Haushaltsbefragung '95)

Zur Charakterisierung der Verteilungen können die Mittelwerte und die Maxima herangezogen werden. Für die häufig genannten Fahrtzweck-Verkehrsmittelkombinationen lassen sich Potenz-Exponential-Funktionen schätzen, die den Verlauf der Verteilung gut wiedergeben. Große Schwierigkeiten bereitet dabei der NMIV: In der Klasseneinteilung von 1 km dominieren zufällige Streuungen, während bei der Einteilung in 5 km Klassen zu wenige Datenpunkte bleiben, um die Kurve zu schätzen. Wesentliche Kenngröße und Zielwert für die Modellierung ist deshalb die durchschnittliche Fahrtweite, die sich für jede Fahrtzweck-Verkehrsmittelkombination aus dem Befragungsdatensatz berechnen läßt (s. Tabelle 4-11):

	MIV	ÖV	NMIV
Arbeit	15,8 km	22,2 km	1,3 km
Ausbildung	10,7 km	11,6 km	1,7 km
Dienstl./Geschäftlich	29,5 km	61,7 km	2,0 km
Einkauf	7,3 km	6,0 km	0,7 km
Freizeit	12,5 km	23,3 km	1,0 km
Privater Service	8,7 km	3,1 km	0,3 km
Nach Hause	12,5 km	17,3 km	1,3 km

Tabelle 4-11: Durchschnittliche Fahrtweiten nach Fahrtzwecken und Verkehrsmitteln (nach RVP-Haushaltsbefragung '95)

In der Dokumentation zum Regionalverkehrsplan (VRS, 1996) wurden leider nur unspezifische durchschnittliche Fahrtweiten (ohne Fahrtzweck) veröffentlicht (Tabelle 4-12):

	MIV	ÖV	Rad	Fuß
Alle Fahrtzwecke	13,1 km	20,0 km	2,6 km	1,1 km

Tabelle 4-12: Durchschnittliche Fahrtweiten nach Verkehrsmitteln (nach VRS, 1996 a)

Als weitere Datenquelle wurde zu Vergleichszwecken die KONTIV '89 analysiert. Die (dreidimensionale) Kreuztabelle 35 ist eine Erweiterung der Tabelle 34 (Entfernung und Verkehrsmittel) und stellt den Zusammenhang von Fahrtzweck, Entfernung und Verkehrsmittel dar. Die Klassenbreite variiert stark, für die unten gezeigten, beispielhaften Darstellungen des Fahrtzweckes Arbeit, müssen die Klassen neu zusammengefaßt werden.

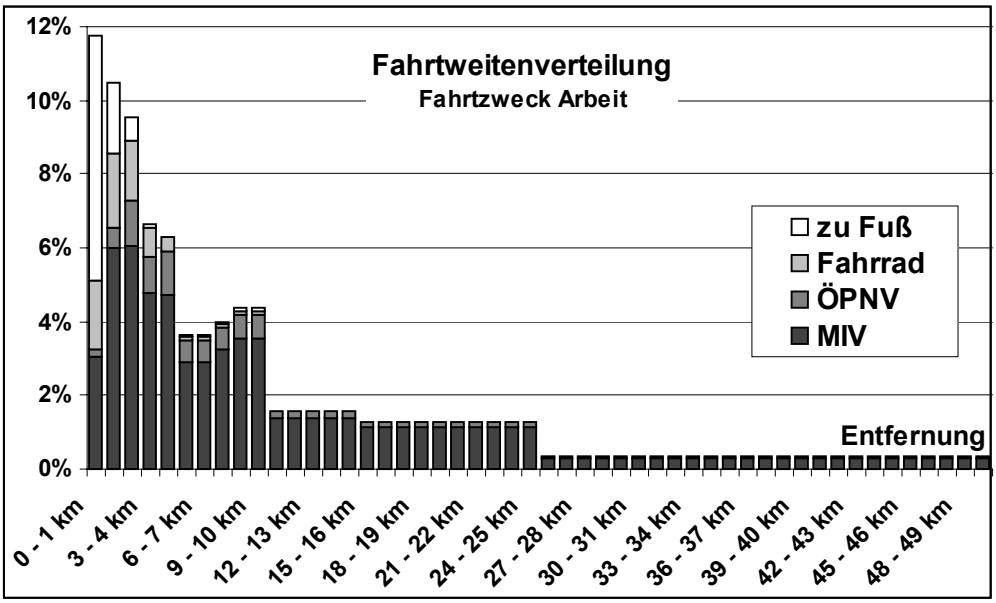


Abbildung 4-18: Fahrtweitenverteilung für den Fahrtzweck 'Arbeit' in Klassen von 1 km (nach KONTIV '89 Tabelle 35).

In der Abbildung 4-18 ist noch deutlich die unterliegende Klasseneinteilung der KONTIV mit unterschiedlichen Klassenbreiten zu erkennen. Der unstetige Verlauf der Verteilung ist in dem beliebten Schätzwert 10 km für die rückwirkend abgefragten Fahrtweiten begründet. Zu 5 km Klassen zusammengefaßt (Abbildung 4-19), wirkt die Kurve harmonischer.

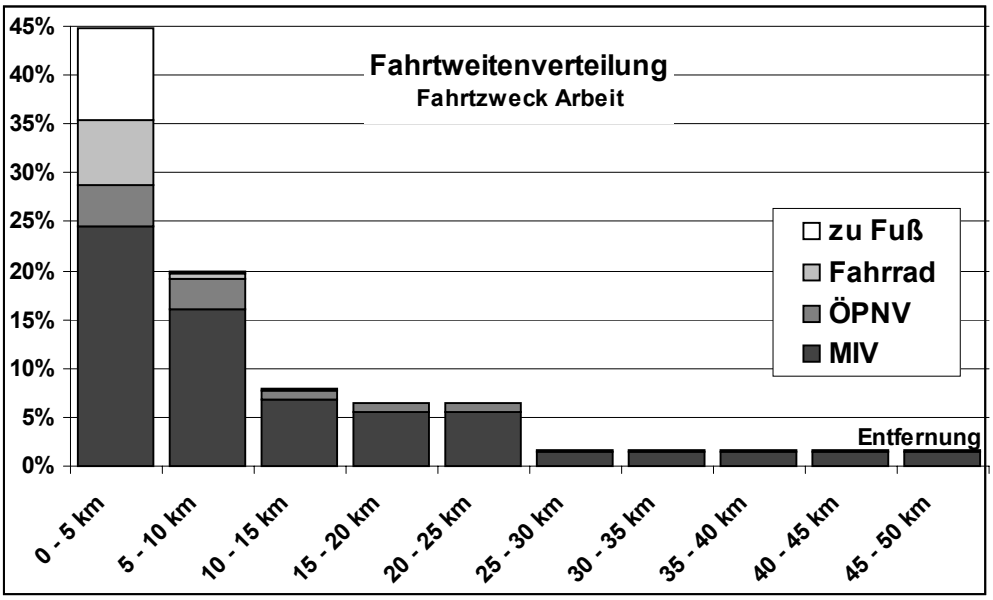


Abbildung 4-19: Fahrtweitenverteilung für den Fahrtzweck 'Arbeit' in Klassen von 5 km (nach KONTIV '89 Tabelle 35).

Auffällig ist die Tatsache, daß jeweils die erste Entfernungsklasse am höchsten besetzt ist. Darin unterscheiden sich die Daten aus der Haushaltsbefragung deutlich von der KONTIV '89.

Die durchschnittlichen Fahrtweiten, differenziert nach Fahrtzwecken; werden in der KONTIV '89 in der Tabelle der Mittelwertvergleiche wie folgt angegeben (s. Tabelle 4-13). Die Verkehrsmittel der vier Verkehrssysteme mußten dazu wie unten beschrieben nachfragegewichtet aggregiert werden.

	MIV	ÖV	Rad	Fuß
Arbeit	15,74 km	17,01 km	2,76 km	1,39 km
Ausbildung	15,05 km	11,22 km	2,95 km	1,35 km
Einkauf	8,20 km	8,91 km	1,97 km	1,15 km
Wirtschaftsverkehr	48,99 km	25,76 km	5,49 km	3,91 km
Service	6,76 km	5,37 km	2,03 km	0,93 km
Freizeit	16,44 km	20,29 km	3,88 km	1,81 km

Tabelle 4-13: Durchschnittliche Fahrtweiten nach Fahrtzwecken und Verkehrsmitteln (nach KONTIV '89, Tabellenteil: Mittelwertvergleiche 2)

Die Fahrtweitenverteilungen für alle Fahrtzwecke in Klassen von 1 und 5 km sind im Anhang 3 aufgeführt.

Zielwerte Modal Split

Um die Bewertungsparameter α, β und γ für die fahrtzweckspezifischen Bewertungsfunktionen schätzen zu können, werden Zielwerte für den angestrebten Modal Split, die Aufteilung der Verkehrsnachfrage zwischen den Verkehrsträgern, benötigt. Die Besonderheit in diesem Modellierungskonzept besteht zum einen darin, daß vier Verkehrsträger gleichzeitig berücksichtigt werden und zum anderen in der vollständigen Integration des Binnenverkehrs im Nachfragemodell. Die Zielwerte des Modal Split beziehen sich also auf die gesamte Mobilität der Bevölkerung. Die vier betrachteten Verkehrssysteme beinhalten – je nach Datenquelle – die folgenden einzelnen Verkehrsmittel:

MIV: Pkw als Fahrer, Pkw als Mitfahrer, Kraftrad, Taxi

ÖV: Eisenbahn, S-Bahn, U-Bahn, Straßenban, Bus, gebrochene Verkehre mit und ohne Fußweg im Vor- bzw. Nachlauf, Park & Ride

Rad: Fahrrad

Fuß: eigenständige Fußwege, kein Zu- oder Abgang

Nicht berücksichtigt werden Reisen im Luftverkehr, Bike & Ride und Wasserverkehre. Zwei Datenquellen wurden entsprechend ausgewertet. Die Unterschiede zwischen den regional erhobenen Daten aus den Untersuchungen zum Regionalverkehrsplan (s. Tabelle 4-14) und der KONTIV '89 (s. Tabelle 4-15) sind verhältnismäßig gering. Problematisch ist die unterschiedliche Zusammenfassung und Kodierung der Fahrtzwecke, die wiederum nicht mit den Fahrtzwecken aus dem RVP-Erzeugungsmodell übereinstimmen. Die dargestellten Zielwerte werden nicht als präzise Vorgaben verwendet, sondern stellen Rahmengrößen dar, um im Modell realistische Modal Split Ergebnisse zu erzielen. Das wesentliche Ziel der Implementierung ist

zu zeigen, daß es möglich ist, den Modellierungsansatz auf vorgegebene, plausible Zielwerte hin zu kalibrieren.

	MIV	ÖV	Rad	Fuß
Arbeit	70,0 %	14,1 %	5,5 %	10,1 %
Ausbildung	20,3 %	38,9 %	21,7 %	19,1 %
Einkauf	57,1 %	7,2 %	5,0 %	30,5 %
Privat	68,5 %	7,1 %	5,3 %	19,1 %
Dienstl./ Geschäftlich	86,3 %	6,7 %	1,9 %	4,7 %
Nach Hause	57,0 %	12,7 %	7,3 %	22,5 %

Tabelle 4-14: Fahrtzweckspezifische Modal Split Werte (nach VRS, 1996 a)

Die Tabelle 35 der KONTIV '89 läßt sich auch als Modal Split-Tabelle interpretieren. Die zu 100% fehlenden Beträge in den beiden folgenden Abbildungen zum Fahrtzweck Arbeit verteilen sich auf Flugverkehr, sonstige Verkehrsmittel und keine Angabe des Verkehrsmittels.

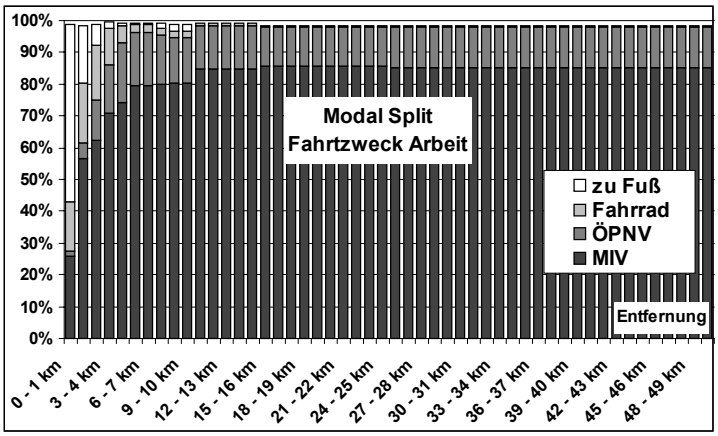


Abbildung 4-20: Modal Split für den Fahrtzweck 'Arbeit' in Klassen von 1 km (nach KONTIV '89 Tabelle 35).

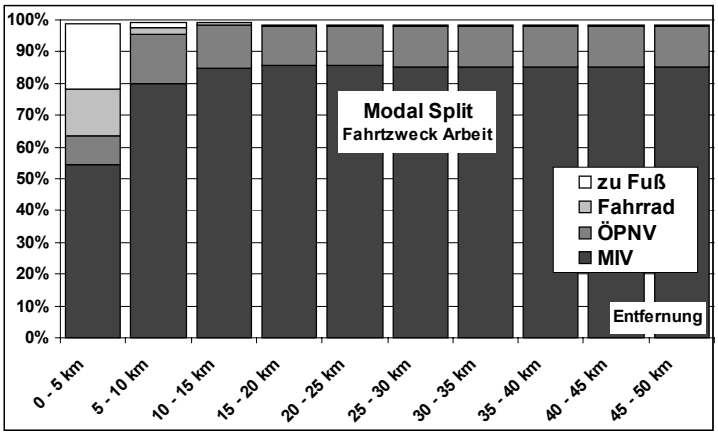


Abbildung 4-21: Modal Split für den Fahrtzweck 'Arbeit' in Klassen von 5 km (nach KONTIV '89 Tabelle 35).

Die differenzierten Modal Split-Anteile für alle Fahrtzwecke sind in Anhang 3 dargestellt.

Über alle Entfernungsklassen aggregiert ergeben sich die folgenden, nur mehr nach Fahrtzweck differenzierten Verkehrsmittelanteile (Tabelle 4-15):

	MIV	ÖV	Rad	Fuß
Arbeit	70,0 %	11,8 %	7,2 %	9,7 %
Ausbildung	22,7 %	33,4 %	25,9 %	17,2 %
Freizeit	48,2 %	7,1 %	11,2 %	32,8 %
Einkauf	42,7 %	8,6 %	12,3 %	35,9 %
Service	69,5 %	2,0 %	7,0 %	21,0 %
Wirtschaftsverkehr	72,0 %	8,6 %	7,1 %	1,7 %

Tabelle 4-15: Fahrtzweckspezifische Modal Split Werte (nach KONTIV '89 Tabelle 35)

Verteilungsfunktion und Ausgleichsrechnung der Nachfragematrix

Nachdem alle Eingangsgrößen und Zielwerte des Modells aufgestellt wurden, kann erstmals – für jeweils einen Fahrtzweck – die vierdimensionale Matrix der Verkehrsnachfrage mit den verkehrsmittelspezifischen Bewertungswerten $f_m(w_{i,j,m}(t))$ aufgefüllt werden. Diese werden im gleichen Schritt mit dem Quellverkehrsaufkommen Q_i des Startbezirks i, dem Zielgewicht Z_j des Zielbezirks j und dem Nachfragewert der zeitlichen Wunschlinie der Nachfrage für das relevante Zeitintervall ausmultipliziert.

$$F_{ijmt} = Q_i \cdot Z_j \cdot n_t^w \cdot f_m(w_{ijmt}) \qquad \text{(Formel 4-13)}$$

mit:
- F_{ijmt} Verkehrsnachfrage auf der Relation i, j, für Verkehrsmittel m im Zeitintervall t
- Q_i Quellverkehr im Bezirk i
- Z_j Zielverkehr im Bezirk j
- n_t^w Anteil der originär gewünschten Fahrten im Zeitintervall t an der Tagesnachfrage
- $f_m()$ verkehrsmittelspezifische Bewertungsfunktion des verkehrlichen Widerstandes
- w_{ijmt} verkehrlicher Widerstand auf der Relation i,j, Verkehrsmittel m im Zeitintervall t

Wenn das Modell ohne weitere Randbedingungen angewendet werden sollte, würde bereits jetzt das Ergebnis der Nachfragerechnung vorliegen. Zumindest die Gesamtmenge aller Ortsveränderungen in der Matrix sollte jedoch als Skalierungsfaktor berücksichtigt werden. Für die Beispielimplementierung wurden sowohl die Randvektoren des Quellverkehrs als auch des Zielverkehrs als harte Randbedingungen festgelegt. Die Einhaltung dieser Randbedingungen muß mit Hilfe von Lineartransformationen der Matrix mit einem geeigneten Konvergenzverfahren erzwungen werden. Die zeitliche Verteilung der Nachfrage und der Modal Split sind bereits vor der Ausgleichsrechnung festgelegt, da sie im Konvergenzverfahren nicht mehr verändert werden.

Der Randsummenvektor des Quellverkehrs ist das unmittelbare Ergebnis des Erzeugungsmodells. Der korrespondierende Zielverkehrsvektor muß vor Beginn des Konvergenzverfahrens linear skaliert werden, so daß die Gesamtsumme aller Fahrten im System in beiden Vektoren identisch ist.

Das Modell läßt sich so abwandeln, daß entweder nur Quell- oder Zielverkehr bzw. auch der Modal Split oder die zeitliche Verteilung der Nachfrage als harte Randsummenbedingung vorgegeben wird.

Als Konvergenzverfahren wurde der MULTI-Algorithmus nach Lohse (Schnabel, Lohse, 1997) in etwas erweiterter Form verwendet. Die Erweiterung betrifft die zusätzliche Dimension der Tageszeit. Da die zeitliche Verteilung jedoch als endogenes Ergebnis des Modells durch das Konvergenzverfahren nicht mehr geändert werden soll, wird die Tagesnachfrage jeweils aufsummiert und alle Zeitintervalle proportional skaliert.

$$F_{ijmt}(n+1) = F_{ijmt}(n) \cdot \frac{q_i(n)}{\overline{q}_i(n)} \cdot \frac{z_j(n)}{\overline{z}_j(n)} \cdot f(n) \qquad \text{(Formel 4-14)}$$

$$q_i(n) = \frac{Q_i}{Q_i(n)} \qquad \text{(Formel 4-15)}$$

$$\overline{q}_i(n) = \frac{\sum_j \sum_m \sum_t F_{ijmt} \cdot z_j(n)}{Q_i(n)} \qquad \text{(Formel 4-16)}$$

$$z_j(n) = \frac{Z_j}{Z_j(n)} \qquad \text{(Formel 4-17)}$$

$$\overline{z}_j(n) = \frac{\sum_i \sum_m \sum_t F_{ijmt} \cdot q_i(n)}{Z_j(n)} \qquad \text{(Formel 4-18)}$$

$$f(n) = \frac{F}{F(n)} \qquad \text{(Formel 4-19)}$$

$$Q_i(n) = \sum_j \sum_m \sum_t F_{ijmt}(n) \qquad \text{(Formel 4-20)}$$

$$Z_j(n) = \sum_i \sum_m \sum_t F_{ijmt}(n) \qquad \text{(Formel 4-21)}$$

$$F(n) = \sum_i \sum_j \sum_m \sum_t F_{ijmt}(n) \qquad \text{(Formel 4-22)}$$

mit:
- Q_i Zielwertvektor des Quellverkehrs
- Z_j Zielwertvektor des Zielverkehrs
- F Gesamtzielwert aller Fahrten im System
- n Konvergenzschritt
- $Q_i(n)$ Zielsummenvektor des Quellverkehrs im Konvergenzschritt n
- $Z_j(n)$ Zielsummenvektor des Zielverkehrs im Konvergenzschritt n
- $F(n)$ Gesamtsumme aller Fahrten im Konvergenzschritt n
- $F_{ijmt}(n)$ Verkehrsnachfrage im Konvergenzschritt n
- $q_i(n), \overline{q}_i(n), z_j(n), \overline{z}_j(n), f(n)$ Konvergenzfaktoren im Konvergenzschritt n

Das Konvergenzverfahren beginnt mit den nach Formel 4-13 berechneten Bewertungswerten.

$$F_{ijmt}(0) = Q_i \cdot Z_j \cdot n_t^w \cdot f_m(w_{ijmt}) \qquad \text{(Formel 4-13)}$$

Es müssen geeignete Abbruchkriterien definiert werden, um das Konvergenzverfahren zu beenden. Dazu eignet sich entweder die maximale Anzahl der Iterationen oder ein Genauigkeitskriterium. Im vorgestellten Modell wurde die Iteration beendet, wenn alle Randsummenwerte (Quell- und Zieverkehr) mit einer Genauigkeit < 2% eingehalten wurden[20].

[20] Dies ist eine pragmatische Annahme, um die Rechenzeit eines Modelllaufes zu beschränken.

4.5 Umlegung, Netzbelastung, Widerstandsmatrix

4.5.1 Vorbemerkung

Diese Arbeit konzentriert sich auf einen neuen Ansatz zur Modellierung der Verkehrsnachfrage unter Beachtung der zeitlichen Verteilung der Nachfrage im Tagesverlauf. Die Nachfrageberechnung ist mit dem Erreichen der Abbruchkriterien im Konvergenzverfahren zur Einhaltung der Randsummenbedingungen abgeschlossen. Besonders bei der Modellierung der Verkehrsnachfrage im MIV geht man jedoch davon aus, daß sich in der Realität ein dynamisches Gleichgewicht zwischen Verkehrsnachfrage und resultierender Verkehrsqualität einstellt. Dieses Gleichgewicht kann nur in sehr simplen, abstrakten Modellen analytisch hergestellt werden (Jauffred, Bernstein 1996). In Modellen für ein reales Untersuchungsgebiet muß dieses Gleichgewicht iterativ angenähert werden. Dazu ist es erforderlich, in jedem Iterationsschritt die Auswirkungen der jeweiligen MIV-Verkehrsnachfrage auf die Qualität des Verkehrssystems MIV mit Hilfe eines Verkehrsumlegungsprogramms abzubilden. Die resultierende MIV-Widerstandsmatrix dient im nächsten Iterationsschritt als Grundlage für die neuerliche Berechnung der Verkehrsnachfrage.

Für die anderen Verkehrssysteme wird unterstellt, daß die Qualität des Verkehrsangebotes nicht durch die Nachfrage beeinträchtigt wird. Deshalb muß die ÖV-, Rad- und Fußgängerverkehrsnachfrage nicht umgelegt werden, um die Verkehrsqualität im belasteten System zu bestimmen.

Bevor von der MIV-Nachfragematrix auf die resultierende Verkehrsqualität geschlossen werden kann, müssen noch einige Zwischenschritte abgearbeitet werden. Methodisch ist die Abbildung der Heimfahren noch nicht befriedigend gelöst: Die Nachfragerechnung wird für fünf Fahrtzwecke, dabei jedoch nur für die Hinfahrten, durchgeführt. Um realistische Netzbelastungen zu erhalten, ist es erforderlich auch die Rückfahrten abzubilden. Dies konnte aus Aufwandsgründen jedoch nur in vereinfachter Form durchgeführt werden, indem die fahrtzweckspezifischen Matrizen der MIV-Nachfrage skaliert und gespiegelt wurden.

Weitere Themenkomplexe sind die Umrechnung der MIV-Personenfahrten in Pkw-Fahrten. Der Fernverkehr mit Quelle und/oder Ziel außerhalb des modellierten Untersuchungsgebietes ist in der Nachfragerechnung noch nicht enthalten. Die Verkehrsqualität wird nicht alleine vom Personenverkehr, sondern auch vom Güterverkehr geprägt.

4.5.2 Heimfahrten

In den Aktivitätenketten des Erzeugungsmodells sind die Heimfahrten enthalten. Sie haben einen Anteil von knapp 45% an der gesamten Mobilität (s. Abbildung 4-22). Im Nachfragemodell wurden bislang nur die anderen 55% der Ortsveränderungen betrachtet. Ausgehend von diesen schon behandelten Fahrten (=100%) fehlen weitere 45/55 = 79%. Diese werden durch Spiegelung und Skalierung der vorliegenden MIV-Matrizen abgebildet.

Die MIV-Tagesnachfrage der fünf fahrtzweckspezifischen Matrizen wird relationsscharf zusammengefaßt und gespiegelt, d. h. Quelle und Ziel werden getauscht. Anschließend wird die Nachfrage wieder entsprechend den in Tabelle 4-16 dargestellten Ganglinien auf die 24 Zeitintervalle aufgeteilt. Die fünf fahrtzweckspezifischen, zeitlich differenzierten Rückfahrtmatrizen werden addiert und mit dem Faktor 0,79 skaliert um die Gesamtmobilität zu ergänzen. Dies ist

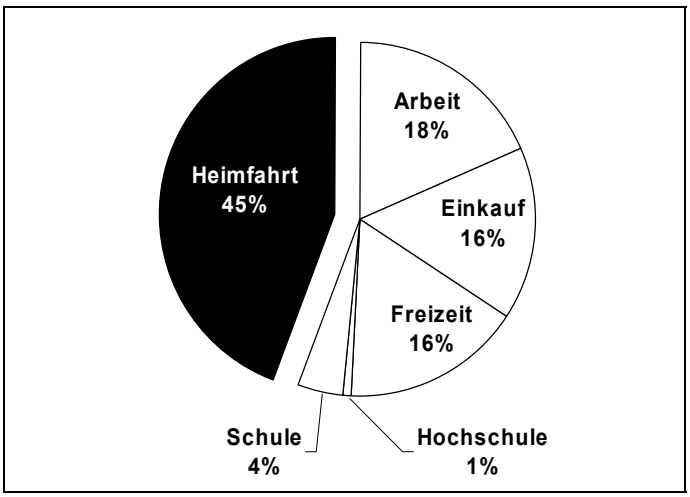


Abbildung 4-22: Anteile der Aktivitäten an der Gesamtmobilität (nach VRS, 1996 b)

ein stark vereinfachtes Verfahren gegenüber der Modellierung der Hinfahrten. Das Modell kann weder in der Verkehrsmittelwahl noch der Zeitwahl dynamisch auf die Verkehrsqualität reagieren.

Intervall	Arbeit - Wohnung	Einkaufen – Wohnung	Freizeit - Wohnung	Hochschule - Wohnung	Schule - Wohnung
0:00 - 1:00	0,1%	0,0%	2,5%	0,0%	0,0%
1:00 - 2:00	0,2%	0,0%	1,0%	0,0%	0,0%
2:00 - 3:00	0,1%	0,0%	0,7%	0,0%	0,0%
3:00 - 4:00	0,1%	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%
4:00 - 5:00	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
5:00 - 6:00	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
6:00 - 7:00	0,1%	0,2%	0,2%	0,0%	0,0%
7:00 - 8:00	0,3%	0,7%	0,8%	0,0%	0,2%
8:00 - 9:00	0,5%	2,6%	1,6%	0,0%	0,0%
9:00 - 10:00	0,7%	6,9%	1,5%	0,2%	0,3%
10:00 - 11:00	0,9%	14,5%	1,8%	1,6%	1,3%
11:00 - 12:00	2,2%	18,3%	3,4%	5,6%	9,0%
12:00 - 13:00	9,7%	8,7%	4,1%	8,6%	25,6%
13:00 - 14:00	6,7%	3,7%	2,3%	17,3%	39,5%
14:00 - 15:00	6,6%	3,3%	3,5%	14,2%	6,9%
15:00 - 16:00	10,4%	7,3%	5,2%	11,1%	4,4%
16:00 - 17:00	25,9%	9,5%	8,0%	14,4%	4,2%
17:00 - 18:00	15,3%	12,4%	10,9%	11,2%	2,1%
18:00 - 19:00	10,9%	9,3%	11,6%	6,1%	2,5%
19:00 - 20:00	3,6%	1,4%	8,8%	5,1%	1,2%
20:00 - 21:00	1,9%	0,4%	7,4%	1,9%	1,0%
21:00 - 22:00	1,2%	0,3%	7,1%	0,9%	1,4%
22:00 - 23:00	2,0%	0,2%	10,6%	1,0%	0,4%
23:00 - 24:00	0,8%	0,3%	6,9%	0,9%	0,0%
Gesamt	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Tabelle 4-16: Tagesganglinien der Heimfahrten (nach VRS, 1996 b)

4.5.3 Besetzungsgrad

Zur Umrechnung der MIV-Personenfahrten in Pkw-Fahrten sind – möglichst differenzierte – Fahrzeugbesetzungsgrade erforderlich. Die hier verwendeten Daten entstammen einer Untersuchung von Hautzinger (1994) zur Automotiv 1990. Da die Besetzungsgrade unmittelbar und linear die MIV-Verkehrsnachfrage beeinflußen, können sie unter Umständen auch zum Skalieren der Nachfragematrix genutzt werden.

Arbeit	Ausbildung	Einkauf	Hochschule	Freizeit	Heimfahrt
1,24	1,34	1,59	1,34	1,86	1,54

Tabelle 4-17: Fahrzeugbesetzungsgrade im MIV (nach Hautzinger, 1994)

Für den Fahrtzweck zur Hochschule wird in der zitierten Untersuchung kein Besetzungsgrad ausgewiesen. Deshalb wird der Besetzungsgrad für den Fahrtzwecke zur Ausbildung übernommen. Die fünf fahrtzweckspezifischen Matrizen und die zusätzliche Matrix der Heimfahrten werden jeweils durch den spezifischen Besetzungsgrad dividiert und dann – getrennt für die einzelnen Zeitintervalle der Nachfrage – addiert. Das Ergebnis ist die zeitdiskrete Pkw-Nachfragematrix.

4.5.4 Pkw-Fernverkehr

Das Untersuchungsgebiet besteht aus den 624 Verkehrszellen der Region Stuttgart, für die differenzierte Strukturdaten vorliegen. Die Verkehrsnachfrage dieser Bezirke wird vollständig nach der oben beschriebenen Methodik berechnet. Das Untersuchungsgebiet ist von einem Gürtel aus 136 Verkehrsbezirken umgeben, welche die angrenzenden Gemeinden und Landkreise repräsentieren. Für diese liegen die Strukturdaten nur mehr in gröberer Form vor. Unter anderem konnte für diesen Umgebungsraum (UR) keine Widerstandsmatrix für den Rad- und Fußgängerverkehr erstellt werden. Da jedoch mannigfaltige Verflechtungen zwischen dem Umgebungsraum und der Region Stuttgart bestehen, wurden die 136 Bezirke in die Berechnung der Verkehrsnachfrage einbezogen. In der Auswertung wird jedoch nur mehr die Verflechtung zwischen dem Umgebungsraum und der Region berücksichtigt, der Binnenverkehr des Umgebungsraumes wird nicht mehr betrachtet. Auf Grund der größeren Entfernung zwischen den Verkehrszellen ist es vertretbar, daß Fußgänger- und Radverkehr auf diesen Relationen nicht vorkommt.

Besonders auf den Autobahnen und den wichtigen Bundesstraßen spielt der Fernverkehr über die Grenzen der Region und des Umgebungsraumes hinaus eine wesentliche Rolle. Im Regionalverkehr wurden deshalb weitere 20 Verkehrsbezirke definiert, welche die anderen Bundesländer der Bundesrepublik Deutschland und das benachbarte Ausland repräsentieren. Die Pkw-Nachfragematrix zwischen diesen Zellen des äußeren Umgebungsraumes (URa) als Durchgangsverkehr und die Nachfrageverflechtungen mit der Region Stuttgart wurden aus dem Bundesverkehrswegeplan abgeleitet. Sie liegen jedoch nur als Tages- bzw. Vier-Stunden-Werte vor. Da es mit vertretbarem Aufwand nicht möglich war, diese Teilmatrix der Pkw-Nachfrage in das vorgestellte Modellierungskonzept zu integrieren, mußte sie vorerst unberücksichtigt bleiben. Die Belastungen auf den Autobahnen und wichtigen Bundesstraßen werden deshalb – vor allem zu den Grenzen der Region hin – zu niedrig angenommen.

4.5.5 Lkw-Matrix

Die Lkw-Nachfrage kann mit dem oben beschriebenen Modellierungsansatz nicht berechnet werden. Um realistische Belastungen im Straßennetz zu erzeugen, benötigt das Umlegungsmodell jedoch auch eine Lkw-Nachfrage-Matrix. Deshalb wird hier die im Rahmen des Regionalverkehrsplans vom Gutachterkonsortium entwickelte Lkw-Matrix des Analysejahres 1995 übernommen. Sie muß auf die 24 Zeitintervalle des Tages aufgeteilt werden um zur Pkw-Nachfragematrix kompatibel zu sein.

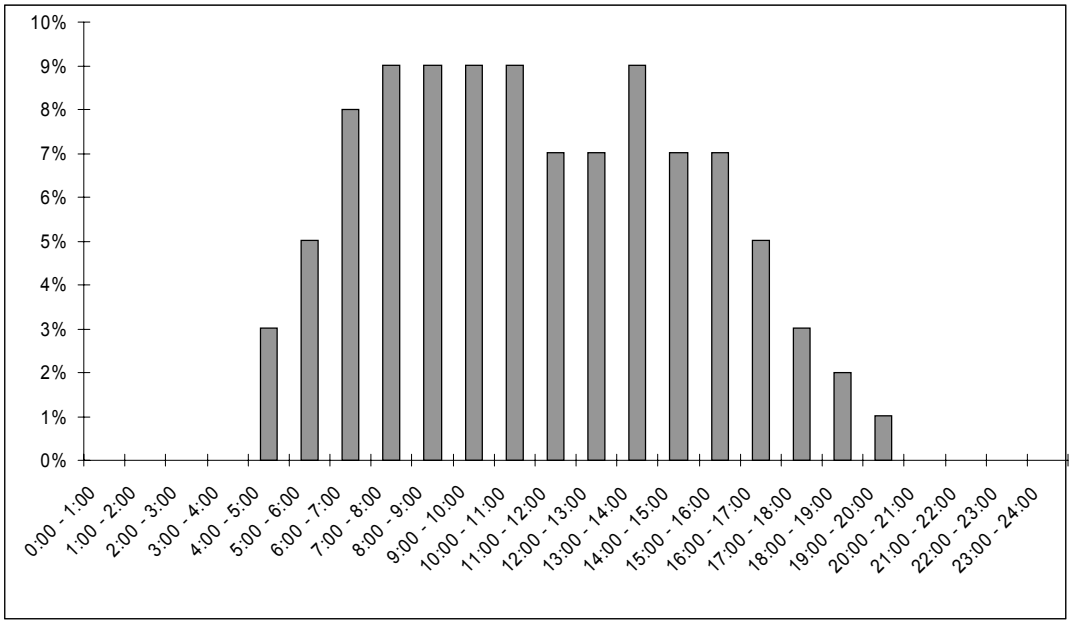


Abbildung 4-23: Tagesganglinie der Lkw-Nachfrage (nach NVS, 1992)

4.5.6 Umlegungsmodell

Es kommt das im Rahmen des Forschungsprojektes WUMS entwickelte MIV-Umlegungsmodell mit sukzessiver Bestwegumlegung zur Anwendung. Beim einfachen Bestwegverfahren ist die Annahme, daß alle Verkehrsteilnehmer von einem Einspeiseknoten zu einem Ausspeiseknoten ausschließlich den Bestweg im unbelasteten Netz benutzen, wenig glaubwürdig. Es bedarf weiterer Mechanismen, um einer realitätsnahen Abbildung des Wegewahlverhaltens nahezukommen.

Im Forschungsprojekt wurde dazu die Methode der sukzessiven Bestwegumlegung in mehreren Schichten gewählt. Dabei wird die Nachfrage einer Quelle-Ziel-Relation nicht auf einmal auf einen einzigen Bestweg, sondern in mehreren Teilschritten (Schichten) sukzessive jeweils auf einen neu berechneten Bestweg umgelegt. Dieses Verfahren kann zu einer Variation der Routen führen, wenn die Streckenwiderstände von der bereits aufgebrachten Belastung abhängig sind und zwischen den einzelnen Umlegungsschichten neu berechnet werden. Im Idealfall würde für jedes einzelne Fahrzeug im Umlegungsmodell der Bestweg neu berechnet. Dies ist aus Aufwandsgründen unmöglich. Außerdem verändern sich die Streckenwiderstände vor allem bei relativ geringen Netzbelastungen nicht schlagartig durch ein oder wenige zusätzliche Fahrzeuge. Die Schichten (Anteile an der Gesamtnachfrage auf einer Relation) werden

deshalb vor allem am Anfang relativ breit gewählt. Erst gegen Ende kommen feinere Einteilungen zur Anwendung, da die in der Widerstandsbildung verwendeten Capacity-Restraint-Kurven (s. Abbildung 4-24) bei höheren Belastungen bereits auf wenige Fahrzeuge sensibel reagieren.

Für die Aufteilung der Pkw-Nachfrage auf Schichten wurden die folgenden Faktoren verwendet: 25%, 25%, 20%, 15%, 10% und 5% der Gesamtnachfrage jeder Relation.

Die Lkw-Nachfragematrix wird bei der Umlegung auf das Modell des Straßennetzes jeweils als erstes in einer Schicht auf das leere Netz aufgebracht. Der unterliegende Gedanke ist, daß der Lkw-Verkehr auch bei abnehmender Verkehrsqualität nicht in das untergeordnete Netz verdrängt wird, sondern auf jeden Fall das Hauptstraßennetz verwendet. Die Routenwahl der Lkw wird deshalb nicht durch Capacity-Restraint-Funktionen beeinflußt. Vielmehr stellen die Lkw die Grundbelastung des Netzes für den nachfolgend umgelegten Pkw-Verkehr dar.

Wie oben bereits angedeutet, wird der Bestweg auf einer Relation so gebildet, daß der aggregierte Widerstand aller benutzten Netzelemente auf der gewählten Route möglichst gering bleibt. Voraussetzung dafür ist, daß jedem Netzelemente ein entsprechender Widerstandswert zugeordnet ist. Dieser kann aus mehreren Komponenten zusammengesetzt werden. Im vorliegenden Projekt wird der Streckenwiderstand aus den Komponenten Zeit [s], Wegstrecke [m] und monetäre Kosten [DM oder Pf] als Linearkombination gebildet:

$$w_{ij} = \alpha * t_{ij} + \beta * d_{ij} + \gamma * c_{ij} \qquad \text{(Formel 4-23)}$$

mit t_{ij} = Fahrzeit in Sekunden
d_{ij} = Streckenlänge in Metern
c_{ij} = Kosten (kordonbezogen oder fahrleistungsbezogen) α, β, γ = Gewichtungsfaktoren

Neben den Streckenelementen können in einem Netzgrafen weitere Elemente Beiträge zum Widerstand einer Route liefern. Ganz wesentlich sind dabei die Knotenpunkte, da sie die Informationen enthalten, welche Streckenelemente miteinander verknüpft sind, so daß überhaupt erst eine durchgängige Route gefunden werden kann. Zusätzlich können die Knotenpunkte Informationen über Abbiegeverbote oder Zeitzuschläge für bestimmte Fahrmanöver enthalten. Im Rahmen des Projektes konnten jedoch lediglich bestimmte Abbiegeverbote berücksichtigt werden, die Datenerhebung für die Modellierung der Leistungsfähigkeit von Knotenpunkten erwies sich für das große Untersuchungsgebiet als zu aufwendig. Weitere Netzelemente mit Einfluß auf den Gesamtwiderstand einer Route sind die sogenannten Einbindungsstrecken, mit denen die Verkehrsbezirke an den Netzgrafen angeschlossen werden. Diese Einbindungen symbolisieren in Form eines Zeitzuschlages die durchschnittlich benötigte Fahrzeit, um von einem Startpunkt im Verkehrsbezirk das im Modell dargestellte Streckennetz zu erreichen.

Die Zeitkomponente eines Streckenwiderstandes wird durch die Streckenlänge und die realisierbare Geschwindigkeit bestimmt. Diese Streckengeschwindigkeit wird in Abhängigkeit von bestimmten Streckencharakteristika aus der aktuellen Verkehrsbelastung berechnet. Dazu dienen sogenannte Capacity-Restraint (CR) -Funktionen, die den Zusammenhang von Verkehrsbelastung und Geschwindigkeit so beschreiben, daß die Routensuche auch in überlasteten Netzen zu einem Ergebnis führt. Für das vorliegende Projekt wurden CR-Funktionen aus den EWS (FGSV, 1998) implementiert. Es handelt sich dabei um dreiteilige, zusammengesetzte Funktionen, die das Fundamentaldiagramm des Verkehrs differenziert nach Streckentypen in einer für den Umlegungsalgorithmus geeigneten Weise darstellen. Die wesentlichen Unterschiede zur klassischen Darstellung des Fundamentaldiagramms bestehen darin,

daß es keine instabilen Verkehrszustände gibt und daß die Funktion auch für Nachfragemengen oberhalb der maximalen Kapazität noch eine Minimalgeschwindigkeit liefert (s. Abbildung 4-24).

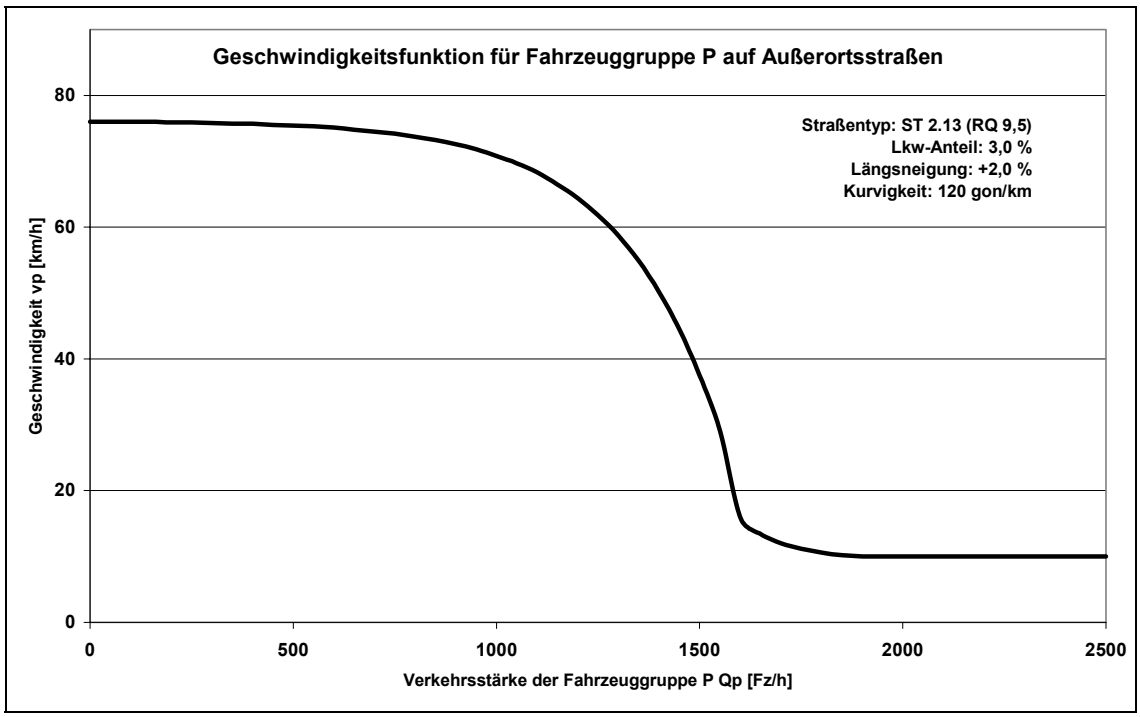


Abbildung 4-24: Beispiel für eine Verkehrsstärke-Geschwindigkeitskurve (ST 2.13) nach EWS (FGSV, 1998)

Eingangsgrößen für diese Nachfrage-Geschwindigkeits-Funktionen sind im wesentlichen die Verkehrsmengen Pkw und Lkw; auf den Außerortsstrecken gehen des weiteren die Längsneigung und z. T. die Kurvigkeit ein. Die resultierende Geschwindigkeit wird nach oben durch die auf dem Streckenabschnitt zulässige Höchstgeschwindigkeit begrenzt. Die Zuordnung zu den einzelnen Netzabschnitten erfolgt anhand der ebenfalls in den EWS (FGSV, 1995) definierten Straßentypen. Typische Merkmale zu ihrer Identifikation sind bei Außerortsstraßen die Anzahl der Fahrstreifen und die Breite der Fahrbahn(en). Bei Innerortsstraße kommen die Vorfahrtregelung, die angrenzende Bebauung, ggf. die physische Trennung der Richtungsfahrbahnen sowie Maßnahmen der Verkehrsberuhigung dazu.

Besonders wichtig ist für diese Untersuchung die Fähigkeit des Umlegungsmodells, die zeitlich differenzierte Nachfrage auch entsprechend ihrer jeweiligen Startzeitpunkte auf das Netz umzulegen. Am besten wäre dazu ein dynamisches Umlegungsverfahren in der Lage, das jede einzelne Fahrt zu einem individuellen Startzeitpunkt startet und sowohl räumlich wie zeitlich bis zum Ziel verfolgt (Servill, 1994). Die Abschätzung des Entwicklungsaufwandes und der erforderlichen Ressourcen (Arbeitsspeicher, Rechenzeit) hatte zum Ergebnis, daß ein solches Umlegungsmodell für die gesamte Region Stuttgart mit 780 Verkehrsbezirken innerhalb des Forschungsprojektes WUMS nicht zu realisieren war. Stattdessen wurde die sequentielle Umlegung der Tagesnachfrage in mehreren Intervallen weiterverfolgt. Ausgangspunkt der Programmentwicklung war dabei die Aufteilung der Nachfragematrix in 24 einstündige Intervalle. Das Programm ist jedoch so flexibel gehalten, daß es Intervalle beliebiger Breite verarbeiten kann. Für die Berechnung des WUMS-Trendszenarios wurden beispielsweise 10 Intervalle unterschiedlicher Breite verwendet. Die Verkehrsnachfrage innerhalb jedes dieser Intervalle wird dabei als konstant angesehen. Die Intervalle werden nacheinander abgearbeitet und

beeinflußen sich nicht gegenseitig. Jedes Intervall startet von neuem auf einem leeren Netz. Dies führt in gewissen Grenzen zu einer Überbewertung des Verkehrsaufkommens in den Nachfragespitzen, da die gesamte Fahrleistung der Fahrten, die in einem Zeitintervall gestartet sind, nur diesem Intervall zugewiesen wird. In der Realität wird mehr Fahrleistung aus der Spitzenstunde in das nachfolgende Intervall verdrängt, als die Spitzenstunde aus dem vorherigen Intervall übernimmt.

Die Verkehrsnachfragematrizen für Pkw und Lkw müssen differenziert nach den einzelnen Zeitintervallen vorliegen. Die Einteilung der Intervalle kann minutenscharf vorgenommen werden, es muß lediglich für Pkw und Lkw die gleiche Einteilung verwendet werden. Die Kapazität der einzelnen Streckenelemente liegt in Form der CR-Funktionen für ganze Stunden vor. Die Nachfragemengen werden deshalb für die Bearbeitung jedes Intervalls jeweils für eine ganze Stunde normiert. Am Ende der Umlegung wird die resultierende Streckenbelastung wiederum entsprechend der Länge des Zeitintervalls skaliert.

Der Modellschritt Umlegung MIV liefert Ergebnisse in zwei Bereichen: Zum einen werden die Belastungen und Verkehrszustände im Streckennetz beschrieben und zum anderen in der Widerstandsmatrix die Erreichbarkeit innerhalb des Untersuchungsgebietes dargestellt.

Die Verkehrsbelastungen werden für jedes Streckenelement im Netzgrafen differenziert nach den Zeitintervallen der Nachfragematrix und getrennt für die Fahrzeugklassen Lkw und Pkw richtungsscharf ausgewiesen. Zusätzlich werden jeweils die zugehörigen Streckengeschwindigkeiten für Lkw und Pkw gespeichert. Im Netzeditor (s. Abschnitt 4.5.7) lassen sich diese Informationen grafisch darstellen. Alle Informationen der Verkehrsbelastung sind in einer Datenbanktabelle abgelegt, so daß sie auf einfache Weise mit Datenbankabfragen ausgewertet und mit Attributen aus der zugehörigen Streckentabelle ergänzt werden können. In Datenbankabfragen lassen sich z. B. Kordonquerschnitte definieren, die zeitlich differenziert oder tageweise aggregiert ausgewertet werden sollen. Aus den Verkehrsbelastungen und den Längen der zugehörigen Strecken kann die Fahrleistung berechnet und z. B. nach Landkreisen differenziert ausgewiesen werden.

Das zweite wichtige Ergebnis der Umlegung ist die vollständige Widerstandsmatrix MIV für das Untersuchungsgebiet. Sie enthält 760 * 759 = 576.840 Relationen, da für den Zellbinnenverkehr im Umlegungsmodell kein Widerstand berechnet werden kann. Differenziert nach den Zeitintervallen der Nachfragematrix werden für jede Quelle-Ziel-Relation die Reisezeit des Bestweges im belasteten Netz, die zugehörige Routenlänge und ggf. auftretende monetäre Kosten auf dieser Route ausgewiesen. Dies geschieht ebenfalls in einer Datenbanktabelle, die mit entsprechenden Datenbankabfragen ausgewertet werden kann. In Verbindung mit der Pkw-Nachfragematrix lassen sich z. B. tageszeitlich und/oder räumlich gewichtete Indikatoren der Verkehrsqualität berechnen. Die Widerstandstabelle wird vor allem bei der iterativen Berechnung der Verkehrsnachfrage als Grundlage für die nächste Ziel- und Verkehrsmittelwahl benötigt.

Die Ergebnisse der Umlegung können zur Bewertung der Modellgüte des Gesamtmodells und zur Kalibrierung der Nachfragerechnung verwendet werden. Primär kommt hier der Vergleich von modellierten Streckenbelastungen mit gezählten Werten zur Anwendung. Außerdem kann die im Netz modellierte Pkw-Verkehrsleistung mit empirischen Daten verglichen werden, sofern diese vorliegen. Die MIV-Umlegung stellt jedoch nur den letzten Schritt bei der Modellierung der Verkehrsnachfrage dar und es muß stets beachtet werden, daß sämtliche vorgelagerten Modellschritte Auswirkungen auf das Ergebnis der Umlegung haben. Korrekturen im

Netzmodell und im Routensuchalgorithmus sind nicht geeignet, Modellierungsschwierigkeiten in der Prognose der Strukturdatenverteilung, den Erzeugungsraten, der Ziel- und Verkehrsmittelwahl oder dem Pkw-Besetzungsgrad zu kompensieren. Da sehr viele Modellteile Auswirkungen auf die generierten Verkehrsmengen haben kann die Analyse der MIV-Umlegung nur in begrenztem Maße Ansatzpunkte zur Verbesserung des Verkehrsmodells aufzeigen.

4.5.7 MIV-Netz-Editor

Die Beschreibung des Straßennetzes, der Netzgraf, liegt in Form von Datenbanktabellen vor. Er enthält alle für die Umlegung benötigten Informationen der Streckenelemente und die Angabe ihrer Verknüpfung untereinander. Für den Umlegungsalgorithmus als mathematische Prozedur ist diese Datenbeschreibung ohne Geokodierung ausreichend; es ist aber sehr schwer, ohne räumliche Darstellung den Netzgrafen zu bearbeiten oder die Ergebnisse der Umlegung zu überprüfen. Für das im Projekt entwickelte spezielle Datenformat mußte ein grafischer Netzeditor erstellt werden, der die Bearbeitung des Netzes und die Visualisierung der Ergebnisse möglich machte (Abbildung 4-25).

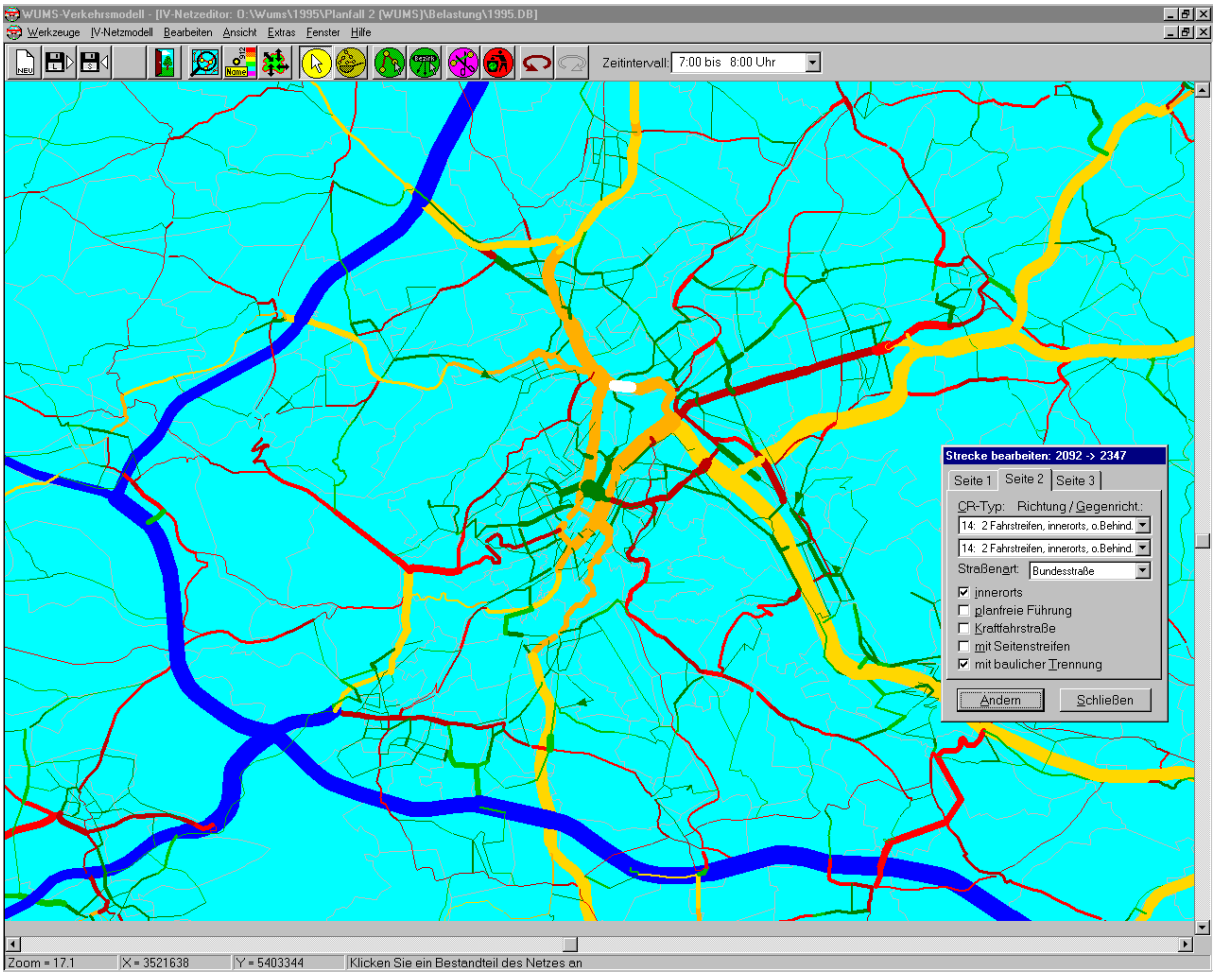


Abbildung 4-25: MIV-Netzeditor zur Darstellung der Netzbelastung und Bearbeitung des Streckennetzes

Die wichtigsten Aufgaben sind dabei die Darstellung aller Eigenschaften der Netzelemente, ihre Bearbeitung sowie Löschen bzw. Hinzufügen von neuen Netzelementen. Außerdem können die Ergebnisse der MIV-Umlegung differenziert grafisch dargestellt werden. Der Netzeditor führt in begrenztem Maße Plausibilitätskontrollen durch, um Fehleingaben zu reduzieren.

Aus Aufwandsgründen wurde der Netzeditor nicht mit Routensuchfähigkeiten ausgestattet. Die Darstellung von einzelnen Bestwegen im belasteten oder unbelasteten Netz oder von Isolinien der Erreichbarkeit ist deshalb nicht möglich. Da die einzelnen Routen im Rahmen der Umlegung nicht gespeichert werden, ist keine Strombündelanalyse möglich.

4.6 Hard- und Software

Die erforderlichen Berechnungen für diese Untersuchung wurden im Jahr 1999 auf einem Arbeitsplatz PC mit Intel Pentium II Prozessor 400 MHz und 512 MByte Arbeitsspeicher durchgeführt. Als Betriebssystem diente Microsoft Windows NT 4.0. Die Datenhaltung wurde weitgehend in Form von Borland Paradox 5 Datenbanktabellen organisiert. Das Erzeugungsmodell ist als Datenbankabfrage unter Microsoft Access realisiert. Das simultane Wahlmodell, die MIV-Umlegung und der MIV-Editor wurden als eigenständige Programme mit Borland Delphi 3.0 geschrieben. Die erforderlichen Matrizenoperationen wurden wiederum überwiegend als SQL-Abfragen unter Access durchgeführt. Die Analyse der empirischen Daten, Vorbereitung der Eingabe- und Zielwerte und die Analyse und Auswertung wurden teils unter Access, teils unter Excel durchgeführt.

Das Wahlmodell benötigt für die Berechnung der fünf beschriebenen Fahrtzwecke ca. 36 h Rechenzeit. Maßgeblich ist die erforderliche hohe Zahl von Konvergenzschritten, um die angestrebte Genauigkeit von 2% zu erzielen, sowie die Ausgabe der umfangreichen Ergebnisdaten. Die Weiterverarbeitung der MIV-Nachfragematrizen zur Pkw-Nachfragematrix erfordert ca. 6 h und das Umlegungsmodell benötigt weitere 8 h um 24 Zeitintervalle abzuarbeiten. Die anderen Arbeitsschritte und die Auswertungen lassen sich mehr oder weniger in Echtzeit durchführen.

Das Wahlmodell benötigt 500 MByte RAM, um die gesamte vierdimensionale Nachfragematrix im Speicher bearbeiten können. Die anderen Modellteile kommen alle mit 100 MByte Arbeitsspeicher zurecht. Erheblicher Plattenspeicher wird vor allem für die 5 x 4 = 20 Nachfragematrizen des Wahlmodells benötigt, nämlich ca. 1 GByte. Ebenfalls platzraubend ist die Widerstandsmatrix des MIV, die bei 780 Verkehrsbezirken und 24 Zeitintervallen etwa 350 MByte belegt. Demgegenüber fallen alle anderen Eingabe- und Ausgabedaten kaum mehr ins Gewicht.

4.7 Beispielrechnungen

4.7.1 Vorbemerkung

Das im Kapitel 4 beschriebene Verkehrsprognosemodell wurde beispielhaft angewendet um einen Maßnahmefall zu berechnen und im Vergleich mit einem Bezugsfall ohne Maßnahme zu analysieren. Der Bezugsfall dient außerdem dazu, das Modell so zu kalibrieren, daß die Ergebnisse im plausiblen Bereich liegen. In diesem Kapitel werden die Randbedingungen und Ergebnisse der Szenarien vorgestellt, die Ergebnisse analysiert und vor allem kritisch hinterfragt, inwieweit der Modellierungsansatz die in ihn gesteckten Erwartungen erfüllen kann. Die Analyse der Ergebnisse dient also vorwiegend zur Beurteilung des Modellierungskonzeptes und nicht der untersuchten Maßnahme.

Wie schon im vorigen Kapitel niedergelegt, kann hier nur wiederholt werden, daß die verfügbaren empirischen Daten im Forschungsprojekt WUMS nicht zu realitätsnahen Ergebnissen geführt haben und auch Methodik und Ergebnisse des Regionalverkehrsplans noch Fragen offen lassen. Die hier vorliegende Untersuchung nimmt nicht in Anspruch, die Wirklichkeit besser abzubilden, als die beiden zugrundeliegenden Arbeiten. Die vorliegenden Daten wurden auf das simultane Wahlmodell angepaßt, um realistische Rahmenbedingungen für eine kritische Überprüfung und Weiterentwicklung des theoretischen Modellierungskonzeptes zur Verfügung zu stellen.

4.7.2 Bewertungsgrößen

Das simultane Ziel-, Verkehrsmittel- und Zeitwahlmodell liefert in einem Berechnungslauf ca. 1 GByte Ergebnisdaten in den differenzierten Nachfragematrizen. Für jeden Fahrtzweck (5) und jedes Verkehrssystem (4) wird die Nachfrage auf 577.600 Relationen differenziert nach 24 Zeitintervallen ausgegeben. Da es völlig unmöglich ist, diese Informationsfülle in Einzelwerten zu erfassen, müssen Strategien und Werkzeuge entwickelt werden um diese Daten in geeigneter Weise zu aggregieren, zu visualisieren und einer Bewertung zugänglich zu machen.

Die Nachfragedaten sind mehrdimensional geschichtet: Es gibt zwei Dimensionen des Raumes (Quelle und Ziel), 24 Zeitintervalle und vier Verkehrsmittel. Als weitere Dimension kann der Fahrtzweck verstanden werden. Mögliche Strategien zur Analyse sind:

- die separate Betrachtung der einzelnen Ausprägungen einer Dimension. Dies bietet sich vor allem für Dimensionen mit wenigen Ausprägungen an, wie Verkehrsmittel oder Fahrtzweck.
- die Zusammenfassung aller Ausprägungen einer Dimension (Mittelwertbetrachtung). Dieses Verfahren kann für alle Dimensionen angewendet werden, es trägt jedoch die Gefahr in sich, Details zu verschleiern und extreme Daten zu nivellieren.
- die Klassifizierung oder Zusammenfassung mehrerer Ausprägungen einer Dimension zu Klassen oder Aggregaten. Diese Strategie bietet sich vor allem für Dimensionen mit vielen Einzelelementen, wie z. B. den räumlichen Dimensionen an.
- die beispielhafte Betrachtung eines beschränkten Ausschnittes. Mit dieser Technik kann Details nachgespürt werden, sie kann jedoch auch leicht zur Manipulation der Ergebnisdarstellung mißbraucht werden.

Im vorhergehenden Kapitel wurden die Modal Split Anteile und die durchschnittlichen Fahrtweiten als wesentliche Zielgrößen der Modellkalibrierung vorgestellt. Daher ist es zunächst wichtig, Werkzeuge zu entwickeln, mit denen der Zielerreichungsgrad überprüft werden kann. Für die Untersuchung des Modal Split und der Fahrtweitenverteilung werden alle Fahrten mit Quelle und Ziel in der Region Stuttgart zusammengefaßt. Die mittlere Fahrtweite läßt sich auch differenziert nach Zeitintervallen darstellen. Die Ergebnisse werden getrennt für die Fahrtzwecke dargestellt.

Das wesentliche Ziel der Untersuchung ist die realistischere Darstellung des Zeitwahlverhaltens der Verkehrsteilnehmer. Daher ist es essentiell, die im Modell realisierten, von der Verkehrsqualität geprägten, zeitlichen Ganglinien der Verkehrsnachfrage eingehend zu untersu-

chen. Die Differenzierung erfolgt zunächst nach den Verkehrsmitteln und Fahrtzwecken, aber auch räumliche Unterschiede müssen herausgearbeitet werden.

Ein unmittelbarer Zusammenhang sollte zwischen dem Zeitwahlverhalten und dem korrespondierenden Verlauf der Verkehrsqualität bestehen. Die Verkehrsqualität muß zeitlich und vor allem räumlich differenziert für den MIV analysiert werden, um diesen Zusammenhang nachzuweisen.

Um die Wirkungen der Verkehrsnachfrage im MIV zu beurteilen (und das Modell zu kalibrieren) müssen auch die Ergebnisse des Umlegungsmodells analysiert werden. Dies betrifft vor allem die Fahrleistung im Netz, die räumlich und zeitlich differenziert ausgewertet werden kann. Für ausgewählte Querschnitte kann auch der Verlauf der Nachfrage im Tagesverlauf mit bekannten Zählwerten verglichen werden.

Bezugsjahr für die drei Berechnungsfälle ist das Jahr 1995, für das die Analysedaten vorliegen. Äußerer räumlicher Bezug ist die Region Stuttgart. Fahrten mit Quelle- oder Ziel außerhalb der Region werden nur bei der Analyse der streckenbezogenen Belastungsmatrix berücksichtigt. Die Region wird zur differenzierten räumlichen Analyse in Landkreise, Mittelbereiche und Verkehrsbezirke unterteilt (s. Karte 2). Die 14 Mittelbereiche sind die Einflußbereiche der Mittelzentren in der Region Stuttgart. Zusätzlich wurde die Stadt Stuttgart (Oberzentrum) in 5 „Mittelbereiche“ unterteilt und die stark auf Stuttgart ausgerichteten Nahbereiche an der Peripherie der Landeshauptstadt (Bereich Filder und Bereich Strohgäu) zu zwei weiteren „Mittelbereichen“ ohne Mittelzentrum zusammengefaßt.

4.7.3 Bezugsszenario

Das Bezugsszenario dient zum einen der Kalibrierung des Modells, zum anderen als Vergleichsbasis für das Maßnahmeszenario. Die wesentlichen Kenngrößen zur Kalibrierung des Modells, d. h. zur Bestimmung der im Kapitel 4.4.4 vorgestellten fahrtzweckspezifischen Bewertungsparameter α, β und γ, sind in den folgenden Tabellen dargestellt.

Die angestrebten Zielwerte werden für vier Fahrtzwecke verhältnismäßig gut getroffen. Lediglich für den Fahrtzweck zur Hochschule ist eine Sondersituation eingetreten: Zum einen liegen keine expliziten Zielwerte für Modal Split und durchschnittliche Fahrtweiten vor. Die Verwendung der Zielwerte für den allgemeinen Ausbildungsverkehr erscheint nicht realistisch. Zum anderen ist die Strukturdatenverteilung für die Hochschulen deutlich anders als für die ersten vier Fahrtzwecke. Während für Arbeit, Einkauf, Ausbildung und Freizeit die Zielgelegenheiten flächendeckend zur Verfügung stehen, sind die Hochschulstandorte explizit ausgewiesen. Dies führt dazu, daß die Studenten, die im Erzeugungsmodell mit Hilfe von Faktoren aus den Bevölkerungszahlen abgespalten werden, z. T. sehr weite Wege zurücklegen müssen. Es tritt nur wenig Zellbinnenverkehr auf, für den der nicht motorisierte Verkehr eine geeignete Alternative darstellen würde. In der Realität konzentrieren sich die Wohnstandorte der Studenten in der Nähe der Universitäten. Dies wird im Erzeugungsmodell nicht adäquat berücksichtigt. Der Fahrtzweck zur Hochschule konnte daher nicht realistisch kalibriert werden. Zahlenmäßig spielen die Fahrten zur Hochschule jedoch eine ausgesprochen untergeordnete Rolle (2% der modellierten Fahrten).

[m]	Arbeit	Einkauf	Ausbildung	Hochschule	Freizeit
MIV	15.004	7.797	14.133	22.361	12.226
ÖV	16.903	5.458	11.578	17.696	15.598
Rad	2.589	1.696	2.825	3.465	3.810
Fuß	1.327	1.273	1.344	1.578	1.253

Tabelle 4-18: Durchschnittliche Fahrtweiten im Bezugsszenario nach Fahrtzwecken

	Arbeit	Einkauf	Ausbildung	Hochschule	Freizeit
MIV	65,4%	44,8%	14,5%	73,0%	40,1%
ÖV	17,5%	6,2%	33,1%	8,9%	8,6%
Rad	6,1%	11,9%	36,7%	16,0%	19,7%
Fuß	11,0%	37,0%	15,7%	2,1%	31,6%
Gesamt	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Tabelle 4-19: Modal Split Anteile im Bezugsszenario nach Fahrtzwecken

	Arbeit	Einkauf	Ausbildung	Hochschule	Freizeit
MIV	905.080	565.286	43.831	57.049	490.554
ÖV	241.792	78.510	100.098	6.973	105.715
Rad	84.048	150.435	110.865	12.479	240.749
Fuß	152.485	466.483	47.338	1.621	387.020
Gesamt	1.383.405	1.260.714	302.132	78.122	1.224.038
Anteil	33%	30%	7%	2%	29%

Tabelle 4-20: Verkehrsaufkommen im Bezugsszenario nach Fahrtzwecken

Nach der Darstellung der globalen Kenngrößen des Modellierungslaufes muß die weitere Analyse zunehmend exemplarisch auf einzelne Segmente der Verkehrsnachfrage eingehen. Da es aus Aufwandsgründen nicht möglich war, jeweils alle Detailuntersuchungen für alle Segmente durchzuführen, werden viele Einzelheiten am Beispiel des Fahrtzweckes Arbeit aufgezeigt. Zum einen war die Datenlage für diesen Fahrtzweck am besten, zum anderen wurde auch schon bei der Vorstellung der Modell-Zielwerte häufig der Fahrtzweck zur Arbeit exemplarisch herangezogen.

Die durchschnittlichen Fahrtweiten nach Fahrtzwecken und Verkehrsmittel sind nur ein Bewertungskriterium für eine realistische räumliche Nachfrageverteilung. Die unterliegende Verteilungskurve läßt sich – aggregiert innerhalb eines Bezugsraums – grafisch darstellen (s. Abbildung 4-26 und Abbildung 4-27). Die Darstellung zeigt, daß das simultane Verteilungsmodell:

- realistische linksschiefe Verteilungskurven für die einzelnen Verkehrsmittel liefert,
- auf ganz kurzen Entfernungen hohe Fußgängernachfrage generiert,
- auf kurzen Entfernungen dem Radverkehr Potential zuweist,
- auf mittleren Entfernungen einen ausgewogenen Modal Split aus MIV und ÖV generiert,
- auf langen Entfernungen unrealistisch hohe ÖV-Anteile produziert,
- den Zellbinnenverkehr harmonisch in die Gesamtnachfrage integriert.

Die äußere Kontur der Nachfrageverteilung unterscheidet sich – vor allem durch das erste Maximum bei kurzen Entfernungen von 1 bis 2 km – von bekannten Darstellungen. Es ist jedoch leicht nachvollziehbar, daß die Kurve gar nicht anders aussehen kann, wenn die veröffentlichten Modal Split Anteile und durchschnittlichen Entfernungen der nicht motorisierten Verkehrsmittel richtig wiedergegeben werden sollen. In veröffentlichten Untersuchungen ist der nicht motorisierte Verkehr häufig unterrepräsentiert, gar nicht enthalten, bzw. der gesamte Zellbinnenverkehr wurde vernachlässigt.

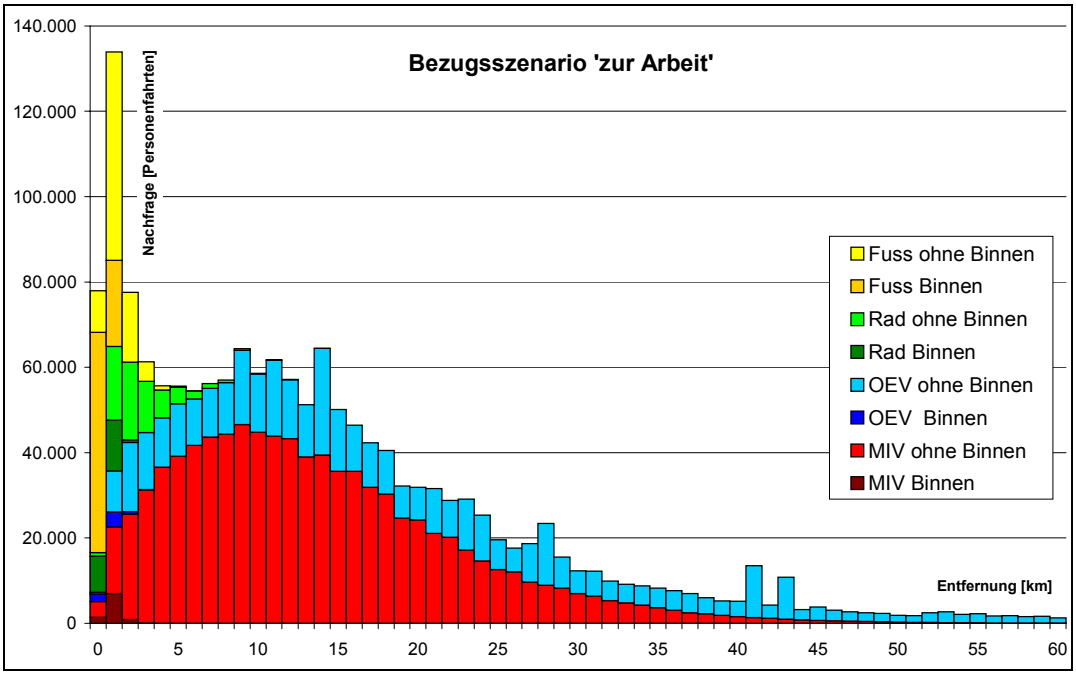


Abbildung 4-26: Fahrtweitenverteilung Fahrtzweck zur Arbeit nach Verkehrsmitteln

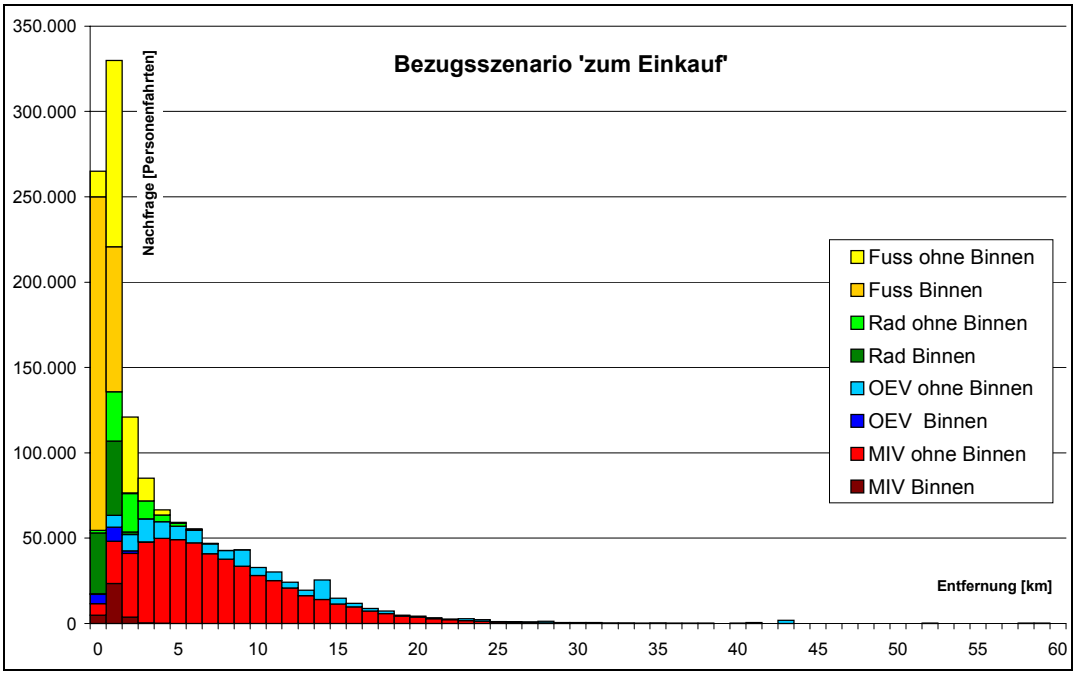


Abbildung 4-27: Fahrtweitenverteilung Fahrtzweck zum Einkaufen nach Verkehrsmitteln

Besonders an der Verteilungskurve zum Einkaufen wird deutlich, daß der hohe Anteil der nichtmotorisierten Verkehrsmittel am Modal Split in Verbindung mit den relativ kurzen durch-

schnittlichen Wegeweiten dieser Verkehrsmittel dazu führt, daß die Gesamtnachfrage auf den ganz kurzen Entfernungen sehr hoch ausfallen muß.

Die räumliche Verteilung der Verkehrsnachfrage läßt sich am besten in Kartenform darstellen. Karte 3 und Karte 4 im Anhang zeigen das Verkehrsaufkommen für den Fahrtzweck zur Arbeit im Bezugsszenario für die vier verwendeten Verkehrssysteme. Die Karten machen die Schwierigkeit der Darstellung offensichtlich: Auf Verkehrsbezirksebene überlagern sich die Informationen im Bereich der Landeshauptstadt, während die Aggregation auf Mittelbereiche viele Details nivelliert: die Modal Split Anteile unterscheiden sich – mit Ausnahmen von Stuttgart-Stadt-Zentrum – nur mehr geringfügig zwischen den einzelnen Mittelbereichen. Dargestellt ist in beiden Karten das Verkehrsaufkommen aller Fahrten zur Arbeit mit Ziel innerhalb der Region Stuttgart. Das Aufkommen in den Randbezirken ist deshalb etwas unterrepräsentiert. Diese Einschränkung mußte in Kauf genommen werden, da in der Verflechtung mit dem Umgebungsraum die nicht motorisierten Verkehrsmittel nicht berücksichtigt werden konnten und die Auswertung aller erzeugten Fahrten deshalb ebenfalls zu verzerrten Ergebnissen geführt hätte.

Auf den Karten 5 bis 8 sind die Modal Split Anteile der vier Verkehrssysteme (Bezugsszenario, Fahrtzweck zur Arbeit) separat dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, daß die nicht motorisierten Verkehrsmittel ihre höchsten Anteile in den Zentren der größeren Städte haben, während der ÖV-Anteil entlang der Bahn und S-Bahnlinien überdurchschnittlich hoch ist. Die Darstellung des MIV-Anteils erscheint wie eine Negativ-Abbildung der drei anderen Fahrtzwecke: Die Verkehrsbedingungen für den MIV sind flächendeckend annähernd gleich, der MIV-Anteil ist dort niedrig, wo die Bedingungen für die anderen Verkehrsmittel besonders gut sind.

In manchen grenznahen Bezirken ist der MIV-Anteil überraschend niedrig, bzw. die anderen Verkehrsmittel haben ungewöhnlich hohe Anteile. Der hohe ÖV-Anteil ist in all diesen Fällen auf die nicht dargestellten Fernbahnlinien zurückzuführen, die diesen peripher gelegenen Bezirken eine vergleichsweise bessere ÖV-Qualität bieten. Gute Bedingungen für den Rad- und Fußgängerverkehr weist der Modellierungsansatz unter anderem den dünn besiedelten Bezirken im Bereich der schwäbischen Alb zu, deren Siedlungsgebiete aufgrund der topographischen Situation in den Tallagen eng begrenzt sind. Diese Bezirke haben regelmäßig auch außergewöhnlich hohe Binnenverkehrsanteile, da weniger potentielle Ziele in vertretbarer Entfernung zur Verfügung stehen. Bei den Kartendarstellungen muß auch beachtet werden, daß die flächenmäßig großen, jedoch nur dünn besiedelten Bezirke an der Peripherie der Region leicht ein optisches Gewicht erhalten, daß ihnen nicht zusteht. Die hohen NMIV-Anteile beziehen sich im Prinzip nur auf die besiedelten Flächen, sie werden als Farbschattierung jedoch dem ganzen Bezirk zugewiesen.

Die Analyse des zeitlichen Verlaufs der Nachfragekurve zeigt, daß die dem Modell zugrunde gelegten Mechanismen wirksam sind. Die fahrtzweckspezifischen Nachfragekurven reagieren auf den Verlauf der Verkehrsqualität in der jeweils zugeordneten Widerstandsmatrix. Als Bezugskurve können die Verläufe der Verkehrsmittel Rad und zu Fuß gelten: die Widerstandsmatrix für die nicht motorisierten Verkehrsmittel ist per Definition im Tagesverlauf konstant gehalten. Die zeitliche Verteilung der Nachfrage für diese beiden Verkehrssysteme stimmt deshalb vollständig mit der Wunschlinie der zeitlichen Nachfrage für den Fahrtzweck zur Arbeit überein.

Die Kurven für den MIV und ÖV weichen dagegen von der Wunschlinie ab. Vor allem die MIV-Nachfrage ist in den Intervallen der Spitzennachfrage von 6.00 bis 7.00 Uhr und 7.00 bis 8.00

Uhr niedriger als die Wunschlinie, da in diesem Zeitintervall die Verkehrsqualität deutlich schlechter ausfällt. Zum Ausgleich muß die Nachfrage in den Intervallen mit besserer Verkehrsqualität überdurchschnittlich hoch sein. Besonders gut zu sehen ist dies in den Schulterintervallen 5.00 bis 6.00 Uhr und 8.00 bis 9.00 Uhr.

Anders verhält sich die Situation für den öffentlichen Verkehr. In den Nachtstunden besteht kein Angebot, deshalb kann auch keine Nachfrage auftreten. Dagegen wird in den Spitzenstunden das beste ÖV-Angebot gefahren, deshalb ist die ÖV-Nachfrage in der Spitze etwas höher als die Wunschlinie der Nachfrage.

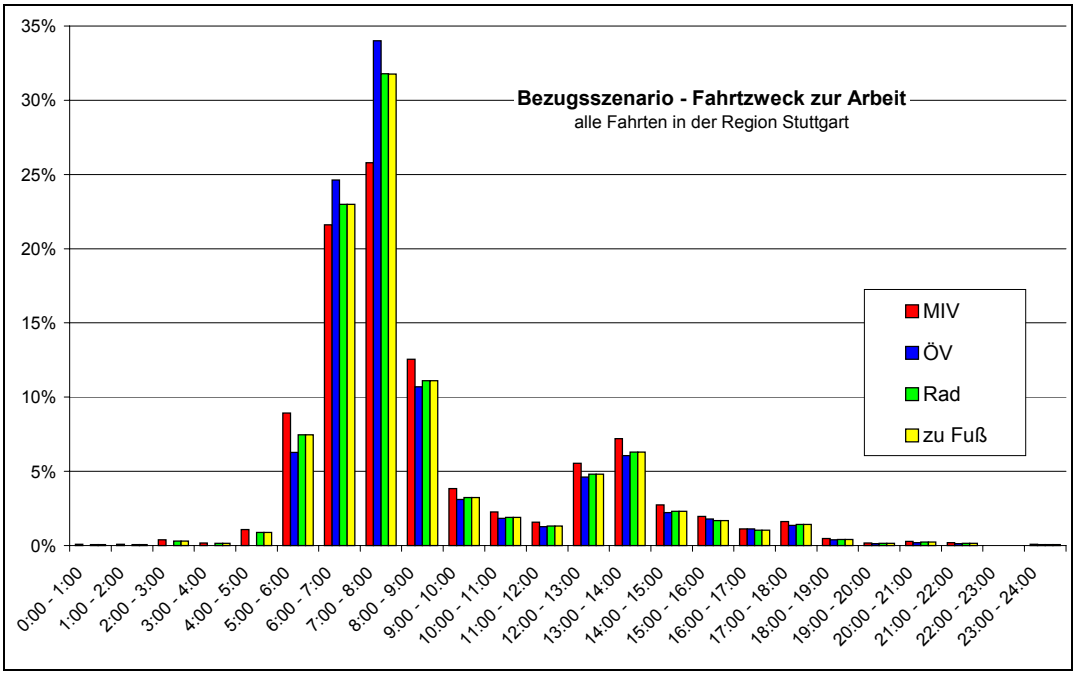


Abbildung 4-28: Zeitlicher Verlauf der Verkehrsnachfrage nach Verkehrsmitteln (alle Fahrten in der Region Stuttgart)

Die Verkehrsqualität im MIV ist in der Morgenspitze vor allem in Richtung auf die LH Stuttgart hin beeinträchtigt. Das spiegelt sich in der zeitlichen Verteilung der MIV-Nachfrage wieder: Das Spitzenintervall der Nachfrage nach Stuttgart ist deutlich breiter und flacher angelegt als in der Gegenrichtung (s. Tabelle 4-21).

	0:00 - 1:00	1:00 - 2:00	2:00 - 3:00	3:00 - 4:00	4:00 - 5:00	5:00 - 6:00	6:00 - 7:00	7:00 - 8:00	8:00 - 9:00	9:00 - 10:00	10:00 - 11:00	11:00 - 12:00
alle Fahrten	0,1%	0,1%	0,4%	0,2%	1,1%	8,9%	21,6%	25,8%	12,6%	3,9%	2,3%	1,6%
nach Stuttgart	0,1%	0,1%	0,5%	0,2%	1,3%	10,7%	18,6%	19,8%	14,2%	4,6%	2,7%	1,9%
von Stuttgart	0,1%	0,1%	0,4%	0,2%	1,1%	8,8%	21,6%	27,7%	12,3%	3,8%	2,2%	1,5%

Tabelle 4-21a: Zeitlicher Verlauf der MIV-Verkehrsnachfrage nach Richtung: alle Fahrten in der Region, aus den Landkreisen in die LH Stuttgart, aus der LH Stuttgart in die Landkreise, Bezugsfall

	12:00 - 13:00	13:00 - 14:00	14:00 - 15:00	15:00 - 16:00	16:00 - 17:00	17:00 - 18:00	18:00 - 19:00	19:00 - 20:00	20:00 - 21:00	21:00 - 22:00	22:00 - 23:00	23:00 - 24:00
alle Fahrten	5,6%	7,2%	2,7%	2,0%	1,1%	1,6%	0,5%	0,2%	0,3%	0,2%	0,0%	0,1%
nach Stuttgart	6,5%	8,4%	3,3%	2,3%	1,3%	1,9%	0,6%	0,2%	0,4%	0,2%	0,0%	0,1%
von Stuttgart	5,3%	6,9%	2,6%	1,9%	0,9%	1,5%	0,5%	0,2%	0,3%	0,2%	0,0%	0,1%

Tabelle 4-21b: Zeitlicher Verlauf der MIV-Verkehrsnachfrage nach Richtung: alle Fahrten in der Region, aus den Landkreisen in die LH Stuttgart, aus der LH Stuttgart in die Landkreise, Bezugsfall

Aus den resultierenden Ganglinien für die einzelnen Verkehrssysteme kann leicht erschlossen werden, daß die Modal Split Anteile im Tagesverlauf variieren. In Abbildung 4-29 sind die Modal Split Anteile für die Verflechtung zwischen den Mittelbereichen Esslingen und Stuttgart-Stadt-Zentrum ausgewertet. Rad- und Fußgängerverkehr spielt aufgrund der Entfernung keine Rolle. Es ist deutlich zu sehen, daß der MIV-Anteil während der Spitzenstunde jeweils zurückgeht, während er abends und nachts bei schlechterem ÖV-Angebot seine höchsten Werte erreicht. Der Einbruch in der morgendlichen Spitzenstunde ist in Richtung Stadtmitte deutlich ausgeprägter als in der Gegenrichtung.

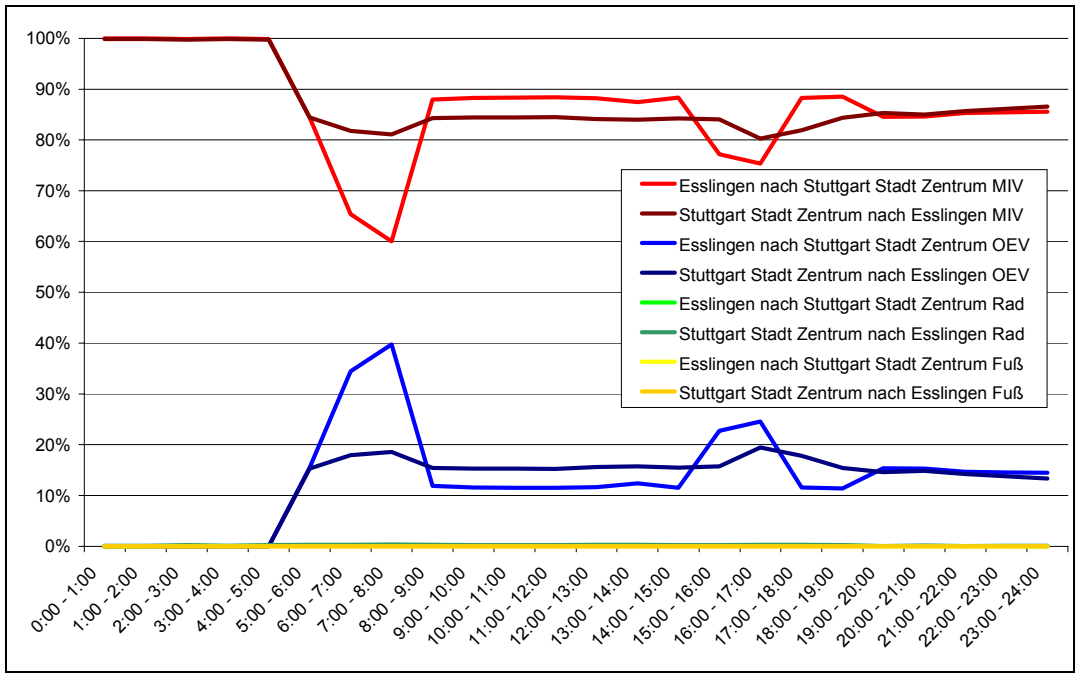


Abbildung 4-29: Modal Split im Tagesverlauf zwischen den Mittelbereichen Esslingen und Stuttgart Stadt-Zentrum, Fahrtzweck Arbeit, Bezugsfall.

Problematisch stellt sich die Eigenart des Verkehrsmodells dar, bei variierender Verkehrsqualität unterschiedliche durchschnittliche Fahrtweiten (und unterschiedliche Verteilungskurven der Entfernungen) zu erzeugen. Dieses Phänomen tritt bei allen Modellen auf, die den kombinierten Widerstand in Zeitkosten ausdrücken und wird gerne als Berücksichtigung des induzierten Verkehrs bezeichnet: Verbesserte Verkehrsqualität (z. B. durch neue Infrastruktur) führt dabei zu verstärkter Verkehrsnachfrage (längere Wege in der gleichen Zeit). Bei der Kalibrierung des Modells wird implizit nicht die durchschnittliche Fahrtweite und die Fahrtweitenverteilung eingestellt, sondern der durchschnittlich überwundene aggregierte Widerstand und die Widerstandsverteilungskurve. Für diese gibt es jedoch keine Vergleichswerte. Solange der

Entfernungsanteil (unmittelbar und über die durchschnittliche Geschwindigkeit in Form von Zeitkosten) an den aggregierten Kosten konstant bleibt, besteht ein linearer Zusammenhang zwischen Widerstandskurve und Entfernungskurve. Ändert sich jedoch das Verhältnis (z. B. aufgrund veränderter Verkehrsqualität), so erzeugt das Modell zwar die gleiche Verteilung der Widerstandskurve, die Entfernungsverteilung kann sich jedoch unterscheiden.

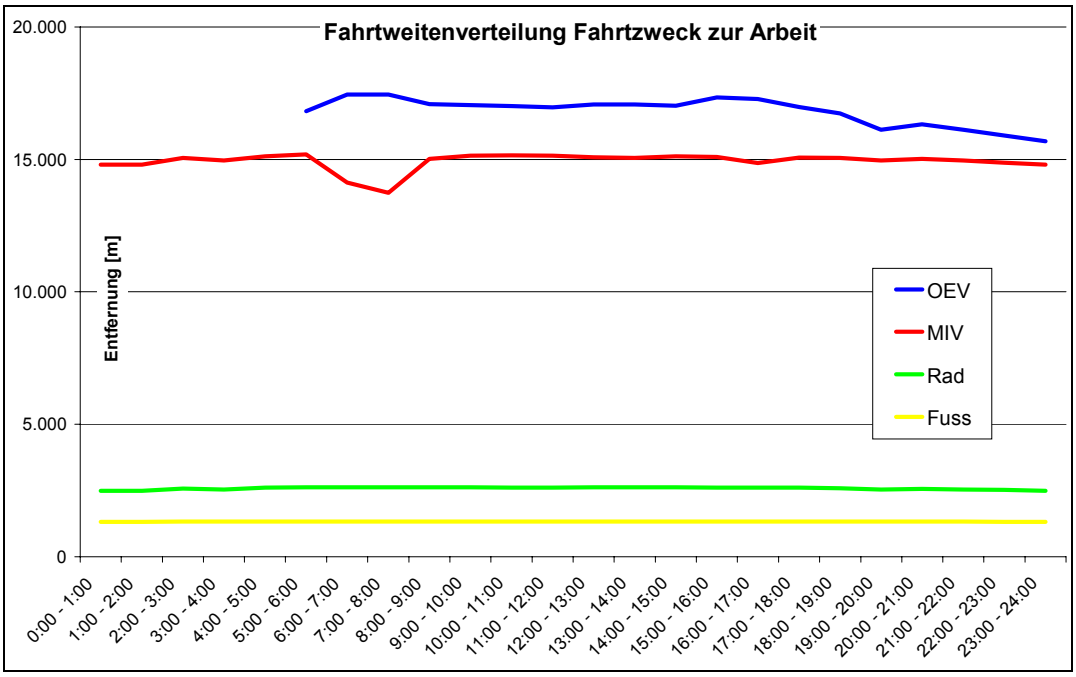


Abbildung 4-30: Durchschnittliche Fahrtweite im Tagesverlauf nach Verkehrsmitteln Fahrtzweck Arbeit, alle Fahrten in der Region, Bezugsszenario

In den heute verwendeten Verkehrsprognosemodellen, die die Verkehrsnachfrage des ganzen Tages anhand einer einzigen, zeitlich nicht differenzierten Widerstandsmatrix berechnen, stellt sich diese Problematik erst im Vergleich mit Maßnahmeszenarien. Verbesserte Verkehrsinfrastruktur führt dort nämlich bei unveränderten Modellierungsparametern zu größeren durchschnittlichen Fahrtweiten. Dies wird gerne als Berücksichtigung der verkehrsinduzierenden Wirkung neuer Infrastruktur bzw. der statistisch nachweisbar kontinuierlich steigenden Verkehrsleistung ausgegeben. Im hier vorgestellten Modell treten diese Schwankungen auch zwischen den einzelnen Zeitintervallen auf (s. Abbildung 4-30). Im ÖV werden die durchschnittlich größten Fahrtweiten in der Hauptverkehrszeit realisiert, wenn das ÖV-Angebot am besten ist. Im MIV tritt dagegen gerade zu dieser Zeit ein Einbruch der Fahrtweiten auf, weil aufgrund der schlechteren Verkehrsqualität in den Spitzenstunden bereits auf kürzeren Entfernungen die gleichen Zeitkosten entstehen.

Diese Schwankungen bei den modellierten, durchschnittlichen Fahrtweiten sind zunächst negativ zu bewerten, da sie nicht beabsichtigt waren. Es ist eher unwahrscheinlich, daß Verkehrsteilnehmer bewußt unterschiedlich weit entfernte Ziele in Abhängigkeit von der Tageszeit auswählen. Andererseits liegen keinerlei Untersuchungen vor, in denen die durchschnittlich realisierten Fahrtweiten im Zusammenhang mit der Tageszeit bzw. der Verkehrsqualität untersucht wurden. Es ist zu vermuten, daß entsprechende empirische Untersuchungen zumindest zufällige Schwankungen der Fahrtweiten aufzeigen würden. Im Tagesmittel treffen die modellierten Durchschnittswerte die Vorgaben gut und die Schwankungen sind nicht so groß, daß sie das Ergebnis entwerten würden.

Die Verkehrsqualität wurde für das Bezugsszenario räumlich differenziert untersucht. Eine ausführliche Beschreibung der Methodik findet sich im Abschnitt 4.7.4 zum Maßnahmeszenario. In Anhang 10 und Anhang 11 wird die Verkehrsqualität des MIV räumlich und zeitlich differenziert dargestellt, jeweils im Vergleich mit dem Maßnahmeszenario.

4.7.4 Szenario Road Pricing

Das Maßnahmenszenario Road Pricing dient primär der Überprüfung des Modells und nur zweitrangig der Bewertung der Maßnahme. Die Maßnahme wurde deshalb ohne vertiefte Berücksichtigung der tatsächlichen Umsetzbarkeit modelliert. Die im Zusammenhang mit der Einführung von Road Pricing Konzepten regelmäßig diskutierten Fragestellungen der technischen Realisierung, der Kontrolle und des Datenschutzes, der Wohlfahrtswirkungen, Umverteilung und sozialen Gerechtigkeit werden hier nicht behandelt. Die Gebührenhöhe wurde auch nicht aus externalisierten Kosten des Verkehrs oder Staukosten abgeleitet, sondern willkürlich festgesetzt. Mit Hilfe des Modells ist es möglich eine Vielzahl von Gebührenkonzepten theoretisch zu überprüfen, exemplarisch wird hier ein solches Konzept vorgeführt.

Die Region Stuttgart ist ein polyzentrischer Agglomerationsraum mit deutlichem Schwerpunkt auf der zentral gelegenen Landeshauptstadt Stuttgart. Zur Verbesserung der Verkehrssituation wurde bereits in der Vergangenheit wiederholt der Vorschlag eingebracht, die Einfahrt in die Stadt Stuttgart mit einer Zufahrtsgebühr zu belegen. Zwei geographische Eigenheiten sprechen für eine solche Lösung: Im Süden und Westen der Stadt verlaufen die Autobahnen A8 und A81 nahezu auf der Gemarkungsgrenze. Somit besteht eine leistungsfähige Umfahrungsmöglichkeit für den Durchgangsverkehr, der durch eine solche Gebührenerhebung verdrängt werden soll. Zum anderen ist durch die bewegte Topographie der Stadt Stuttgart die Anzahl der Zufahrten auf 42 Querschnitte an der Markungsgrenze beschränkt; dies würde die technische Implementierung erleichtern. Die Anzahl der Zufahrten könnte weiter auf 21 Querschnitte verringert werden, wenn anstatt der Markungsgrenze eine natürliche Zäsur, der sogenannte Kesselrand, die Umgrenzung der Kernstadt, als Gebührenkordon ausgebildet würde.

Im Maßnahmenfall Road Pricing wird der Gedanke des Einfahrtkordons aufgegriffen. Da die technische Implementierung im Modell ungleich einfacher als in der Realität ist, wurde die Markungsgrenze als räumliche Begrenzung gewählt. Ein wesentliches Ziel des Modells ist die Abbildung der zeitlichen Verlagerungen, deshalb wurde ein zeitlich gestaffelter Tarif entwickelt. Die Modellierung der Heimfahrten erfolgt weniger detailliert als die Modellierung der Hinfahrten: aus diesem Grund beschränkt sich der Tarif auf die Morgenspitze. Wesentlich betroffen von der Maßnahme sind also die Arbeitsfahrten. Hier ist ein deutlich unsymmetrisches Aufkommen in Richtung auf Stuttgart hin zu erkennen. Die Gebühren werden deshalb – wie z. B. in den norwegischen Städten Oslo und Trondheim realisiert – nur bei der Einfahrt in die Stadt erhoben. Das Gebührenkonzept sieht folgendermaßen aus:

- Gebühren werden auf allen Strecken erhoben, die die Gemarkungsgrenze der Stadt Stuttgart schneiden.
- Gebühren werden nur bei Einfahrt in die Stadt erhoben.
- Gebühren werden nur in der Morgenspitze erhoben.
- Gebühren werden für alle Pkw in gleicher Höhe erhoben.

- Die Gebührenhöhe beträgt:
  - von 6.00 – 7.00 Uhr: 2,50 DM
  - von 7.00 – 8.00 Uhr: 5,00 DM
  - von 8.00 – 9.00 Uhr: 2,50 DM

Da die Lkw-Nachfrage im hier vorgestellten Konzept nur extern zugespielt wird und weder zeitlich noch räumlich auf mögliche Straßenbenutzungsgebühren reagieren kann, wird keine Lkw-Gebühr erhoben. Entsprechende Experimente führten zu erheblichen Reaktionen bei der Routenwahl. Die umgeleiteten Lkw-Ströme beeinflußen sekundär die Routenwahl der Pkw, so daß die primäre Reaktion der Pkw-Fahrer auf das Gebührenkonzept kaum mehr interpretierbar war. Die Lkw-Nachfrage wird deshalb im Maßnahmenfall nicht beeinflußt und entspricht völlig dem Bezugsfall.

Um die Ursache – Wirkungszusammenhänge herausarbeiten zu können, wurden mit Ausnahmen des Gebührenkonzeptes alle Randbedingungen der Modellierung konstant gehalten. Dies betrifft die Strukturdaten (Einwohner, Arbeitsplätze, etc.), die Angebotsparameter (MIV-Netzdaten, ÖV-Angebot, etc.) und alle Bewertungsparameter. Neu eingeführt werden Bewertungsparameter für monetäre Kosten, da diese im Bezugsfall nicht berücksichtigt sind. Diese Bewertungsgrößen wurden aus dem Zwischenbericht zum Forschungsprojekt WUMS (Englmann, u. a., 1997)übernommen und betragen:

- für den Fahrtzweck Arbeit: 13,90 DM/Std. (dies entspricht 2,59 Sec/Pf).
- für alle anderen Fahrtzwecke: 8,90 DM/Std. (dies entspricht 4,04 Sec/Pf).

Diese differenzierten Bewertungswerte werden für den Parameter a_5 in Formel 4-12 verwendet (s. Tabelle 4-10). Im Umlegungsmodell kann bei der Routensuche nicht mehr zwischen unterschiedlichen Fahrtzwecken unterschieden werden. Da die Maßnahme sich auf die Morgenspitze beschränkt und überwiegend Arbeitsfahrten von ihr betroffen sind, wird der niedrigere Bewertungswert von 2,59 Sec/Pf für den Fahrtzweck Arbeit als Parameter γ in Formel 4-11 eingesetzt. Das kann dazu führen das die Sensitivität der anderen Fahrtzwecke bei der Routenwahl etwas unterschätzt wird.

Ausgehend von der Widerstandsmatrix des Bezugsszenarios wurde in drei Konvergenzschritten die Wirkung des Road Pricing Konzepts modelliert. Die Maßnahme ist räumlich und zeitlich eng beschränkt, die globalen Kenngrößen sollten sich deshalb nicht wesentlich ändern (s. die folgenden Tabellen).

[m]	Arbeit	Einkauf	Ausbildung	Hochschule	Freizeit
MIV	15.074 (+70)	7.788	14.000	21.644	12.207
ÖV	17.129 (+226)	5.476	11.716	18.066	15.606
Rad	2.598 (+9)	1.696	2.828	3.639	3.810
Fuß	1.329 (+2)	1.273	1.344	1.586	1.253

Tabelle 4-22: Durchschnittliche Fahrtweiten im Maßnahmeszenario nach Fahrtzwecken

	Arbeit	Einkauf	Ausbildung	Hochschule	Freizeit
MIV	64,4% (-1,0%)	44,8%	14,6%	71,4%	40,1%
ÖV	18,3% (+0,8)	6,2%	33,3%	10,1%	8,6%
Rad	6,1% (0,0%)	11,9%	36,5%	16,4%	19,7%
Fuß	11,1% (+0,1%	37,0%	15,6%	2,1%	31,6%
Gesamt	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Tabelle 4-23: Modal Split Anteile im Maßnahmeszenario nach Fahrtzwecken

	Arbeit	Einkauf	Ausbildung	Hochschule	Freizeit
MIV	890.314 (-14.766)	565.412	44.041	55.775	490.384
ÖV	252.752 (+10.960)	78.626	100.588	7.898	105.699
Rad	84.966 (+918)	150.484	110.495	12.847	240.798
Fuß	153.788 (+1.303)	466.621	47.193	1.609	387.091
Gesamt	1.381.819 (-1.586)	1.261.142	302.317	78.129	1.223.973
Anteil	33%	30%	7%	2%	29%

Tabelle 4-24: Verkehrsaufkommen im Maßnahmeszenario nach Fahrtzwecken

Auch wenn die durchschnittlichen Fahrtweiten im Maßnahmeszenario leicht von den Werten des Bezugsszenarios abweichen, lassen sich die Fahrtweitenverteilungen für die verschiedenen Fahrtzwecke visuell nicht unterscheiden (s. Anhang 5). Das Gesamtaufkommen der Fahrten wird durch die Maßnahme nicht berührt, leichte Verschiebungen treten – wie zu erwarten – beim Modal Split auf: Hier kann der ÖV gegenüber dem MIV leichte Gewinne verbuchen.

Erst bei der differenzierteren räumlichen und zeitlichen Analyse zeigen sich die Auswirkungen der Road Pricing Maßnahme (s. Anhang 6). Bereits im Bezugsszenario sind die Relationen in Richtung auf die Stadt Stuttgart überdurchschnittlich von Überlastungen im MIV gekennzeichnet. Die MIV-Nachfrage liegt deshalb während der Spitzenstunde unter den Werten der Wunschnachfragelinie, während die ÖV-Nachfrage wegen des besseren Angebotes leicht höhere Werte annimmt. Durch die Road Pricing Maßnahme werden jedoch die Fahrten nach Stuttgart in der Spitzenstunde für den MIV so unattraktiv, daß diese Nachfrage extrem gedämpft wird. Dies führt in geringem Maße zu zeitlichen Verlagerungen, in stärkerem Maße zu veränderter Ziel- und Verkehrsmittelwahl (s. auch Anhang 7). Die MIV-Nachfrage in der Gegenrichtung wird natürlich von der Maßnahme nicht betroffen. Tabelle 4-25 zeigt deutlich, wie stark die Nachfrage in die Stadt Stuttgart hinein durch die Straßenbenutzungsgebühr in der Morgenspitze gedrosselt wird. Im weiteren wird beispielhaft die Verkehrsnachfrage zwischen den Mittelbereichen Esslingen und Stuttgart Stadt-Zentrum untersucht.

	0:00 - 1:00	1:00 - 2:00	2:00 - 3:00	3:00 - 4:00	4:00 - 5:00	5:00 - 6:00	6:00 - 7:00	7:00 - 8:00	8:00 - 9:00	9:00 - 10:00	10:00 - 11:00	11:00 - 12:00
alle Fahrten	0,1%	0,1%	0,4%	0,2%	1,2%	8,7%	21,8%	27,2%	10,4%	3,9%	2,4%	1,8%
nach Stuttgart	0,2%	0,2%	0,7%	0,4%	2,2%	14,7%	16,0%	7,1%	8,1%	6,7%	4,2%	3,0%
von Stuttgart	0,1%	0,1%	0,3%	0,2%	1,1%	7,6%	23,1%	30,5%	11,3%	3,4%	2,1%	1,5%

Tabelle 4-25a: Zeitlicher Verlauf der MIV-Verkehrsnachfrage nach Richtung: alle Fahrten in der Region, aus den Landkreisen in die LH Stuttgart, aus der LH Stuttgart in die Landkreise, Maßnahmeszenario

	12:00 - 13:00	13:00 – 14:00	14:00 - 15:00	15:00 - 16:00	16:00 - 17:00	17:00 - 18:00	18:00 - 19:00	19:00 - 20:00	20:00 - 21:00	21:00 - 22:00	22:00 - 23:00	23:00 - 24:00
alle Fahrten	5,7%	7,2%	2,7%	1,9%	1,1%	1,7%	0,5%	0,2%	0,3%	0,2%	0,0%	0,1%
nach Stuttgart	9,6%	11,7%	4,6%	3,3%	1,9%	2,9%	0,8%	0,4%	0,6%	0,4%	0,0%	0,2%
von Stuttgart	4,8%	6,2%	2,3%	1,7%	0,9%	1,4%	0,4%	0,2%	0,3%	0,2%	0,0%	0,1%

Tabelle 4-25b: Zeitlicher Verlauf der MIV-Verkehrsnachfrage nach Richtung: alle Fahrten in der Region, aus den Landkreisen in die LH Stuttgart, aus der LH Stuttgart in die Landkreise, Maßnahmeszenario

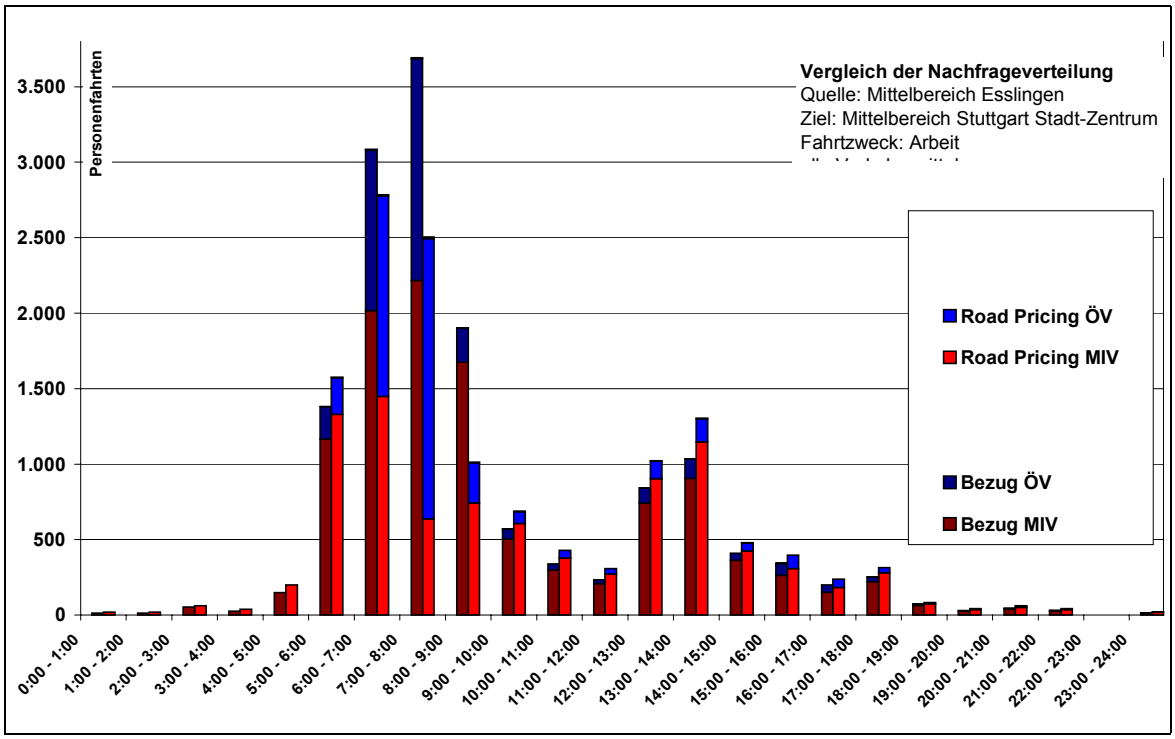


Abbildung 4-31: Personenverkehrsnachfrage im Bezugs- und Maßnahmefall für den Fahrtzweck Arbeit, MIV und ÖV
Quelle: Mittelbereich Esslingen, Ziel: Mittelbereich Stuttgart Stadt-Zentrum

	Bezugsfall					Road Pricing Maßnahme				
	MIV	**OEV**	**RAD**	**FUSS**	**Σ**	**MIV**	**OEV**	**RAD**	**FUSS**	**Σ**
0:00 - 1:00	13	0	0	0	**13**	21	0	0	0	**21**
1:00 - 2:00	13	0	0	0	**13**	21	0	0	0	**21**
2:00 - 3:00	54	0	0	0	**54**	62	0	0	0	**62**
3:00 - 4:00	27	0	0	0	**27**	39	0	0	0	**39**
4:00 - 5:00	148	0	0	0	**148**	200	0	0	0	**200**
5:00 - 6:00	1.166	214	2	0	**1.381**	1.329	244	2	0	**1.575**
6:00 - 7:00	2.018	1.063	5	0	**3.086**	1.449	1.328	7	0	**2.784**
7:00 - 8:00	2.217	1.468	7	0	**3.693**	637	1.856	10	0	**2.504**
8:00 - 9:00	1.674	227	3	0	**1.904**	744	266	3	0	**1.013**
9:00 - 10:00	503	66	1	0	**570**	607	79	1	0	**687**
10:00 - 11:00	298	39	0	0	**338**	379	49	1	0	**429**
11:00 - 12:00	208	27	0	0	**235**	272	35	0	0	**307**
12:00 - 13:00	744	98	1	0	**843**	904	117	1	0	**1.022**
13:00 - 14:00	906	129	1	0	**1.036**	1.149	153	2	0	**1.303**
14:00 - 15:00	363	47	1	0	**411**	423	55	1	0	**479**
15:00 - 16:00	264	78	0	0	**343**	308	89	0	0	**397**
16:00 - 17:00	150	49	0	0	**199**	182	55	0	0	**237**
17:00 - 18:00	223	29	0	0	**252**	279	36	0	0	**315**
18:00 - 19:00	65	8	0	0	**74**	75	10	0	0	**84**
19:00 - 20:00	26	5	0	0	**30**	35	6	0	0	**42**
20:00 - 21:00	38	7	0	0	**45**	53	10	0	0	**63**
21:00 - 22:00	27	5	0	0	**32**	37	6	0	0	**43**
22:00 - 23:00	0	0	0	0	**0**	0	0	0	0	**0**
23:00 - 24:00	13	2	0	0	**16**	19	3	0	0	**22**
Gesamt	**11.160**	**3.560**	**23**	**0**	**14.743**	**9.223**	**4.398**	**30**	**0**	**13.651**

Tabelle 4-26: Personenverkehrsnachfrage im Bezugs- und Maßnahmefall für den Fahrtzweck Arbeit, alle Verkehrsmittel
Quelle: Mittelbereich Esslingen, Ziel: Mittelbereich Stuttgart Stadt-Zentrum

Tabelle 4-26 und Abbildung 4-31 zeigen die Personenverkehrsnachfrage im Bezugs- und Maßnahmefall für den Fahrtzweck Arbeit. Die Auswertung ist auf die Relationen beschränkt, deren Startbezirk im Mittelbereich Esslingen und Zielbezirk im Mittelbereich Stuttgart Stadt-Zentrum liegen. Tabelle 4-27 zeigt detailliert die Nachfrageänderungen. Das Modell bildet simultan die geänderte Zielwahl, Zeitwahl und Verkehrsmittelwahl ab. Durch die Road Pricing-Maßnahme in der Morgenspitze wird die MIV-Nachfrage in den entsprechenden Zeitintervallen um bis zu 70% reduziert. Nur ein Teil dieser Nachfrage wird vom ÖV absorbiert, so daß die Gesamtnachfrage in den Zeitintervallen der Morgenspitze abnimmt. Ein weiterer Teil der unterdrückten MIV-Nachfrage wird auf die anderen, gebührenfreien Zeitintervalle verlagert und dort etwa proportional vom ÖV und MIV aufgenommen. Nicht alle verdrängten Fahrten werden zeitlich oder modal verlagert: ein Teil der Nachfrage sucht sich auch neue Ziele (nicht dargestellt), so daß die Tagesnachfrage zwischen dem Mittelbereich Esslingen und dem Mittelbereich Stuttgart Stadt-Zentrum leicht abnimmt (-7%). Rad- und Fußgängerverkehr spielen aufgrund der großen Entfernung keine Rolle.

	MIV	OEV	RAD	FUSS	Gesamt
0:00 - 1:00	7 (53,6%)	0 (0,0%)	0 (600,0%	0 (0,0%)	**7 (53,6%)**
1:00 - 2:00	7 (53,6%)	0 (0,0%)	0 (600,0%	0 (0,0%)	**7 (53,6%)**
2:00 - 3:00	8 (15,1%)	0 (0,0%)	0 (27,5%)	0 (0,0%)	**8 (15,2%)**
3:00 - 4:00	12 (45,9%)	0 (0,0%)	0 (163,6%	0 (0,0%)	**12 (45,9%)**
4:00 - 5:00	52 (35,3%)	0 (0,0%)	0 (50,9%)	0 (0,0%)	**52 (35,3%)**
5:00 - 6:00	163 (14,0%)	30 (14,1%)	0 (22,1%)	0 (50,0%)	**194 (14,0%)**
6:00 - 7:00	-569 (-28,2%)	265 (25,0%)	2 (34,7%)	0 (38,1%)	**-302 (-9,8%)**
7:00 - 8:00	-1.580 (-71%)	388 (26,5%)	3 (36,1%)	0 (51,8%)	**-1.189 (-32%)**
8:00 - 9:00	-931 (-55,6%)	39 (17,3%)	1 (25,0%)	0 (36,4%)	**-891 (-46,8%)**
9:00 - 10:00	104 (20,7%)	13 (20,4%)	0 (30,4%)	0 (33,3%)	**118 (20,6%)**
10:00 - 11:00	81 (27,1%)	10 (26,7%)	0 (36,3%)	0 (0,0%)	**91 (27,0%)**
11:00 - 12:00	64 (30,7%)	8 (29,9%)	0 (44,1%)	0 (200,0%	**72 (30,6%)**
12:00 - 13:00	160 (21,5%)	19 (19,6%)	0 (26,8%)	0 (50,0%)	**179 (21,3%)**
13:00 - 14:00	242 (26,7%)	24 (18,8%)	0 (27,5%)	0 (40,0%)	**267 (25,8%)**
14:00 - 15:00	61 (16,7%)	8 (16,3%)	0 (26,0%)	0 (100,0%	**68 (16,6%)**
15:00 - 16:00	43 (16,4%)	11 (14,3%)	0 (29,0%)	0 (50,0%)	**55 (15,9%)**
16:00 - 17:00	32 (21,5%)	6 (11,9%)	0 (26,6%)	0 (0,0%)	**38 (19,2%)**
17:00 - 18:00	56 (25,3%)	7 (23,8%)	0 (34,8%)	0 (200,0%	**63 (25,2%)**
18:00 - 19:00	10 (14,8%)	1 (14,1%)	0 (20,0%)	0 (0,0%)	**11 (14,8%)**
19:00 - 20:00	10 (38,0%)	2 (36,6%)	0 (136,4%	0 (0,0%)	**11 (37,8%)**
20:00 - 21:00	15 (38,1%)	3 (37,0%)	0 (114,8%	0 (0,0%)	**17 (38,0%)**
21:00 - 22:00	10 (37,8%)	2 (36,6%)	0 (136,4%	0 (0,0%)	**12 (37,6%)**
22:00 - 23:00	0 (0,0%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	0 (0,0%)	**0 (0,0%)**
23:00 - 24:00	5 (38,3%)	1 (38,3%)	0 (500,0%	0 (0,0%)	**6 (38,3%)**
Gesamt	**-1.938 (-17%)**	**838 (23,5%)**	**7 (32,3%)**	**0 (46,0%)**	**-1.092 (-7,4%)**

Tabelle 4-27: Änderung der Personenverkehrsnachfrage im Maßnahmefall Road Pricing gegenüber dem Bezugsfall für den Fahrtzweck Arbeit, alle Verkehrsmittel Quelle: Mittelbereich Esslingen, Ziel: Mittelbereich Stuttgart Stadt-Zentrum

An den Querschnitten, auf denen die Gebühren erhoben werden, läßt sich die modellmäßige Umsetzung der Road Pricing Maßnahme am besten darstellen. Beispielhaft zeigt Abbildung 4-32 den Tagesgang der Pkw-Nachfrage am Querschnitt B 295 (s. a. Anhang 8). Im Bereich der Morgenspitze geht die MIV-Verkehrsnachfrage stadteinwärts am stärksten zurück. Da auch Durchgangsverkehr der Stadt Stuttgart betroffen ist, reduziert sich das Aufkommen auch an den meisten Ausfahrquerschnitten. Und – über die Koppelung mit den Heimfahrten – geht auch das Verkehrsaufkommen am Nachmittag an vielen Querschnitten leicht zurück. In den Diagrammen ist nur der Pkw-Verkehr dargestellt, die Lkw-Nachfrage ist von den Road Pricing Gebühren nicht betroffen und im Bezugs- und Maßnahmeszenario identisch.

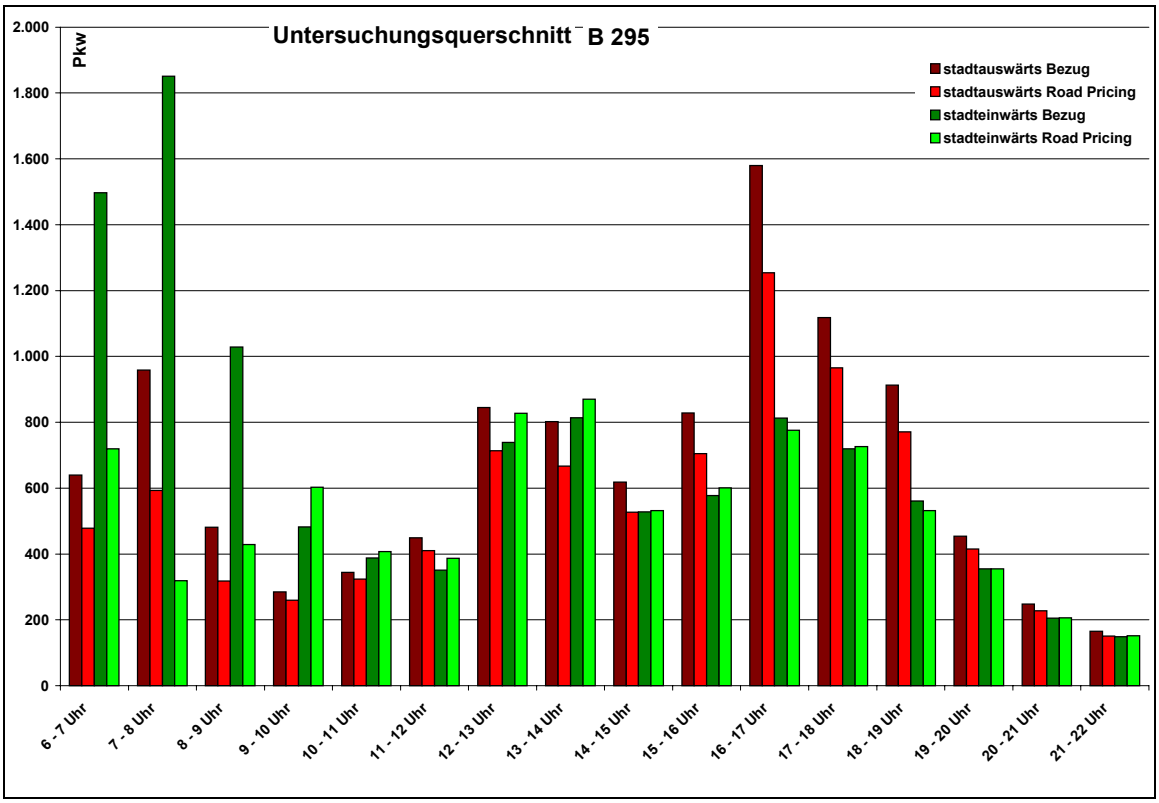


Abbildung 4-32: Vergleich der Pkw-Tagesganglinien am Kordonquerschnitt B 295.

Die Straßenbenutzungsgebühr führt jedoch zu überraschenden Auswirkungen auf die Fahrleistung und die Verkehrsqualität[21] in den umliegenden Landkreisen. Auf vielen Quelle-Ziel-Relationen werden erhebliche Umwege in Kauf genommen, um die Gebühren zu vermeiden. Dadurch steigen die Fahrleistungen in allen Landkreisen außerhalb Stuttgarts während der Morgenspitze an (s. Anhang 9). Die genaue Analyse zeigt, daß vor allem die tangentialen Straßenzügen außerhalb der Landeshauptstadt betroffen sind. Die Stuttgart – und den Gebührenkordon – tangierenden Autobahnen sind bereits im Bezugsfall hoch belastet, deshalb führt eine geringe Zunahme der Nachfrage zu einem erstaunlich deutlichen Einbruch der Verkehrsqualität. Da die Autobahnen für sehr viele Relationen wichtig sind geht die Verkehrsqualität in der Morgenspitze durch die Road Pricing Maßnahme nahezu überall zurück. Anhang 10 zeigt dies sehr deutlich. In Abbildung 4-33 ist der Verlauf der Verkehrsqualität exemplarisch für die Mittelbereichsverflechtung Esslingen nach Stuttgart Stadt-Zentrum und retour dargestellt. In der Morgenspitze stadteinwärts wird die Verkehrsqualität auf dieser Relation negativ beeinflußt, während sich der Verlauf der Kurve für den übrigen Tag nicht wesentlich vom Bezugsfall unterscheidet. Das Bild ist für alle Mittelbereichsverflechtungen mit Ziel Stuttgart sehr ähnlich; die Morgenspitze stadteinwärts wird durch die verdrängten Fahrten des Durchgangsverkehrs negativ beeinflußt. Lediglich die Verkehrsqualität innerhalb Stuttgarts wird durch die Straßenbenutzungsgebühr positiv beeinflußt. In Anhang 11 ist die Verkehrsqualität in der Morgenspitze für alle Mittelbereichsverflechtungen der Region Stuttgart tabellarisch aufgeführt.

[21] Um die Verkehrsqualität bzw. Erreichbarkeit darstellen zu können, muß ein quantifizierbarer und aggregierbarer Indikator ausgewählt werden. Eine gute Verkehrsqualität drückt sich in einer hohen durchschnittlichen Geschwindigkeit auf einer Relation aus. Die von der Streckenbelastungen beeinflußte Geschwindigkeit auf den einzelnen Relationen der Nachfragematrix wurde deshalb als Indikator für die Verkehrsqualität bzw. Erreichbarkeit ausgewählt.

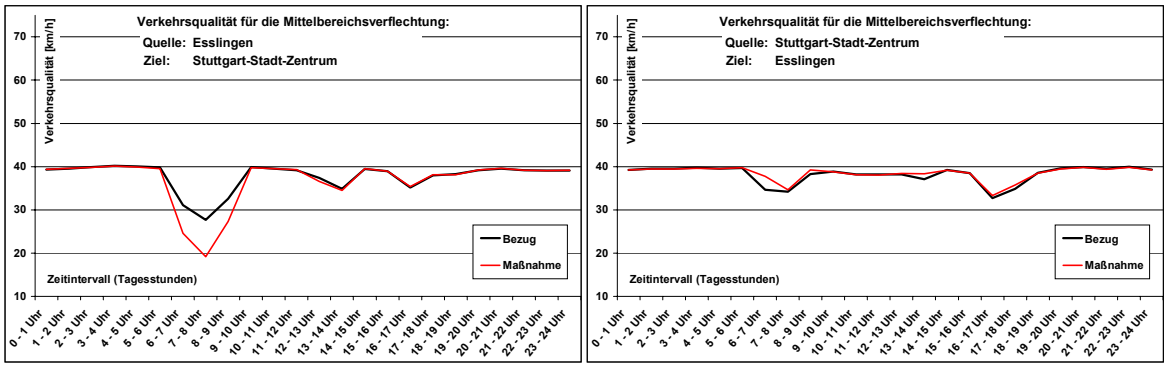


Abbildung 4-33: Verkehrsqualität zwischen den Mittelbereichen Esslingen und Stuttgart-Stadt-Zentrum

Zur Darstellung der Verkehrsqualität für verschiedene räumliche Ebenen (Mittelbereichsebene, Landkreisebene) und Zeitintervalle (Stunde, Tag) müssen die Indikatoren in geeigneter Art und Weise aggregiert werden. Dies geschieht durch Multiplikation der mittleren Geschwindigkeiten mit der Nachfrage auf der jeweiligen Relation, so daß stark nachgefragte Relationen stärker gewichtet in die Berechnung des aggregierten Indikators eingehen als Relationen mit schwächerer Nachfrage.

Relationen mit kurzer Fahrtstrecke haben aufgrund ihres relativ höheren Anteils an statischen Zeitverlusten (Zu- und Abgangszeit) und der durchschnittlich geringeren Autobahnanteile ein niedrigeres Niveau der Verkehrsqualität als Relationen mit langer Fahrtstrecke. Ein Rückgang der durchschnittlichen Fahrtweite kann durch die Wichtung mit der Nachfrage dazu führen, daß die Verkehrsqualität rechnerisch abnimmt, obwohl die Belastung auf allen Strecken gleich bleibt. Anhang 4 zeigt, daß die durchschnittliche Fahrtweite im MIV in der Morgenspitze tatsächlich zurückgeht. Dies ist ein Effekt des gewählten Modellierungsansatzes, da letztlich nicht die Entfernungsverteilungen, sondern die Verteilungen des integrierten Widerstandes konstant gehalten werden. Der Rückgang der durchschnittlichen Fahrtweite gegenüber dem Bezugsszenario erscheint jedoch nicht so stark, daß dadurch die Verkehrsqualität in der beschriebenen Weise rechnerisch beeinträchtigt würde. Die Qualität zwischen nicht benachbarten Mittelbereichen wird von diesem Effekt ohnehin kaum beeinflußt. Die nachweisbare Zunahme der Verkehrsnachfrage auf den Tangentialstrecken an der Peripherie Stuttgarts während der Morgenspitze führt tatsächlich zu einer Verschlechterung der Verkehrsqualität.

Die Zusammenfassung der Verkehrsqualität für Relationsbündel und ganze Räume führt zum Teil zu paradoxen Ergebnissen: Obwohl die MIV-Fahrleistungen innerhalb Stuttgarts während der Gebührenphase im Maßnahmefall zurückgehen (s. Anhang 9), wird auf einzelnen Mittelbereichsverflechtungen (s. Anhang 11) und für einzelne Startbezirke (s. Karte 10) innerhalb der Stadt für den Maßnahmefall eine schlechtere Verkehrsqualität ausgewiesen als im Bezugsfall. Mögliche Erklärungen sind Veränderungen der durchschnittlichen Entfernungen innerhalb der Relationsbündel (kürzere Strecken haben niedrigere durchschnittliche Geschwindigkeiten), ein induzierter Anstieg der MIV-Nachfrage innerhalb der Stadt aufgrund des reduzierten Durchgangsverkehrs und die immer noch relativ hohe Nachfrage zu den umliegenden Mittelzentren, die von den räumlich verlagerten Fahrten stark betroffen ist. Anhang 10, Abbildungen 21 bis 25 zeigen zumindest für die Verflechtungen der fünf 'virtuellen' Mittelzentren innerhalb Stuttgarts mit dem Zentrum, daß die Verkehrsqualität während der Gebührenphase leicht verbessert wird.

Karte 10 zeigt den Versuch, die Verkehrsqualität räumlich für die Quellbezirke zu aggregieren. Der Qualitätsindikator (Reisegeschwindigkeit) jeder Relation wurde dazu sowohl im Bezugs- als auch im Maßnahmefall mit der jeweiligen Nachfrage gewichtet.

4.8 Beurteilung

Die Bewertung der beschriebenen Beispielrechnungen gliedert sich in zwei Bereiche: die quantitativen Ergebnisse der Nachfragerechnung und Maßnahmemodellierung, sowie die grundsätzliche Eignung des gewählten Modellierungskonzeptes.

Zu den quantitativen Ergebnissen muß gesagt werden, daß sie in höchstem Maße von der Qualität der verfügbaren Eingangsdaten abhängig sind. Wie schon eingangs dieses Kapitels erwähnt, konnten Daten aus der Erstellung des Regionalverkehrsplans für die Region Stuttgart und aus dem Forschungsprojekt WUMS herangezogen werden. Die Qualität dieser Daten war in weiten Bereichen nicht in der für diese Untersuchung erforderlichem Maße vorhanden. Die Detaillierung der Eingangsdaten ging oftmals nicht weit genug. Auch die Kontrollgrößen (Fahrtweiten, Modal Split, Querschnittsbelastungen, Nachfragezeiten) standen nicht in dem Detaillierungsgrad zur Verfügung, wie er für die umfassende Kontrolle der Modellergebnisse erforderlich gewesen wäre. Im Rahmen der beispielhaften Implementierung wurde zudem keine Prognoserechnung durchgeführt, die die Fortschreibung von Verhaltens- und Strukturgrößen erfordert hätte.

Trotz dieser Schwierigkeiten kann die Aussage getroffen werden, daß wichtige Rahmengrößen des Analyse- bzw. Bezugsszenarios vom hier vorgestellten Modellierungsansatz besser getroffen werden, als vom WUMS-Modell. Dies betrifft vor allem die Fahrtweitenverteilungen, durchschnittliche Fahrtweiten und die Pkw-Verkehrsmengen an den Kordons Kesselrand und Markungsgrenze der Stadt Stuttgart. Die Modal Split Anteile der einzelnen Verkehrsträger werden global entsprechend der Vorgaben eingehalten. Kleinräumig treten auf Bezirksebene erhebliche Schwankungen im Modal Split auf, diese sind jedoch zum einen nicht unwahrscheinlich, zum anderen fehlen kleinräumige Vergleichsgrößen zur Kontrolle. Die berechnete Verkehrsnachfrage ist im Rahmen der vorliegenden Eingangsgrößen realistisch, bildet jedoch mit Sicherheit die Wirklichkeit noch nicht genau genug ab, um z. B. regionalplanerische Entscheidungen zu fundamentieren. Dazu wären weitere umfassende Erhebungen vor allem zu kleinräumigen Verhaltensparametern und Kontrollgrößen der Modellergebnisse erforderlich.

Die Reaktionen im modellierten Maßnahmeszenario sind realistisch, auch wenn der resultierende Rückgang der Verkehrsqualität zunächst überrascht. Das Modell bildet sehr plausibel die gleichzeitige Verlagerung der Nachfrage in räumlicher, zeitlicher und modaler Hinsicht ab. Ob die Größenordnung der jeweiligen Verlagerungen realistisch ist, bedarf weiterer Untersuchungen. Das Modell läßt sich entsprechend den gewünschten Vorgaben kalibrieren und zeigt mit Hilfe der eingebauten Rückkoppelungen die Auswirkungen von Maßnahmen auf das Gesamtsystem der Verkehrsnachfrage.

Dies leitet zur kritischen Beurteilung des vorgestellten methodischen Konzeptes über: Der Ansatz generiert aus umfangreichen Eingangsdaten (Randbedingungen) die mehrfach differenzierte Verkehrsnachfrage in einem Untersuchungsgebiet. Dabei werden die verschiedenen Dimensionen (Zielwahl, Zeitwahl, Verkehrsmittelwahl) simultan behandelt und die gegenseitigen Einflüsse abgebildet. Lineare Unabhängigkeit wird nicht unterstellt. Das Konzept kann menschliches Verhalten nicht synthetisch nachbilden und ist deshalb auf differenzierte Infor-

mationen zum Verhalten angewiesen. Diese Informationen liegen aus empirischen Erhebungen häufig eindimensional vor (Zielwahl oder Zeitwahl oder Verkehrsmittelwahl). Im gewählten Ansatz können die verschiedenen Dimensionen überlagert werden. Die eindimensionalen Vorgaben werden über die Randsummen (Zielwerte) kontrolliert.

Auch für die Abbildung von Maßnahmen sind umfangreiche, möglichst empirisch abgesicherte Verhaltensparameter erforderlich. Die Reaktion auf die im Beispiel neu eingeführte Widerstandskomponente (monetäre Kosten) kann nicht aus den Verhaltensparametern des Analyseszenarios abgeleitet werden, sondern erfordert externe Vorgaben. Das Modell zeigt dann die Auswirkungen für den gesamten Untersuchungsraum auf.

Die mehrfach differenzierten Nachfragedaten führen zu sehr großen Datenmengen für ein Untersuchungsgebiet der vorgestellten Größe. Um das Nutzergleichgewicht von belastungsabhängigem Verkehrsangebot und resultierender Nachfrage zu erzielen (Konvergenz) sind mehrere iterative Rechenläufe für jedes Szenario erforderlich. Da das MIV-Umlegungsmodul nicht in das Konzept der simultanen Nachfragemodellierung integriert ist, führt dieses iterative Vorgehen zu hohem Rechenzeit- und Bearbeitungsaufwand. Die Kalibrierung des Modells mit Hilfe der angestrebten Randsummen (Zielwerte) läßt sich nur in zeitraubendem trial-and-error Verfahren durchführen. Die Handhabung des Softwareprototypen ist noch deutlich verbesserungsfähig. Für die zielorientierte Anwendung mit weitergehenden Kontrolldaten ist das Konzept in der vorliegenden Form noch zu unhandlich.

Andererseits ermöglichen die differenzierten Ergebnisdaten die detaillierte Analyse unterschiedlichster Effekte. Im Modellkonzept werden die nicht motorisierten Verkehrsmittel Fußgänger und Fahrrad systematisch genauso behandelt wie die motorisierten Verkehrsmittel ÖV und MIV. Die Modellierung von Maßnahmen zur Verlagerung des motorisierten Verkehrs auf den NMIV kann deshalb realistischer durchgeführt werden als in herkömmlichen Modellen mit bimodalem Modal Split. Ähnliches gilt für die Behandlung des Zellbinnenverkehrs, der im wesentlichen mit den gleichen Methoden modelliert wird, wie die Nachfrage zwischen Verkehrszellen. Die gesamte Mobilität der Einwohner eines Untersuchungsraumes wird berücksichtigt, deshalb können auch strukturelle Veränderungen der Nachfrage hin zu nahe liegenden bzw. fußläufig erreichbaren Zielen berücksichtigt werden. Lediglich die belastungsabhängige Verkehrsqualität des MIV kann für den Zellbinnenverkehr nicht wiedergegeben werden. Das Modell bildet unterschiedliches Verkehrsverhalten in Teilräumen realistisch ab. So erhalten NMIV und ÖV in Ballungszentren höhere Anteile als beispielsweise im ländlichen Raum.

Der wesentliche methodische Fortschritt besteht jedoch in der vollständigen Integration der tageszeitlichen Nachfrageverteilung in das Modellkonzept. Zyklisches Nachfrageverhalten kann mit allen Auswirkungen z. B. auf die Verkehrsqualität der Straßen abgebildet werden. Die Auswirkungen tageszeitlich variierender Angebotsparameter spiegeln sich unmittelbar in der Verkehrsnachfrage und im Modal Split wieder. Unsymmetrische Nachfragespitzen auf Radialen des MIV und ÖV werden modellendogen wiedergegeben. Für alle Strecken des MIV-Netzmodells liegen endogen berechnete, gerichtete Tagesganglinien als Grundlage für detaillierte Emissions- und Wirkungsanalysen vor.

Der Modellansatz läßt sich in weiten Grenzen kalibrieren und einstellen, wenn die erforderlichen differenzierten Zielwerte vorliegen. Sobald die erforderlichen Widerstands- und Bewertungsfunktionen parametrisiert sind, ist der Ansatz geeignet, Reaktionen auf unterschiedliche Maßnahmen wiederzugeben. Maßnahmebedingte Verlagerungen zwischen Verkehrsmitteln,

oder Zeitintervallen sowie die veränderte Zielwahl und ihre Überlagerungen werden unmittelbar berechnet.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß es gelungen ist, das im Kapitel 3.4 formulierte Konzept in einem realen Untersuchungsgebiet anzuwenden. Die dazu entwickelte Software kann als wissenschaftlicher Prototyp mit Umsicht verwendet werden. Sowohl das Modellierungskonzept als auch die Software sind noch ausbaufähig. Die konzeptionellen Ansätze und die Datenstruktur sollten die erforderlichen Erweiterungen leicht zulassen.

5 Ausblick

In den vorstehenden Kapiteln wurde die grundsätzliche Verwendbarkeit des gewählten Modellierungskonzeptes aufgezeigt. Selbstverständlich traten jedoch im Zuge der Bearbeitung Fragestellungen zu Tage, die den Umfang dieser Arbeit überstiegen und nicht zufriedenstellend beantwortet werden konnten. Teilweise mußten unbefriedigende Vereinfachungen in Kauf genommen werden, um das Konzept überhaupt zu einem Abschluß zu bringen. In diesem Kapitel sollen die wichtigsten Punkte angesprochen werden, die bei der künftigen Weiterführung des Modellkonzeptes vorrangig bearbeitet werden sollten.

Nach dem aktuellen Erkenntnisstand lassen sich die offenen Fragestellungen in drei Arbeitsfelder gliedern: methodische Fragestellungen innerhalb des simultanen Wahlmodells, Datenverfügbarkeit für das simultane Wahlmodell und Weiterentwicklung der korrespondierenden Modellteile für das Gesamtkonzept.

Die gravierendste methodische Schwäche des Modells ist der fehlende Wegekettenkontext der modellierten Verkehrsnachfrage. Entscheidungen der Ziel-, Verkehrsmittel-, und Zeitwahl werden in der Wirklichkeit nicht allein auf Basis der Randbedingungen des ersten Weges in einer Wegekette gefällt. Insofern greift der gewählte Ansatz, die Nachfrage für die betrachteten Fahrtzwecke sukzessive und unabhängig abzuarbeiten, zu kurz. Die Modellierung der Heimfahrten durch Spiegelung der originär modellierten Nachfrage ist eine wesentliche Vereinfachung. Die Festlegung bei der Verkehrsmittel- und vor allem Zielwahl erscheint zwar noch vertretbar, es geht jedoch auch die dynamische Modellierung der Zeitwahl für die Heimfahrten verloren.

Um diesen Mangel zu beheben, müßten statt der betrachteten Fahrtzwecke (in diesem Fall: 5) die betrachteten Wegeketten (in diesem Fall: 28) jeweils einzeln abgearbeitet werden. Die Wunschzeit der Nachfrage, die im beschriebenen Ansatz die Form eines eindimensionalen Arrays annimmt, müßte als zweidimensionales Feld für die gewünschten Hin- und Rückfahrtzeiten in Kombination mit einer Wunschverteilung der Aufenthaltsdauer verknüpft werden. Im Modell müßte also der verkehrliche Widerstand für die Hin- und Rückfahrt, die zugehörigen Wunschzeitganglinien und die resultierende Aufenthaltsdauer gemeinsam bewertet und optimiert werden. Die Komplexität wird dadurch schon für Elementarketten mit zwei Wegen erheblich erhöht, für Ketten mit drei oder mehr Wegen kommt jeweils eine weitere Dimension hinzu.

Diese Überlegungen konnten nicht weiter verfolgt werden, weil der Rechen- und Speicheraufwand erheblich angestiegen wäre, vor allem aber das vorliegende empirische Material unzureichend war, um für alle berücksichtigten Wegeketten Aussagen zu den Wunschzeitverteilungen und Aufenthaltsdauern zu treffen.

Der zweite methodische Mangel ist die fehlende Rückkopplung für die Verkehrserzeugung. Der Quellverkehr jeder Verkehrszelle wird einmal generiert und im weiteren Verlauf der Modellierung nicht mehr beeinflußt. Um induzierten oder unterdrückten Verkehr abbilden zu können, wäre es erforderlich, in geeigneter Weise die Verkehrserzeugung zu beeinflußen. Dieser Vorwurf trifft in ähnlicher Weise auch die Modellierung des Zielverkehrs, da die Zielpotentiale ebenfalls zu Beginn eines Modellaufs festgeschrieben und nicht mehr verändert werden. Quell- und Zielsummen werden in der Konvergenzrechnung als harte Randsummenbedingungen behandelt. In gängigen Modellansätzen ist es jedoch üblich, zumindest für manche Fahrt-

zwecke (z. B. Einkaufen, Freizeit) weiche Randsummen, bzw. Ober- und Untergrenzen des Zielverkehrs für einzelne Bezirke festzulegen. Die Verkehrsnachfrage zu diesen Bezirken könnte dann im Modell auf die Lagegunst und das Verkehrsangebot des Zielbezirks reagieren.

Zumindest die weichen Randbedingungen für die Zielbezirke wären verhältnismäßig leicht zu implementieren und würden die Ausgleichsrechnung der Nachfragematrix sogar wesentlich vereinfachen. Die Schwierigkeit bestünde in der Kontrolle der Ergebnisse, d. h. ob die Nachfrageverteilung des Modells noch realistische Ergebnisse in allen Bereichen der Matrix liefert, wenn die Randsummen des Zielverkehrs nicht mehr fixiert sind. Dies würde vor allem die geographischen Randbereiche des Untersuchungsraumes betreffen. Für den Fahrtzweck Arbeit, an dem die meisten Auswertungen demonstriert wurden, sind weiche Randsummen nicht üblich.

Der dritte Punkt der methodischen Verbesserung betrifft die Berücksichtigung weiterer Fahrtzwecke und Verkehrsmittel. Selbstverständlich besteht hier eine große Abhängigkeit von den verfügbaren Daten zum Verkehrsverhalten der Bevölkerung eines Untersuchungsraumes. Bei der beschriebenen Anwendung wurde der wichtige Bereich der dienstlichen Erledigungen und des Personenwirtschaftsverkehrs gar nicht berücksichtigt. Neben weiteren Fahrtzwecken sollten auch weitere Verkehrssysteme (z. B. der gebrochene Verkehr aus MIV und ÖV) berücksichtigt werden. Dies führt direkt zum nächsten Komplex, der Datenverfügbarkeit:

Herkömmliche Verkehrsmodelle arbeiten die einzelnen Modellschritte (hier: Dimensionen wie Raum, Zeit, Verkehrsmittel, Fahrtzweck) im wesentlichen sukzessive ab. Das heißt, das für jeden Arbeitsschritt eindimensional differenzierte Daten benötigt werden, die bezüglich der anderen Dimensionen aggregiert sind. Solche Daten eignen sich im hier vorgestellten Ansatz nur zur Kontrolle der globalen Ergebnisse. Zur Bestimmung der mehrfach differenzierten Verhaltens- und Bewertungsparameter werden entsprechend fein aufgelöste Informationen zum Verkehrsverhalten im kausalen Zusammenhang mit differenzierten Informationen zum jeweils bestehenden Verkehrsangebot und zur Verkehrsqualität benötigt. In der empirischen Verkehrsforschung führt dies zu zwei großen Herausforderungen: Zum einen muß die Stichprobengröße einer Befragung deutlich größer gewählt werden als bisher, um auch Teilsegmente der Stichprobe noch signifikant differenzieren zu können. Zum anderen jedoch muß auch das Befragungsinstrumentarium erheblich umfangreicher werden, um z. B. den zeitlichen Kontext des Verkehrsverhaltens deutlich zu erfassen. Um die Ganglinien der Wunschnachfragezeiten aufzustellen, sind z. B. Informationen zum Zeitwahlverhalten für alle Aktivitäten, am besten im Kontext der jeweiligen Wegekette, notwendig. Die hohe Datenanforderung des Modells, die letztlich nur durch umfangreiche und dadurch kostspielige Befragungen befriedigt werden kann, dürfte die größte Herausforderung für seine künftige Anwendung darstellen. Die Problematik der Datenverfügbarkeit ist nicht neu für die Verkehrsprognoserechnung; die Einbeziehung der Zeitwahl in den simultanen Nachfrageansatz verschärft jedoch die Situation, weil die Information zum Verkehrsangebot für kürzere Zeitintervalle benötigt wird.

Für die Modellierung von Maßnahmen sind zusätzliche Untersuchungen zur Sensitivität der Verkehrsteilnehmer auf bestimmte Anreize (z. B. monetäre Kosten) erforderlich. Der Modellierungsansatz kann in einem plausiblen Bereich nach den Erkenntnissen und Vorgaben des Anwenders kalibriert werden. Die Entscheidung, ob z. B. die Reaktion auf Straßenbenutzungsgebühren stärker in der Ziel-, Verkehrsmittel- oder Zeitwahl liegen soll, hängt von den Bewertungsparametern ab, die extern vorgegeben werden müssen.

Der letzte Komplex betrifft die Modellteile, die nicht Bestandteil des simultanen Wahlmodells sind, jedoch notwendige Eingangsdaten für die Konvergenz der Nachfragematrix liefern. Im wesentlichen betrifft dies das Verkehrsumlegungsmodell für den MIV und daran angeschlossen das Güterverkehrsmodell.

Für die beispielhafte Implementierung wurde das Umlegungsmodell aus dem Forschungsprojekt WUMS übernommen. Die Verkehrsnachfrage in den betrachteten Zeitintervallen wird dabei sukzessive und unabhängig auf das Netz umgelegt. Überlastungen in einem Zeitintervall haben keinen Einfluß auf das nächsten Zeitintervall. Dies ist nicht realistisch und sollte durch ein dynamisches Verkehrsumlegungsmodell ersetzt werden, in dem die Bestwege dreidimensional durch Raum und Zeit gesucht werden. In diesem Zusammenhang könnten dann auch die verwendeten Zeitintervalle kürzer gewählt werden. Es ist zu beachten, daß diese Erweiterung einen erheblichen Mehraufwand bei Rechenzeit- und Speicherbedarf nach sich zieht.

Ein weiterer Kritikpunkt am verwendeten Verkehrsumlegungsmodell bzw. Netzgrafen ist die Tatsache, daß die Kapazität des Netzes allein in den Streckenelementen kodiert ist. Dies mag für ein Fernstraßennetz realistisch sein, in urbanen Ballungszentren wird die Kapazität des Straßennetzes jedoch von den Knotenpunkten bestimmt; die Strecken dienen vielfach nur als Stauraum. Ein modernes und realistisches MIV-Umlegungsmodell sollte die Realität auch entsprechend abbilden. Da heutzutage gerade den Möglichkeiten der Verkehrstelematik und adaptiven Verkehrssteuerung große Bedeutung zugemessen wird, muß ein Modellkonzept diese Maßnahmen auch realistisch darstellen. Die detaillierte Modellierung von lichtsignalgeregelten Knotenpunkten mit Signalzeitenplänen, Spurplänen und Stauräumen ist dazu unerläßlich.

Wesentlichen Einfluß auf die Verkehrsqualität auf unseren Straßen übt die Lkw-Nachfrage aus, die im vorgestellten Beispiel rein exogen bleibt. Da die Lkw immer vorab auf das noch leere Straßennetz umgelegt werden, bleibt sogar ihre Routenwahl in allen Zeitintervallen und Planfällen identisch. In der Realität reagiert natürlich auch der Lkw-Verkehr auf wechselnde Verkehrsqualität oder entsprechende Maßnahmen der Verkehrslenkung. Andererseits tragen gerade die Lkw-Belastungen auf vielen Strecken maßgeblich zur niedrigen Verkehrsqualität bei. Bevor also weiterer Aufwand in die Modellierung der Personenverkehrsnachfrage investiert wird, wäre es dringend geraten, ein Güterverkehrsmodell zu implementieren, das auf dem bisher erreichten Niveau sensitiv auf Verkehrszustände und Maßnahmen reagieren kann.

Literatur

Allen, W. G.; Schultz, G. W.: Congestion-Based Peak Spreading Model; in Transportation Research Records (TRB) Vol. 1556, pp. 8 – 15; 1992

Bächtle, R.: Widerstandsbestimmung und Verkehrsumlegung in Netzen des Individualverkehrs, Diplomarbeit Fakultät Informatik der Universität Stuttgart, Stuttgart, 1997

Bates, J.; Skinner, A.; Scholefield, G.; Bradley, R.: Study of Parking and Traffic Demand: 2. A Traffic Restraint Analysis Model (TRAM); in: Traffic Engineering and Control, pp. 135 – 140, 1997

Bates, J.; Williams, I.; Coombe, D.; Leather, J.: The London Congestion Charging Research Programme: 4. The Transport Models; in: Traffic Engineering and Control, pp. 334 - 339, 1996

Beckmann, K. J.; Rindsfüser, G.: Zeitteilige Verkehrsnachfrageberechnung: Lösungsansätze – Anforderungen – Probleme; in: Stadt Region Land Nr. 66, Beiträge der Tagung ‚Verkehr und Mobilität – Verhalten, Simulation, Umwelt‘, Schriftenreihe des Instituts für Stadtbauwesen der RWTH Aachen, Aachen, 1998

Bernstein, D.; El Sanhouri, I.: A Note on „Departure Time and Route Choice for the Morning Commute“; Transportation Research B, Vol. 28B, No. 5, pp. 391 – 394, 1994

Bhat, C. R.: Accommodating flexible substitution Patterns in Multi-Dimensional Choice Modelling: Formulation and Application to Travel Mode and Departure Time Choice; in: Transportation Research B, Vol. 32, No. 7, pp. 355 – 466, 1998

Bhat, C. R.: Analysis of Travel Mode and Departure Time Choice for Urban Shopping Trips; in: Transportation Research B, Vol. 32, No. 6, pp. 361 – 371, 1998

De Palma, A.; Ben-Akiva, M.; Lefévre, C.; Litinas, N.: Stochastic Equilibrium Model of Peak Period Traffic Congestion; in: Transportation Science, Vol. 17, pp. 430 – 453, 1983

Emnid (Hrsg.): KONTIV 89, Bericht zur Methode, Anlagenband und Tabellenteil, Bieldfeld, 1991

Englmann, F. C.; u. a.: Wege zu einer umweltverträglichen Mobilität – am Beispiel der Region Stuttgart – Projektbeschreibung, Stuttgart, 1995, unveröffentlicht

Englmann, F. C.; u. a.: Wege zu einer umweltverträglichen Mobilität – am Beispiel der Region Stuttgart – Zwischenbericht 1996, Stuttgart, 1996, unveröffentlicht

Englmann, F. C.; u. a.: Wege zu einer umweltverträglichen Mobilität – am Beispiel der Region Stuttgart – Zwischenbericht 1997, Stuttgart, 1997, unveröffentlicht

Englmann, F. C.; u. a.: Wege zu einer umweltverträglichen Mobilität – am Beispiel der Region Stuttgart – Schlußbericht, Stuttgart, in Vorbereitung

Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (Hrsg.): Empfehlungen für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen – EWS, Köln, 1998

Hatcher, S. G.; Mahmassani H. S.: Daily Variability of Route and Trip Scheduling Decisions for the Evening Commute; in: Transportation Research Record (TRB) Vol. 1357, pp. 72 – 81, 1992

Hautzinger, H.; Pfeiffer, M.: Empirische Untersuchungen zum Pkw-Besetzungegrad; in: Internationales Verkehrswesen 46 Jg., 7+8, S. 400 – 406, 1994

Henderson, J. V.: The economics of staggered work hours; in: Journal of Urban Economics, Vol. 9, pp. 349 – 364; 1981

Hiller, A.: Modell zur Abschätzung des Radverkehrs in der Region Stuttgart mit Hilfe geeigneter Strukturdaten auf Verkehrsbezirksebene; Studienarbeit am Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Stuttgart, 1997

Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Institut für Sozialforschung, Universität Stuttgart (ISV, IfS) (Hrsg.): Analyse, Systematisiserung und Bewertung von Road Pricing-Systemen in städtischen Räumen, Stuttgart, 1996, unveröffentlicht

Jauffred, F. J.; Bernstein D.: An Alternative Formulation of the Simultaneous Route and Departure-Time Choice Equilibrium Problem; in Transportation Research C, Vol.4, No. 6, pp. 339 - 357, 1996

Jou, R.-J.; Mahmassani, H. S.: Comparability and Transferability of Commuter Behaviour Characteristics between Cities: Departure Time and Route-Switching Decisions; in: Transportation Research Record (TRB) Vol. 1556, pp. 119 – 130, 1996

Lohse, D.: Berechnung von Personenverkehrsströmen; in: Wissenschaft und Technik im Straßenwesen, Heft 17, 1977

Mahmassani, H. S.: Dynamic Models of Commuter Behaviour: Experimental Investigation and Application to the Analysis of Planned Traffic Disruptions; in: Transportation Research A, Vol. 24 A, No. 6, pp. 465 – 484, 1990

Mahmassani, H. S.; Caplice, C. G.; Walton, C. M.: Characteristics of Urban Commuter Behavior: Switching Propensity and Use of Information; in: Transportation Research Record (TRB) Vol. 1285, pp. 57 – 69, 1990

Mahmassani, H. S.; Chang, G.-L.: Dynamic Aspects of Departure-Time Choice Behaviour in a Commuting System: Theoretical Framework and Experimental Analysis; in: Transportation Research Record (TRB) Vol. 1037, pp. 88 – 101, 1985

Mahmassani, H. S.; Herman, R.: Dynamic User Equilibrium Departure Time and Route Choice on Idealized Traffic Arterials; in: Transportation Science Vol. 18, pp. 362 – 384, 1984

Mahmassani, H. S.; Herman, R.: Interactive Experiments for the Study of Tripmaker Behaviour Dynamics in Congested Commuting Systems; in: Jones, P. (Editor): Developments in Dynamic Activity-Based Approaches to Travel Analysis, Avebury, 1990

Mahmassani, H. S.; Joseph, T.; Jou, R.-C.: Survey Approach for Study of Urban Commuter Choice Dynamics in: Transportation Research Record (TRB) Vol. 1412, pp. 80 – 89, 1993

Mahmassani, H. S.; Stephan, D. G.: Experimental Investigation of Route and Departure Time Choice Dynamics of Urban Commuters; in: Transportation Research Record (TRB) Vol. 1203, pp. 69 – 84; 1988

Mahmassani, H. S.; Tong, C. C.: Availability of Information and Dynamics of Departure Time Choice: Experimental Investigation; in: Transportation Research Record (TRB) Vol. 1085, pp. 33 – 49, 1986

Mannering, F. L.: Poisson Analysis of Commuter flexibility in changing Routes and Departure Times, in: Transportation Research B, Vol. 23B, No. 1, pp. 53 – 60, 1989

Mannering, F. L.; Hamed, M. M.: Occurrence, Frequency, and Duration of Commuters‘ Work-to-Home Departure Delay; in: Transportation Research B, Vol. 24B, No. 2, pp. 99 – 109, 1990

Mannering, F.; Kim, S.-G.; Barfield, W.; Ng, L.: Statistical Analysis of Commuters‘ Route, Mode, and Departure Time Flexibility; in: Transportation Research C. Vol. 2, No 1, pp. 35 – 47, 1994

Mohammadi, R.: Journey time variability in the London area; in: Traffic Engineering and Control, pp. 250 – 257, pp. 337 – 346, pp. 405 – 414, 1997

Montgomery, F. O.; May; A. D.: Travel time monitoring in urban areas; in: PTRC Summer Annual Meeting, 1983

Nachbarschaftsverband Stuttgart (NVS) (Hrsg.): Lkw-Verkehr 1990 im Gebiet des Nachbarschaftsverbandes Stuttgart und der Landkreise Böblingen, Esslingen und Ludwigsburg, Stuttgart, 1990

Roberts, M.; Simmonds, D. C.: A Strategic Modelling Approach for Urban Transport Policy Development; in: Traffic Engineering and Control, pp. 377 – 384, 1997

Schnabel, W.; Lohse, D.: Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung; Berlin, 1997

Serwill, D.: DRUM- Modellkonzeopt zur dynamischen Routensuche und Umlegung, Schriftenreihe des Instituts für Stadtbauwesen, RWTH Aachen, H. B 43, Aachen, 1994

Slavin, H.: An integrated, dynamic approach to travel demand forecasting; in: Transportation Vol. 23, pp. 313 – 350, 1996

Smeed, R. J.; Jeffcoate, G. O.: The variability of car journey times on a particular route; in: Traffic Engineering and Control, 10/1971

Supernak, J.: A Dynamic Interplay of Activities and Travel: Analysis of Time of Day Utility Profiles; in: Jones, P. (Editor): Developments in Dynamic Activity-Based Approaches to Travel Analysis, Avebury, 1990

Verband Region Stuttgart (VRS) (Hrsg.): Begleituntersuchungen zum Regionalverkehrsplan Band 1: Analyse 1995 – Textteil; Schriftenreihe Verband Region Stuttgart, Nr. 1, Juni 1996 a

Verband Region Stuttgart (VRS) (Hrsg.): Begleituntersuchungen zum Regionalverkehrsplan Band 2 Analyse 1995 – Anlagenteil; Schriftenreihe Verband Region Stuttgart, Nr. 2, Juni 1996 b

Verband Region Stuttgart (VRS) (Hrsg.): Begleituntersuchungen zum Regionalverkehrsplan Band 3: Analyse 1995 – Wirkungen des Verkehrs; Schriftenreihe Verband Region Stuttgart, Nr. 5, April 1997

Walther, K.: Simultane Modellierung von Verkehrserzeugung und Zielwahl im Personenverkehr; in: Internationales Verkehrswesen(49) 12/97, S. 647 – 651

Wang, J. J.: Understanding Travel through the Scheduling of Daily Activities; Dissertation Thesis, Graduate Department of Geography, University of Toronto, Canada, 1994

Wang, J. J: Timing Utility of Daily Activities and its Impact on Travel; in: Transportation Research A, Vol. 30, No. 3, pp. 189 – 206, 1996

Lebenslauf

Christoph Hecht, geboren am 7.8.1968 in München

1974 – 1978	Grundschule Pullach i. Isartal
1978 – 1987	Gymnasium Pullach i. Isartal
1984 – 1985	Mt. Anthony Union High School, Bennington, Vermont, USA
1989 – 1994	Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Universität München; Vertiefung in Verkehrs- und Stadtplanung bei Professor Peter Kirchhoff und Professor Hartmut Keller sowie in Bau von Landverkehrswegen bei Professor Josef Eisenmann und Professor Günther Leykauf
1994 – 1999	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Straßen- und Verkehrswesen der Universität Stuttgart bei Professor Gerd Steierwald und Professor Wolfram Ressel
2000	Angestellter der TransVer GmbH, München

Anhang

Anhang 1 Aufteilungsfaktoren: Altersgruppen nach verhaltenshomogenen Gruppen – 1 Tabelle, 1 Seite 133

Anhang 2 Wegeketten nach verhaltenshomogenen Gruppen – 1 Tabelle, 1 Seite 135

Anhang 3 Empirische Daten – 117 Diagramme, 21 Seiten 137

Anhang 4 Durchschnittliche Fahrtweiten – 10 Diagramme, 5 Seiten 159

Anhang 5 Fahrtweitenverteilungen – 10 Diagramme, 5 Seiten 165

Anhang 6 Zeitliche Verteilung der Nachfrage, Fahrtzweck Arbeit – 6 Diagramme, 3 Seiten 171

Anhang 7 Modal Split, Fahrtzweck Arbeit – 6 Diagramme, 3 Seiten 175

Anhang 8 Tagesgang der Pkw-Nachfrage an den Kordonquerschnitten, 37 Diagramme, 19 Seiten 179

Anhang 9 Pkw- und Lkw-Fahrleistung nach Landkreisen – 2 Diagramme, 1 Seite 199

Anhang 10 Verkehrsqualität zwischen den Landkreisen, Mittelbereichen und der Landeshauptstadt Stuttgart – 52 Diagramme, 8 Seiten 201

Anhang 11 Verkehrsqualität zwischen allen Mittelbereichen in der Morgenspitze – 1 Tabelle, 11 Seiten 209

Alters-gruppe	m/w	EmP	TEmP	NEmP	RmP	EoP	TEoP	NEoP	RoP	Azubi	Schüler	Studenten
A 10-14	m										100%	
	w										100%	
A 15-17	m									14,3%	85,7%	
	w									7,3%	92,7%	
A 18-24	m	26,1%	1,5%			8,7%				18,8%	15,9%	29,0%
	w	28,6%	2,2%	1,1%		13,2%	2,2%			16,5%	16,5%	19,8%
A 25-29	m	62,7%		0,9%	0,9%	9,1%				0,9%	1,8%	23,6%
	w	36,2%	11,4%	12,4%		15,2%	3,8%	7,6%		1,0%	1,9%	10,5%
A 30-34	m	78,2%	1,8%			15,5%	0,9%				0,9%	2,7%
	w	30,4%	14,7%	22,6%		11,8%	7,8%	8,8%		1,0%		2,9%
A 35-39	m	83,0%				16,0%		1,1%				
	w	18,9%	33,3%	22,2%		3,3%	8,9%	10,0%	1,1%	1,1%		1,1%
A 40-44	m	74,0%	2,1%			22,9%			1,0%			
	w	23,9%	23,9%	17,1%	2,3%	13,6%	9,1%	9,1%	1,1%			
A 45-49	m	89,5%	1,2%			7,0%		1,2%		1,2%		
	w	30,0%	32,5%	10,0%		15,0%	6,3%	5,0%	1,3%			
A 50-54	m	76,3%	1,1%		3,2%	18,3%		1,1%				
	w	20,9%	29,7%	5,5%	1,1%	14,3%	16,5%	12,1%				
A 55-59	m	69,5%	1,9%		13,3%	11,4%	1,0%		2,9%			
	w	13,9%	26,7%	9,9%	3,0%	12,9%	12,9%	16,8%	4,0%			
A 60-64	m	34,9%	1,2%		52,3%	5,8%			5,8%			
	w	3,2%	4,8%	6,4%	17,5%	3,2%	3,2%	30,2%	31,8%			
A 65-69	m		1,5%		73,9%	1,5%	1,5%		21,5%			
	w			1,4%	29,6%			11,3%	56,3%			1,4%
A 70-74	m				85,7%				14,3%			
	w	2,0%			33,3%			3,9%	60,8%			
A 75+	m		2,0%		60,8%				37,3%			
	w			2,8%	8,3%			5,6%	83,3%			

Tabelle A1-1: Aufteilungsfaktoren Altersgruppen nach verhaltenshomogenen Gruppen (nach VRS, 1996 b)

m	männlich
w	weiblich

EmP	Erwerbstätige mit Pkw
TEmP	Teilzeiterwerbstätige mit Pkw
NEmP	Nicht Erwerbstätige mit Pkw
RmP	Rentner mit Pkw
EoP	Erwerbstätige ohne Pkw
TEoP	Teilzeiterwerbstätige ohne Pkw
NEoP	Nicht Erwerbstätige ohne Pkw
RoP	Rentner ohne Pkw
Azubi	Auszubildende
Schüler	
Studenten	

Kette	EmP	TEmP	NEmP	RmP	EoP	TeoP	NEoP	RoP	Azubi	Schüler	Student
WAAW	0,24	0,052		0,006	0,133	0,058		0,01	0,032		0,036
WAEW	0,181	0,116	0,025	0,007	0,155	0,094		0,004	0,081		0,038
WAFW	0,087	0,072			0,065	0,108			0,126		0,039
WAHW											0,009
WASW	0,001	0,01			0,007						
WAW	0,942	0,666	0,026	0,053	0,996	0,627	0,039		0,877	0,017	0,153
WEAW	0,042	0,053			0,056	0,022					
WEEW	0,043	0,097	0,273	0,107	0,058	0,124	0,309	0,03	0,087	0,062	0,02
WEFW	0,026	0,01	0,191	0,04	0,036	0,082	0,098		0,068	0,007	0,04
WEHW											0,075
WESW										0,01	
WEW	0,228	0,607	0,578	0,796	0,273	0,611	0,571	0,668	0,025	0,179	0,192
WFAW	0,017	0,058			0,022	0,066	0,012	0,004			
WFEW	0,029	0,175	0,179	0,048	0,023	0,055	0,134	0,019	0,129	0,043	0,019
WFFW	0,078	0,072	0,169	0,071	0,035	0,129	0,042	0,023	0,11	0,069	0,156
WFHW											0,038
WFSW										0,012	
WFW	0,27	0,975	1,1	0,617	0,282	0,571	0,669	0,314	0,551	0,789	0,384
WHAW											0,045
WHEW											0,124
WHFW											0,052
WHHW											0,078
WHW											0,604
WSAW	0,001								0,035	0,01	
WSEW			0,013						0,15	0,042	
WSFW	0,001				0,006				0,065	0,056	
WSSW		0,016							0,023	0,033	
WSW	0,013	0,001			0,016	0,042	0,019	0,003	0,384	1,377	

Tabelle A2-1: Wegeketten nach verhaltenshomogenen Gruppen (nach VRS, 1996 b)

A: Arbeit F: Freizeit H: Hochschule
E: Einkauf S: Schule W: Wohnung

EmP Erwerbstätige mit Pkw
TEmP Teilzeiterwerbstätige mit Pkw
NEmP Nicht Erwerbstätige mit Pkw
RmP Rentner mit Pkw
EoP Erwerbstätige ohne Pkw
TEoP Teilzeiterwerbstätige ohne Pkw
NEoP Nicht Erwerbstätige ohne Pkw
RoP Rentner ohne Pkw
Azubi Auszubildende
Schüler
Studenten

1 RVP Haushaltsbefragung

Sonderauswertungen der Rohdaten aus der Haushaltsbefragung zum faktischen Verkehrsverhalten (Erhebung 1), die im Rahmen der Erstellung des Regionalverkehrsplans im Jahr 1995 in der Region Stuttgart durchgeführt wurde (s. a. VRS, 1996 b).

1.1 Nachfragezeit

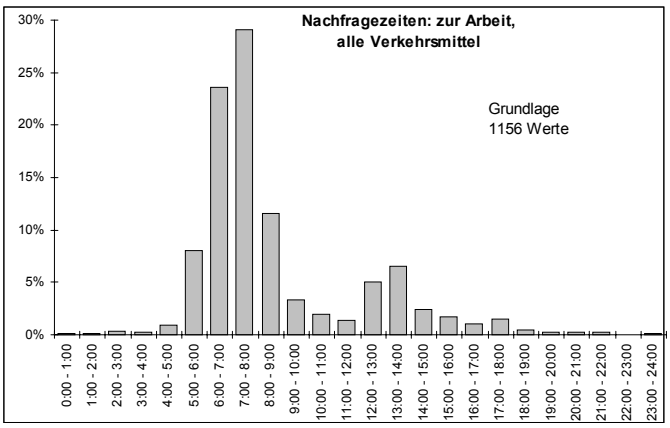


Abbildung A3 - 1: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zur Arbeit' in der Region Stuttgart.

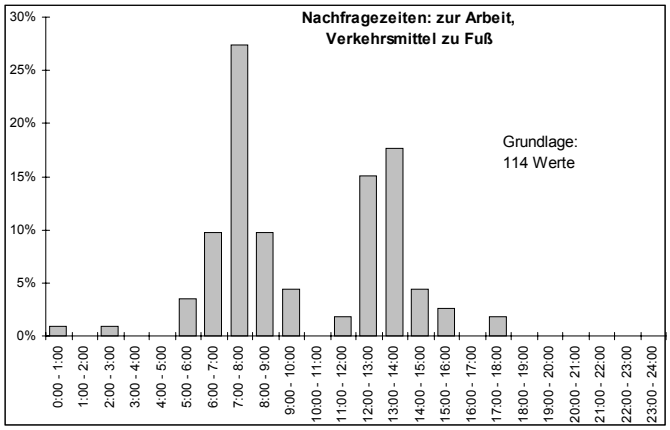


Abbildung A3 - 2: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zur Arbeit', Verkehrsmittel ‚zu Fuß' in der Region Stuttgart.

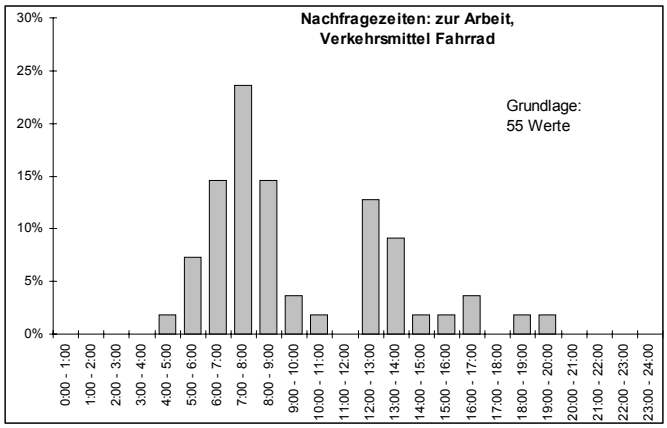


Abbildung A3 - 3: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zur Arbeit', Verkehrsmittel ‚Auto Fahrrad' in der Region Stuttgart.

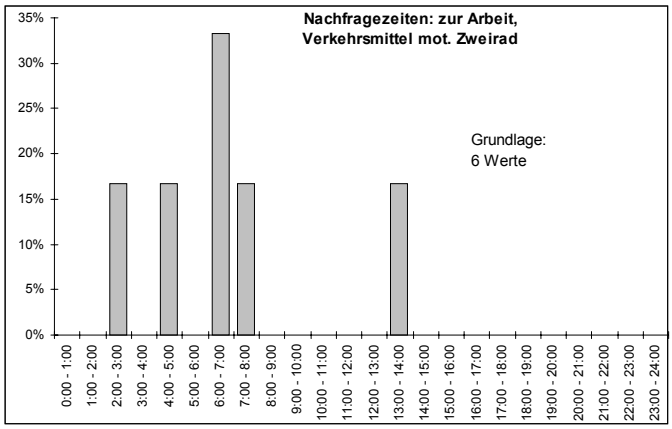


Abbildung A3 - 4: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zur Arbeit', Verkehrsmittel ‚mot. Zweirad' in der Region Stuttgart.

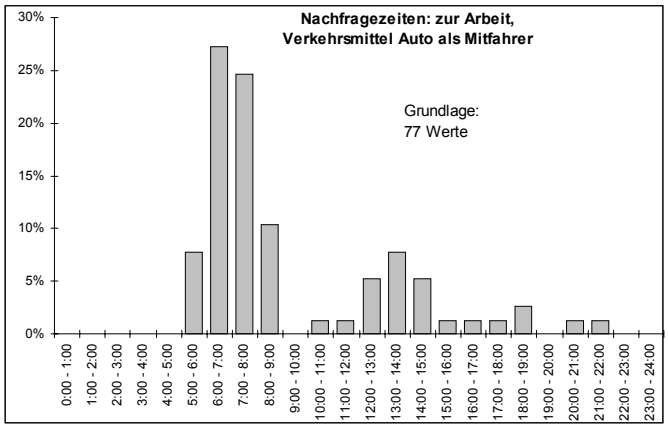


Abbildung A3 - 5: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zur Arbeit', Verkehrsmittel ‚Auto als Mitfahrer' in der Region Stuttgart.

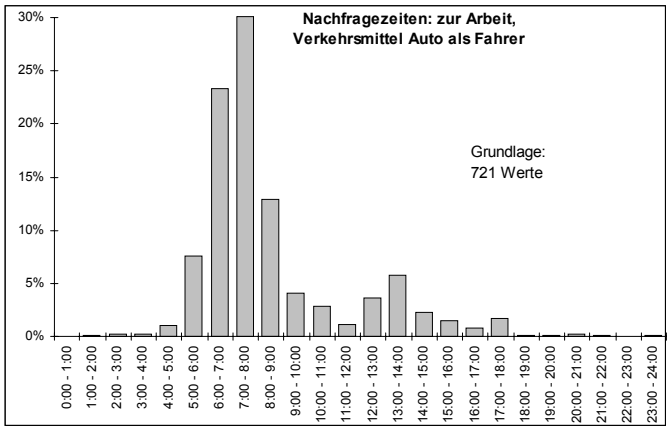


Abbildung A3 - 6: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zur Arbeit', Verkehrsmittel ‚Auto als Fahrer' in der Region Stuttgart.

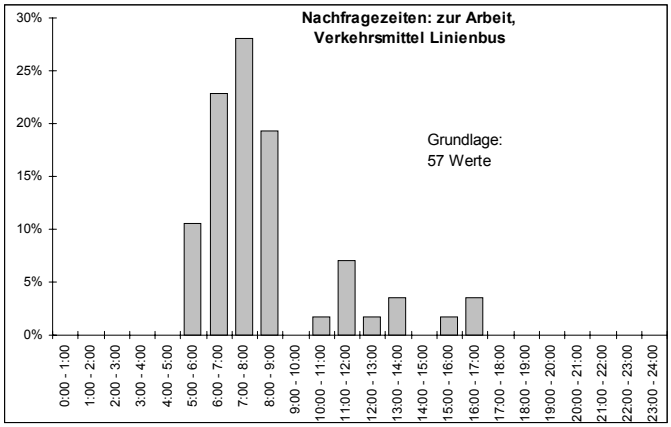


Abbildung A3 - 7: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zur Arbeit', Verkehrsmittel ‚Linienbus' in der Region Stuttgart.

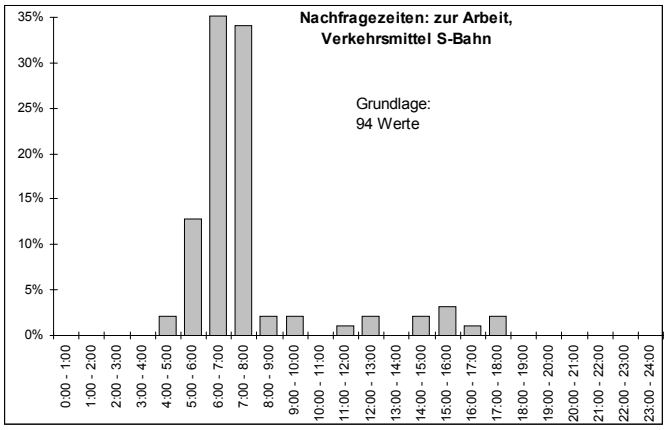


Abbildung A3 - 8: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zur Arbeit', Verkehrsmittel ‚S-Bahn' in der Region Stuttgart.

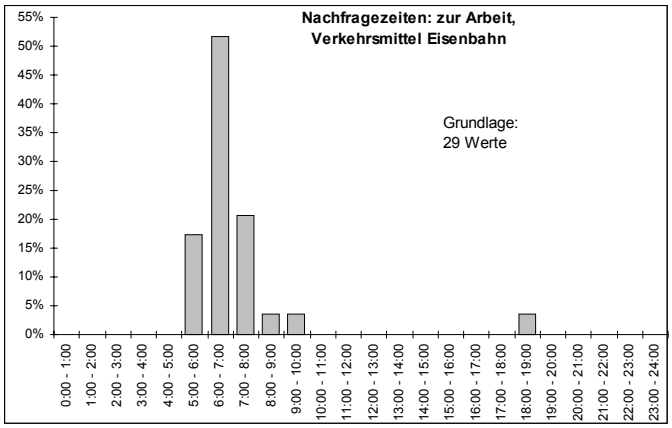


Abbildung A3 - 9: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zur Arbeit', Verkehrsmittel ‚Eisenbahn' in der Region Stuttgart.

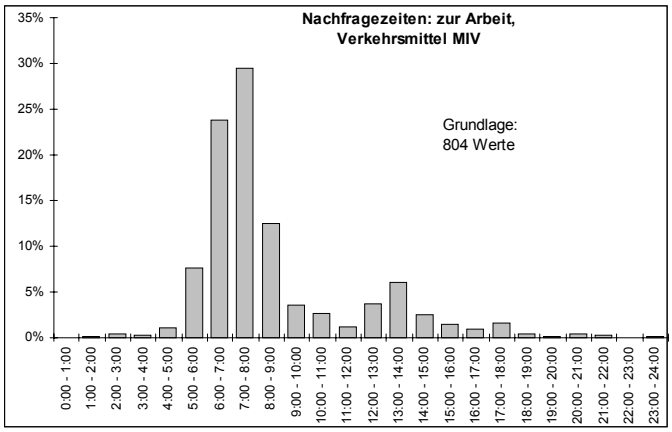


Abbildung A3 - 10: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zur Arbeit', Verkehrsmittel ‚MIV gesamt' in der Region Stuttgart.

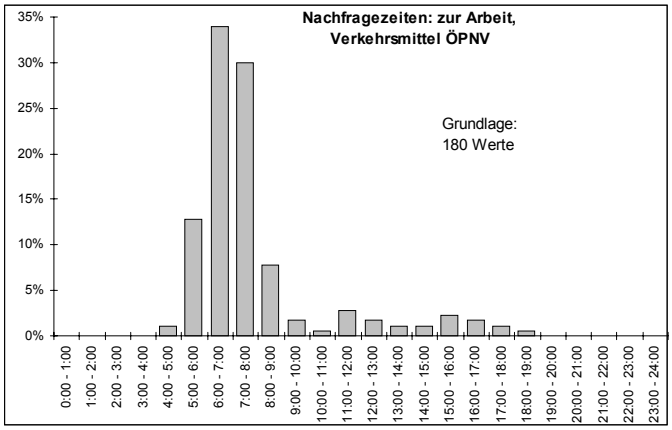


Abbildung A3 - 11: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zur Arbeit', Verkehrsmittel ‚ÖPNV gesamt' in der Region Stuttgart.

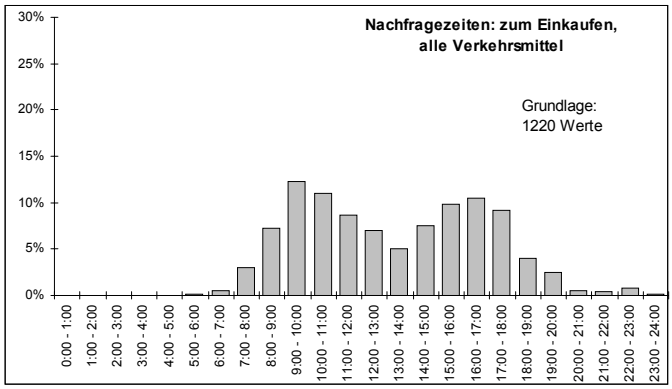


Abbildung A3 - 12: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zum Einkaufen' in der Region Stuttgart.

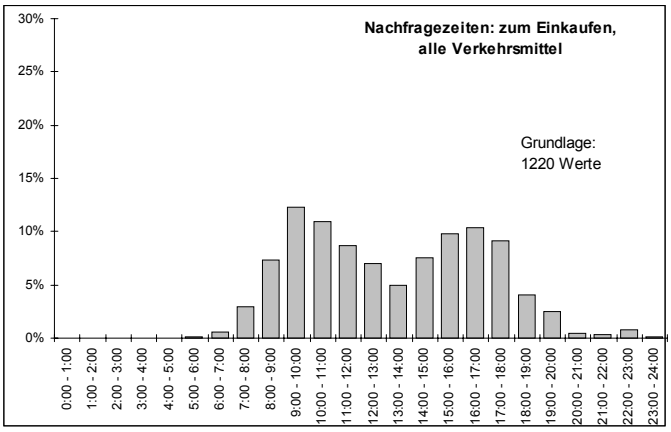


Abbildung A3 - 13: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zum Einkaufen' in der Region Stuttgart.

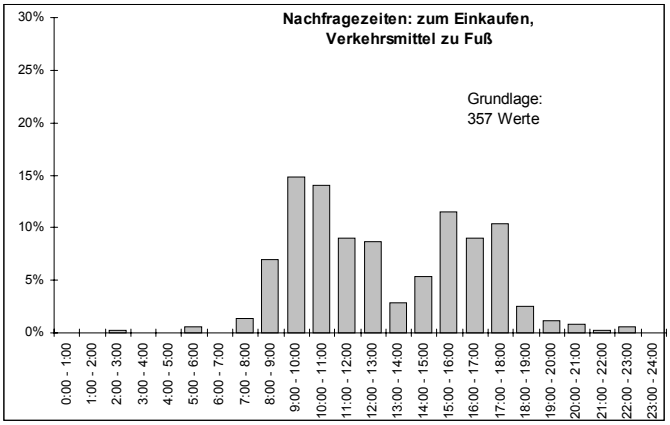


Abbildung A3 - 14: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zum Einkaufen', Verkehrsmittel ‚zu Fuß' in der Region Stuttgart.

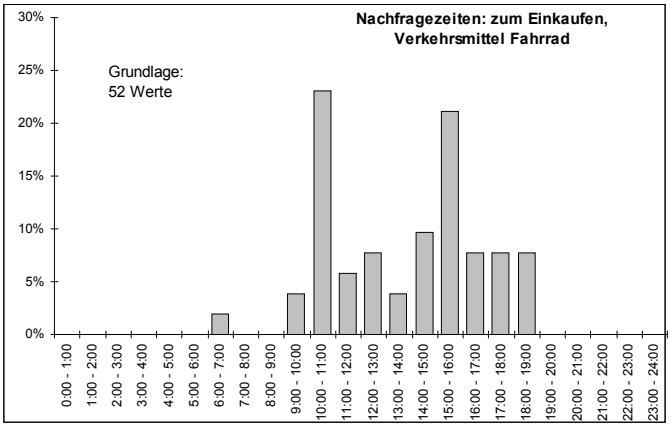


Abbildung A3 - 15: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zum Einkaufen', Verkehrsmittel ‚Fahrrad' in der Region Stuttgart.

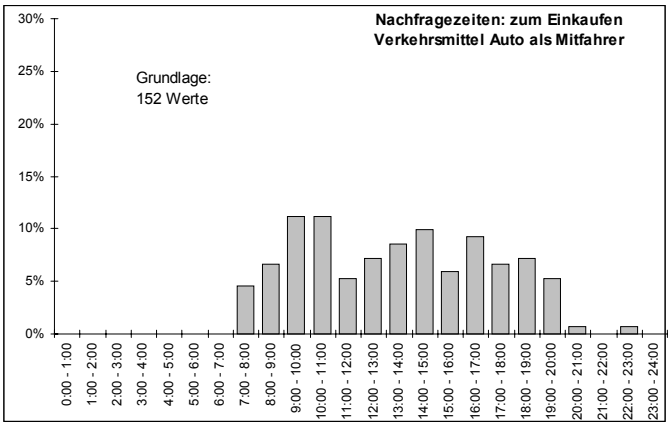


Abbildung A3 - 16: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zum Einkaufen', Verkehrsmittel ‚Auto als Mitfahrer' in der Region Stuttgart.

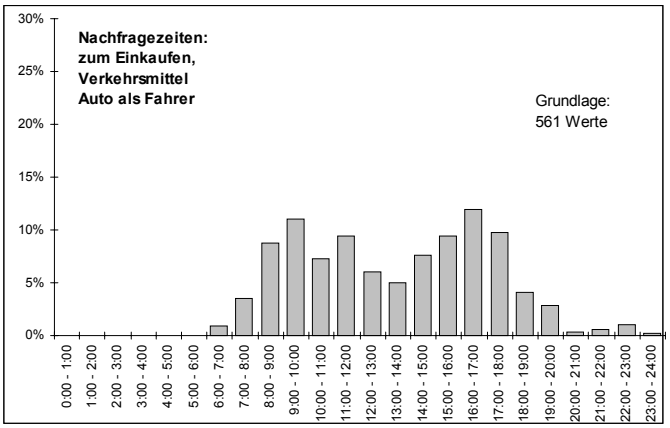


Abbildung A3 - 17: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zum Einkaufen', Verkehrsmittel ‚Auto als Fahrer' in der Region Stuttgart.

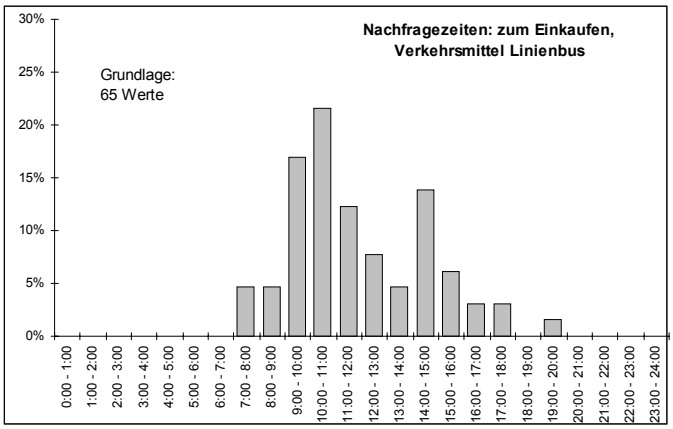


Abbildung A3 - 18: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zum Einkaufen', Verkehrsmittel ‚Linienbus' in der Region Stuttgart.

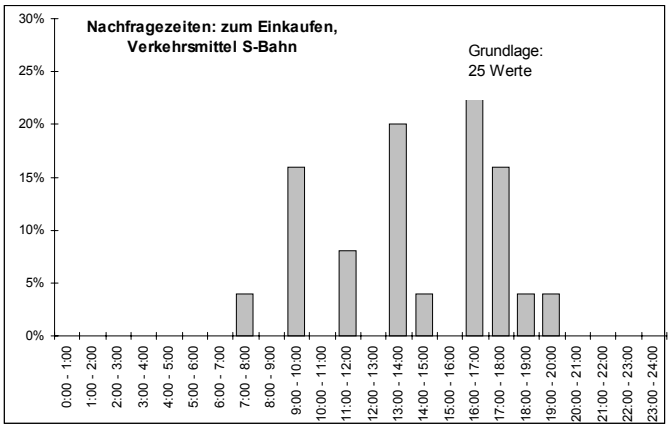


Abbildung A3 - 19: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zum Einkaufen', Verkehrsmittel ‚S-Bahn' in der Region Stuttgart.

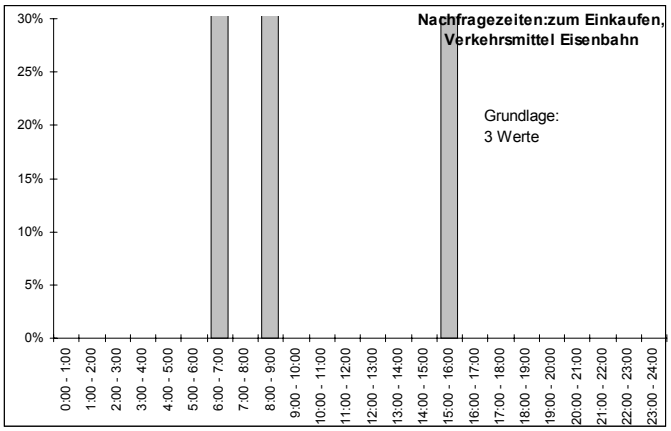


Abbildung A3 - 20: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zum Einkaufen', Verkehrsmittel ‚Eisenbahn' in der Region Stuttgart.

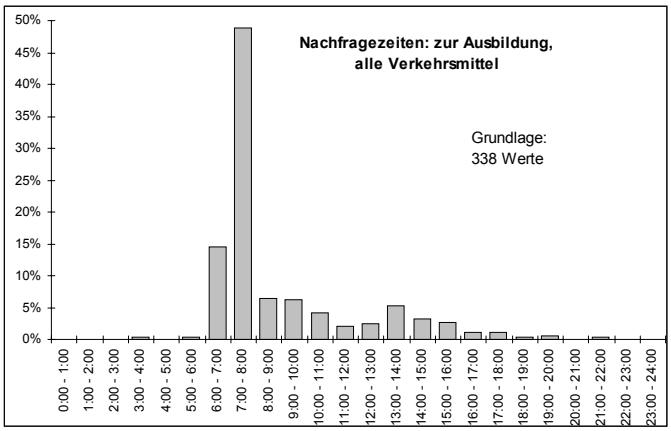


Abbildung A3 - 21: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zur Ausbildung' in der Region Stuttgart.

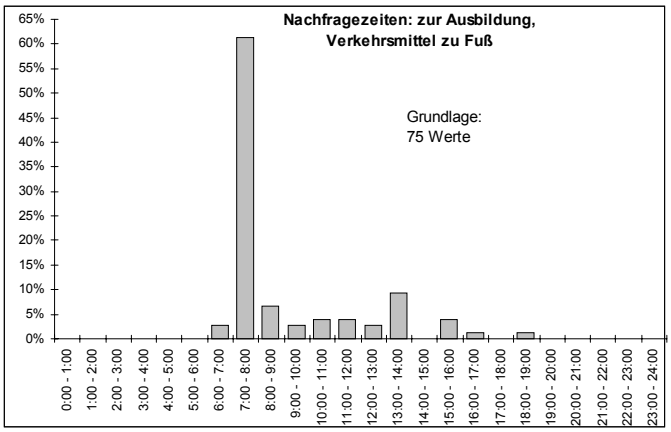


Abbildung A3 - 22: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zur Ausbildung', Verkehrsmittel ‚zu Fuß' in der Region Stuttgart.

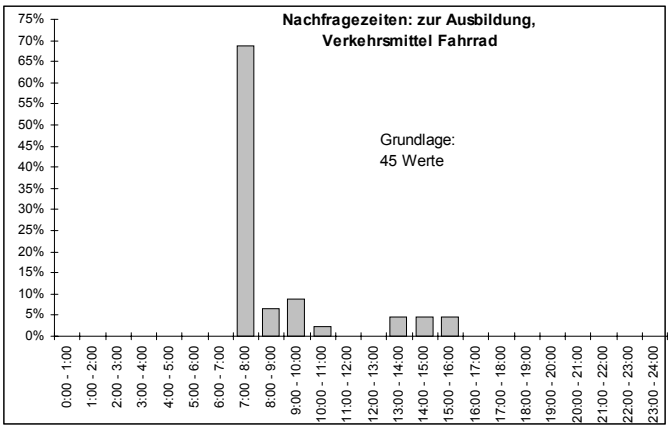


Abbildung A3 - 23: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zur Ausbildung', Verkehrsmittel ‚Fahrrad' in der Region Stuttgart.

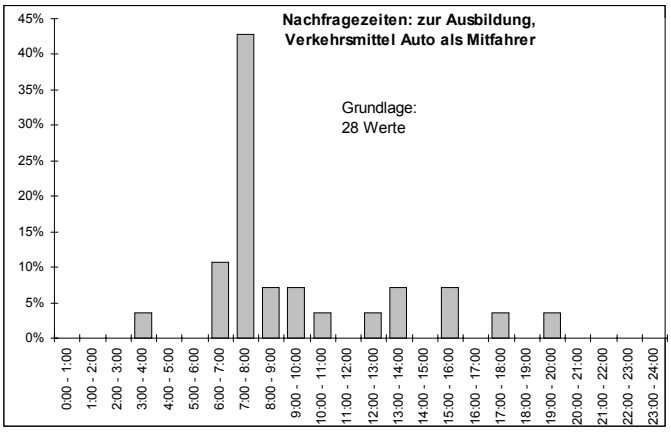


Abbildung A3 - 24: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zur Ausbildung', Verkehrsmittel ‚Auto als Mitfahrer' in der Region Stuttgart.

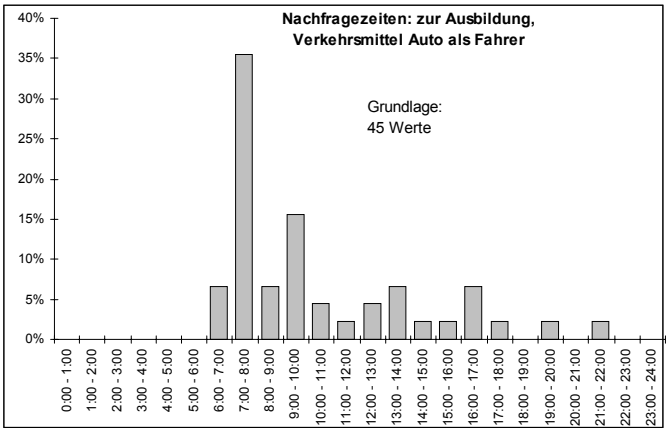


Abbildung A3 - 25: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zur Ausbildung', Verkehrsmittel ‚Auto als Fahrer' in der Region Stuttgart.

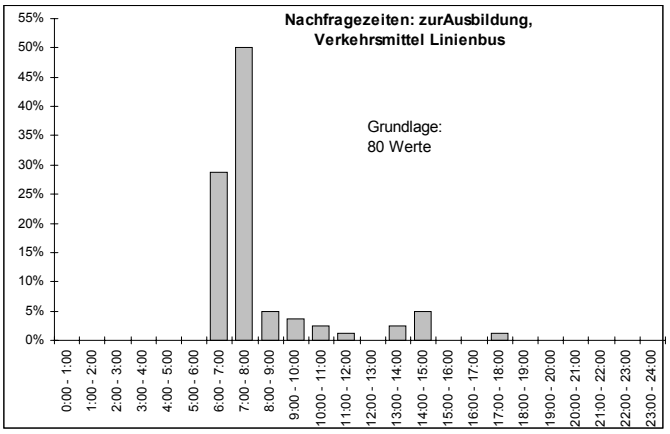


Abbildung A3 - 26: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zur Ausbildung', Verkehrsmittel ‚Linienbus' in der Region Stuttgart.

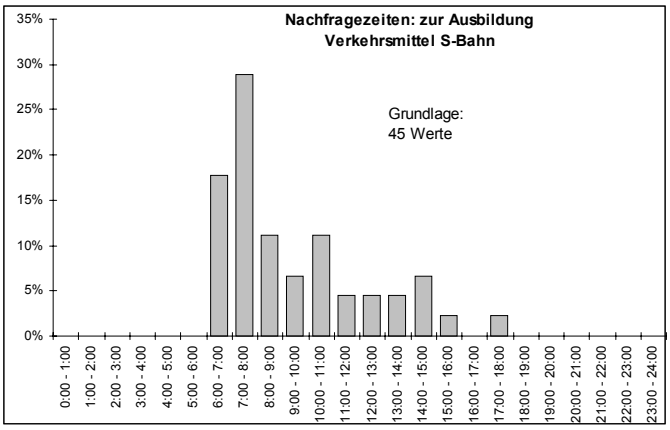


Abbildung A3 - 27: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zur Ausbildung', Verkehrsmittel ‚S-Bahn' in der Region Stuttgart.

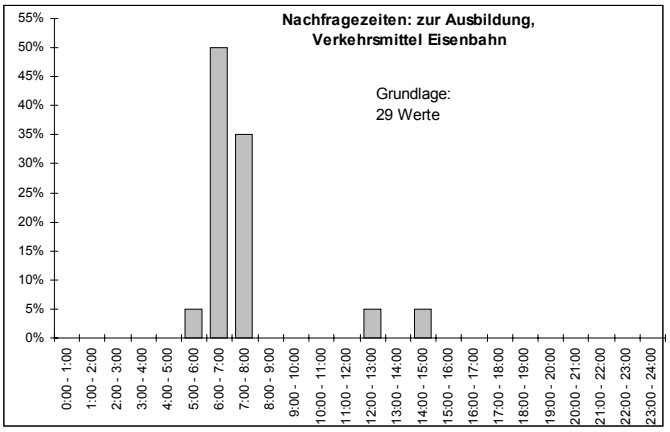


Abbildung A3 - 28: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zur Ausbildung', Verkehrsmittel ‚Eisenbahn' in der Region Stuttgart.

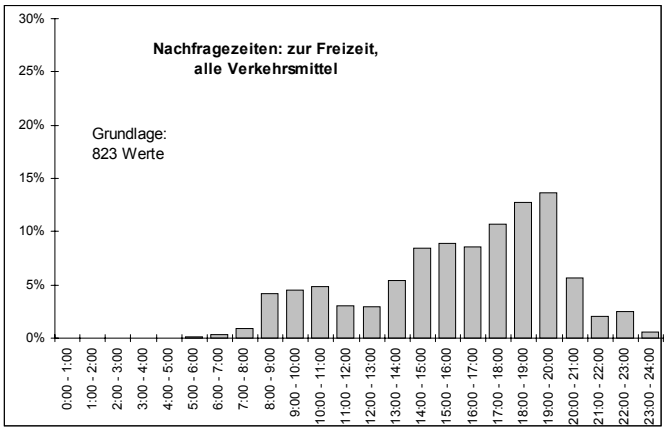


Abbildung A3 - 29: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zur Freizeit' in der Region Stuttgart.

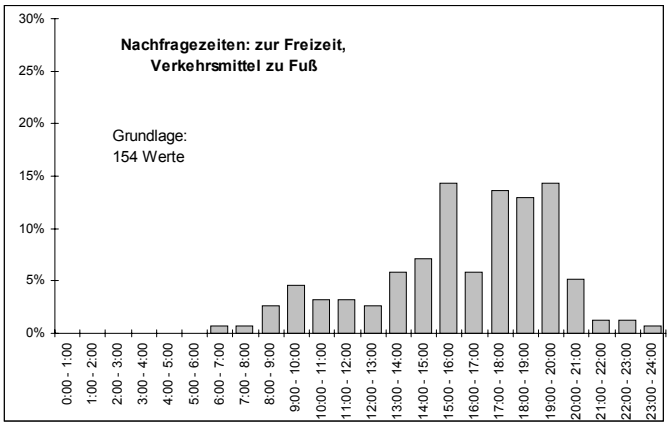


Abbildung A3 - 30: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zur Freizeit', Verkehrsmittel ‚zu Fuß' in der Region Stuttgart.

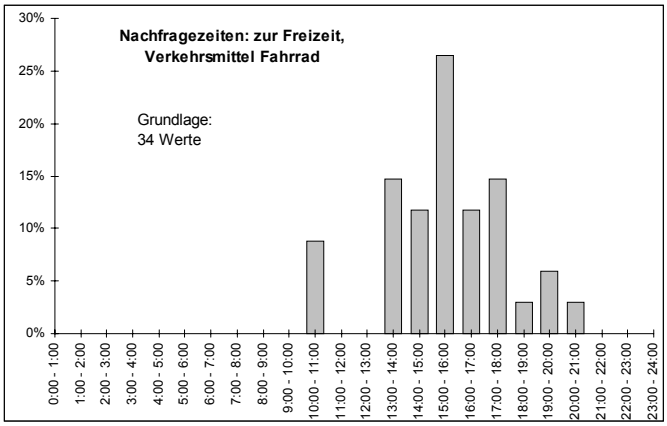


Abbildung A3 - 31: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zur Freizeit', Verkehrsmittel ‚Fahrrad' in der Region Stuttgart.

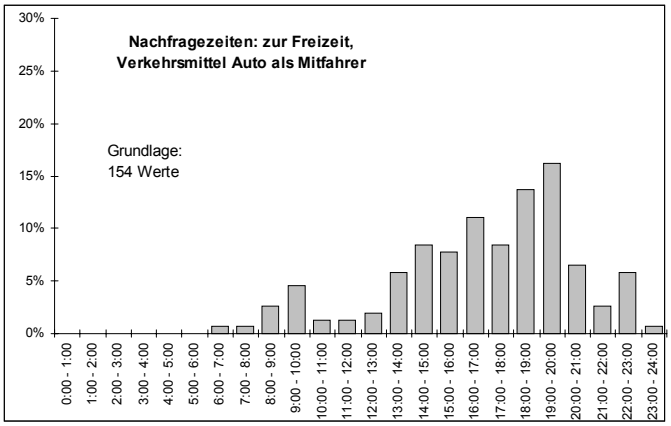


Abbildung A3 - 32: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zur Freizeit', Verkehrsmittel ‚Auto als Mitfahrer' in der Region Stuttgart.

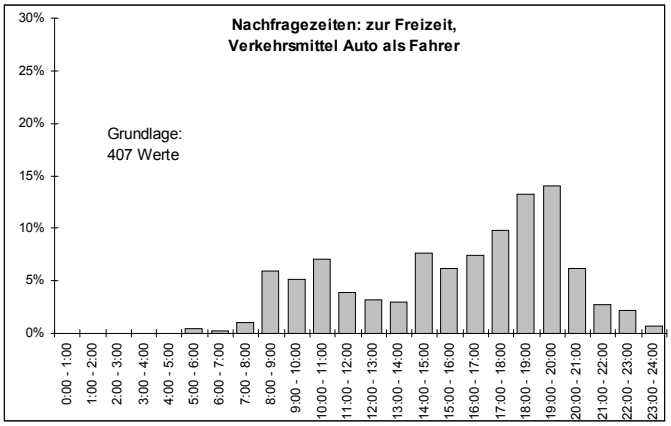


Abbildung A3 - 33: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zur Freizeit', Verkehrsmittel ‚Auto als Fahrer' in der Region Stuttgart.

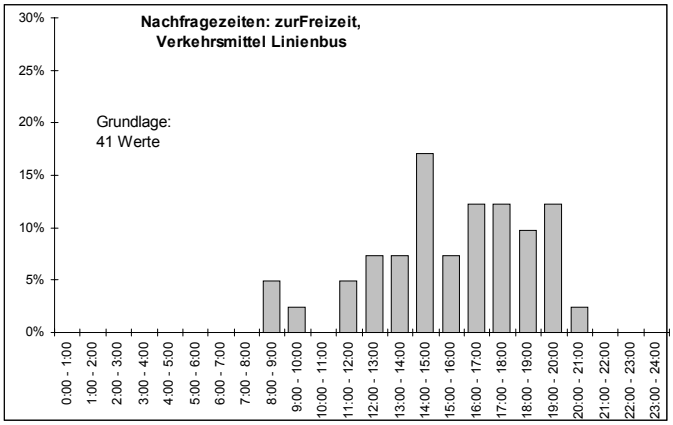


Abbildung A3 - 34: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zur Freizeit', Verkehrsmittel ‚Linienbus' in der Region Stuttgart.

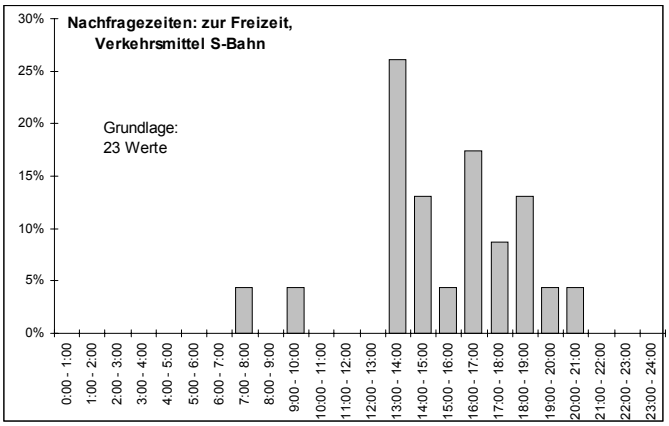


Abbildung A3 - 35: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zur Freizeit', Verkehrsmittel ‚S-Bahn' in der Region Stuttgart.

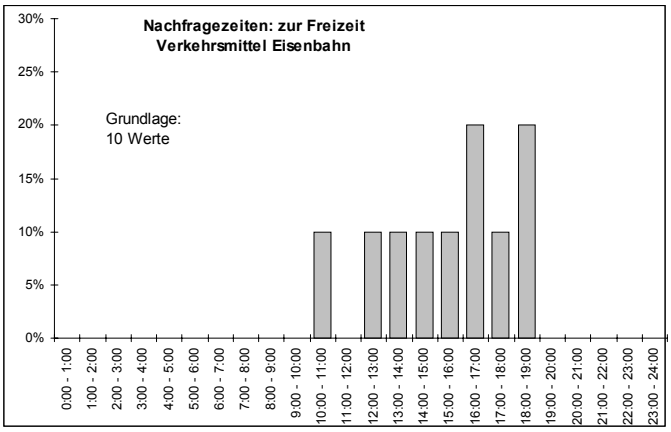


Abbildung A3 - 36: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zur Freizeit', Verkehrsmittel ‚Eisenbahn' in der Region Stuttgart.

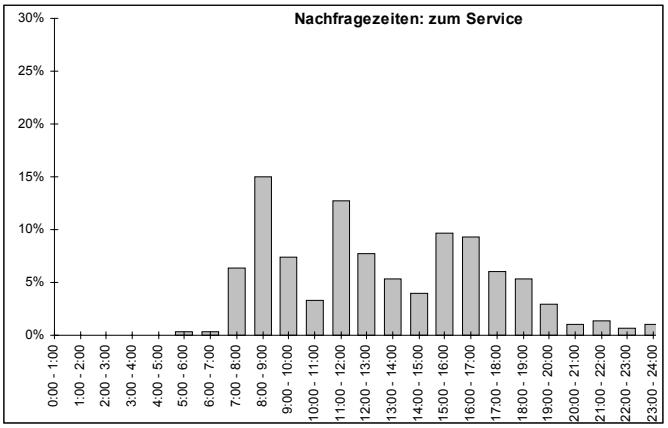


Abbildung A3 - 37: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zum Service' in der Region Stuttgart.

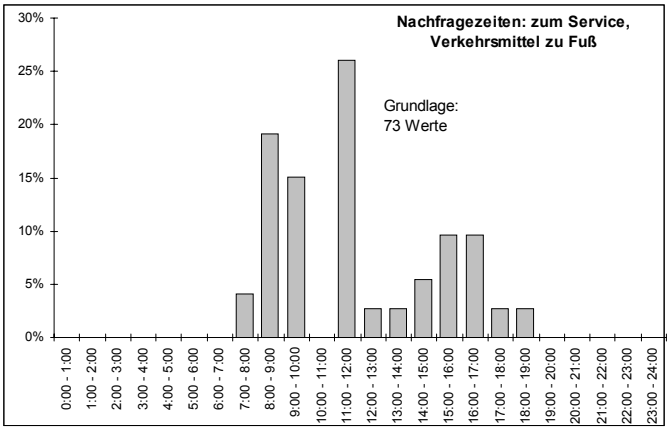


Abbildung A3 - 38: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zum Service', Verkehrsmittel ‚zu Fuß' in der Region Stuttgart.

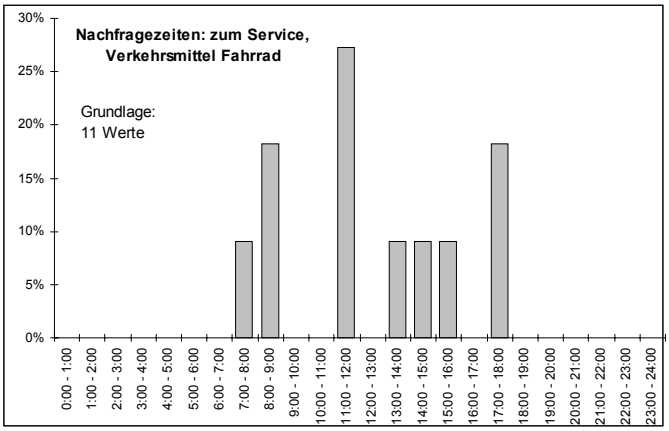


Abbildung A3 - 39: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zum Service', Verkehrsmittel ‚Fahrrad' in der Region Stuttgart.

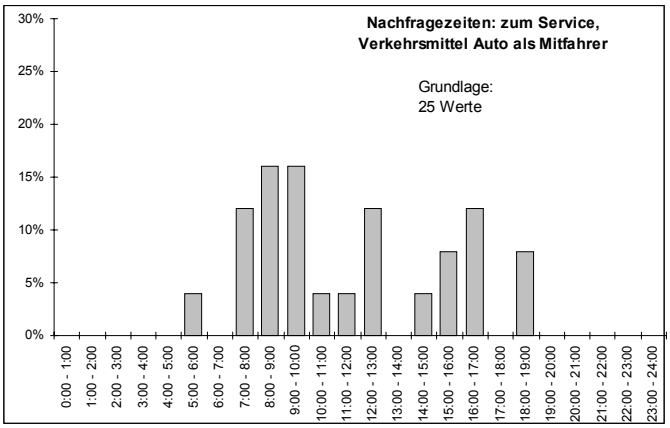


Abbildung A3 - 40: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zum Service', Verkehrsmittel ‚Auto als Mitfahrer' in der Region Stuttgart.

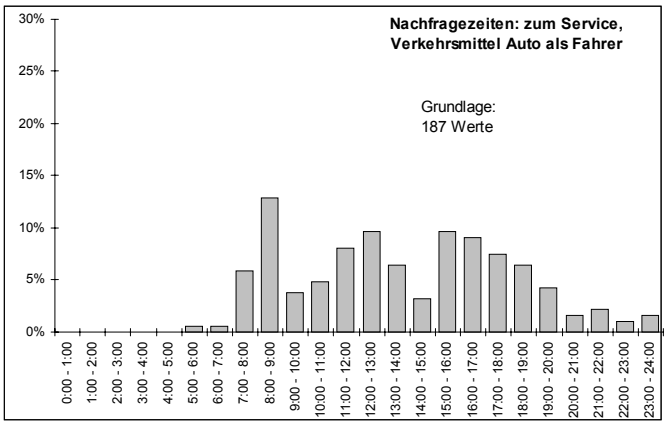


Abbildung A3 - 41: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zum Service', Verkehrsmittel ‚Auto als Fahrer' in der Region Stuttgart.

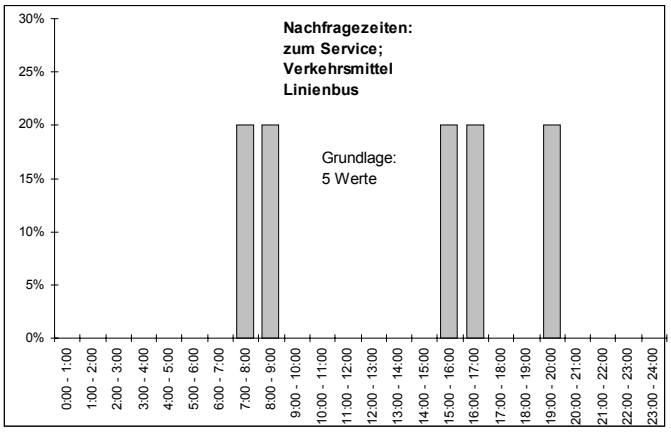


Abbildung A3 - 42: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zum Service', Verkehrsmittel ‚Linienbus' in der Region Stuttgart.

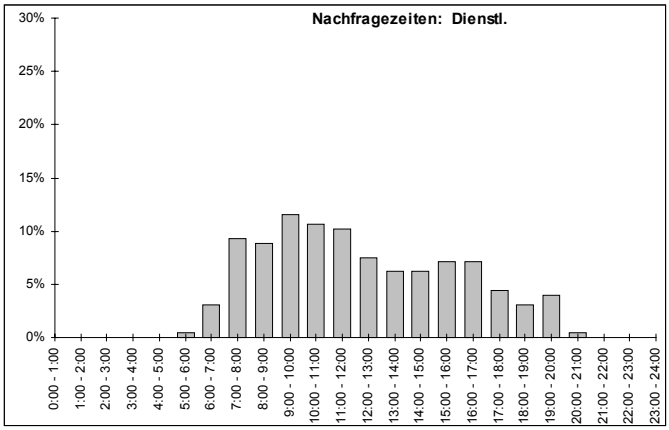


Abbildung A3 - 43: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚Dienstliche Erledigung' in der Region Stuttgart.

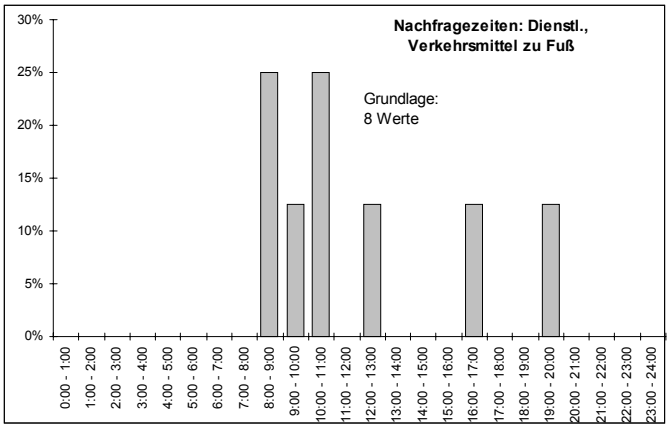


Abbildung A3 - 44: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚Dienstliche Erledigung', Verkehrsmittel ‚zu Fuß' in der Region Stuttgart.

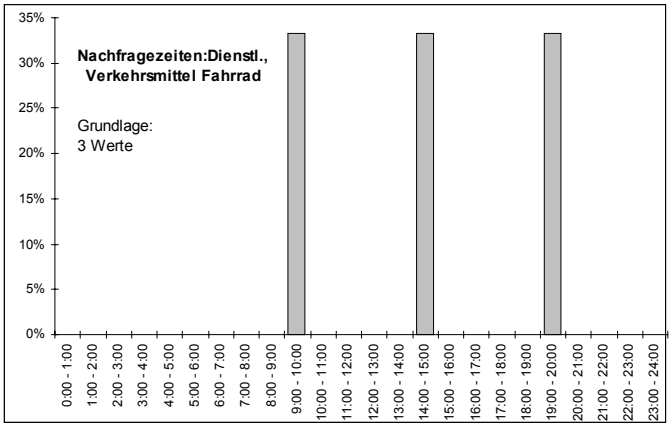


Abbildung A3 - 45: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚Dienstliche Erledigung', Verkehrsmittel ‚Fahrrad' in der Region Stuttgart.

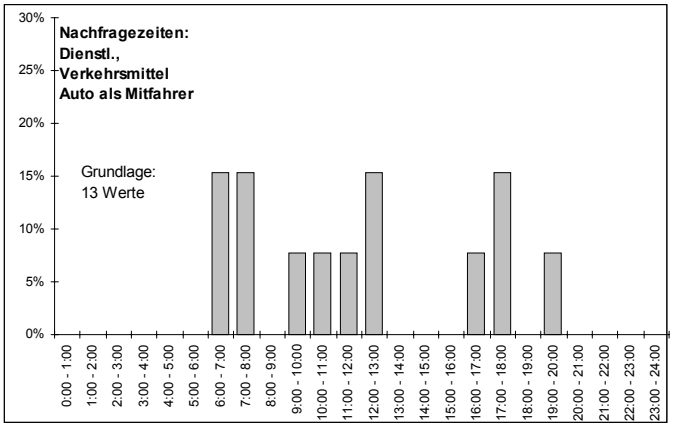


Abbildung A3 - 46: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚Dienstliche Erledigung', Verkehrsmittel ‚Auto als Mitfahrer' in der Region Stuttgart.

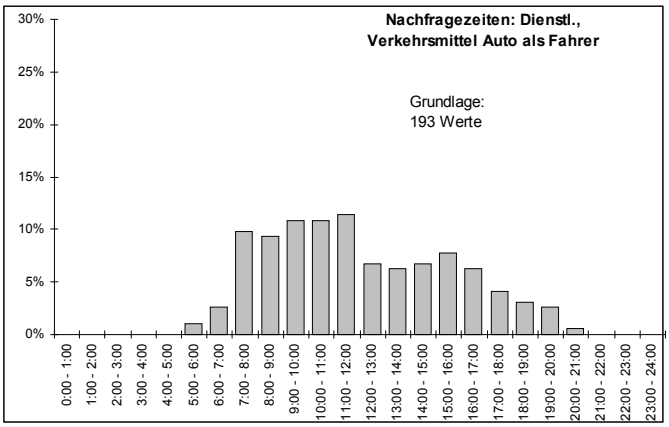


Abbildung A3 - 47: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚Dienstliche Erledigung', Verkehrsmittel ‚Auto als Fahrer' in der Region Stuttgart.

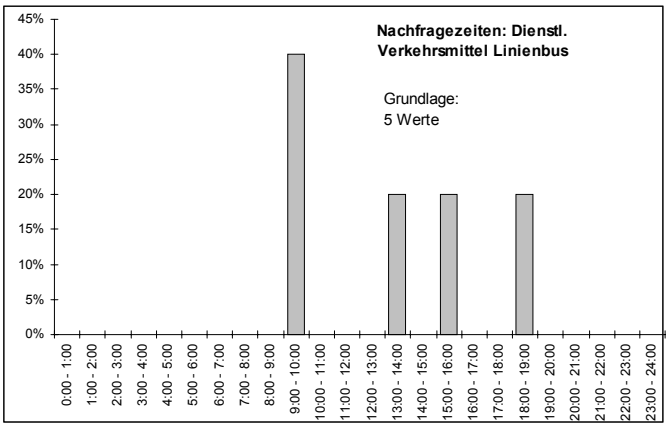


Abbildung A3 - 48: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚Dienstliche Erledigung', Verkehrsmittel ‚Linienbus' in der Region Stuttgart.

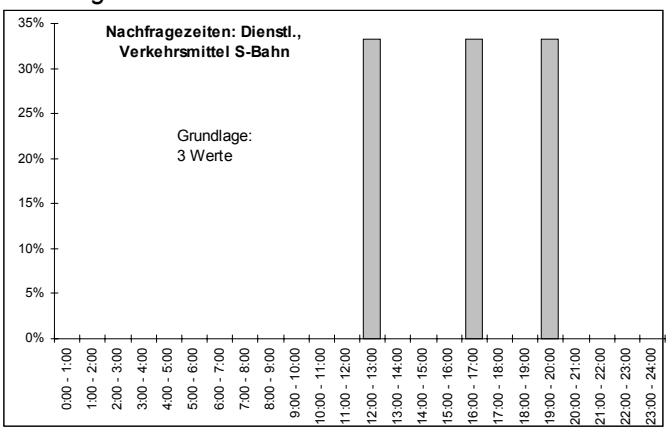


Abbildung A3 - 49: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚Dienstliche Erledigung', Verkehrsmittel ‚S-Bahn' in der Region Stuttgart.

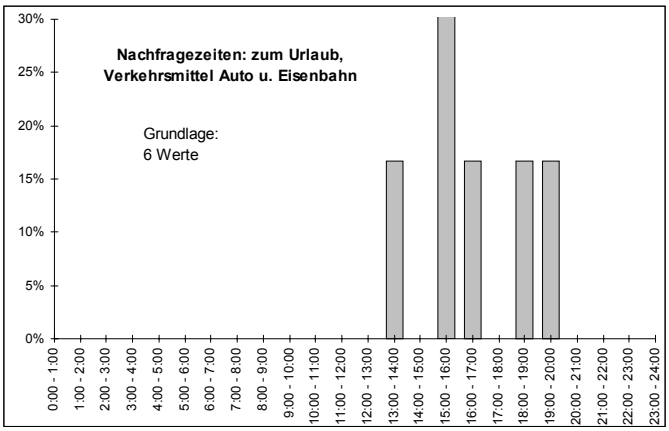


Abbildung A3 - 50: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zum Urlaub', Verkehrsmittel ‚Auto und Eisenbahn' in der Region Stuttgart.

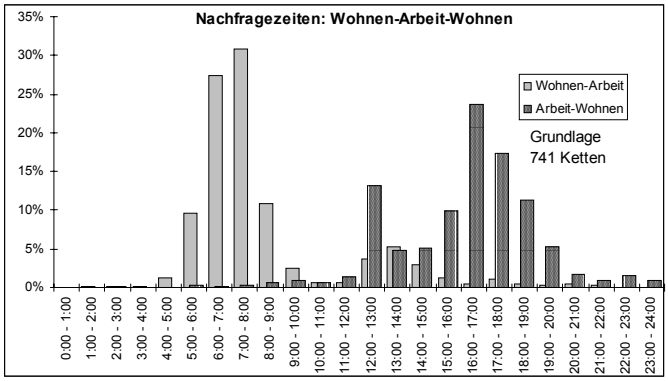


Abbildung A3 - 51: Startzeitverteilung für die Aktivitätenkette Wohnen-Arbeit-Wohnen in der Region Stuttgart.

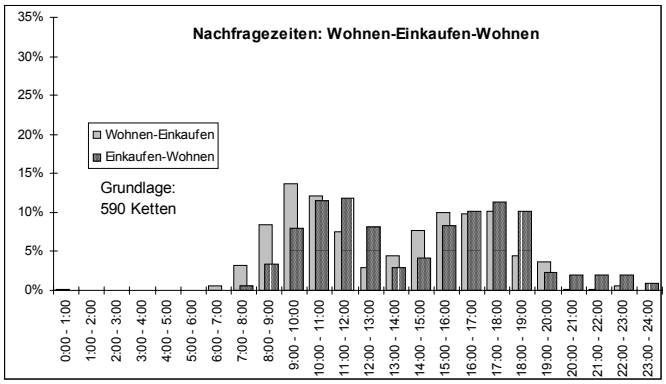


Abbildung A3 - 52: Startzeitverteilung für die Aktivitätenkette Wohnen-Einkaufen-Wohnen in der Region Stuttgart.

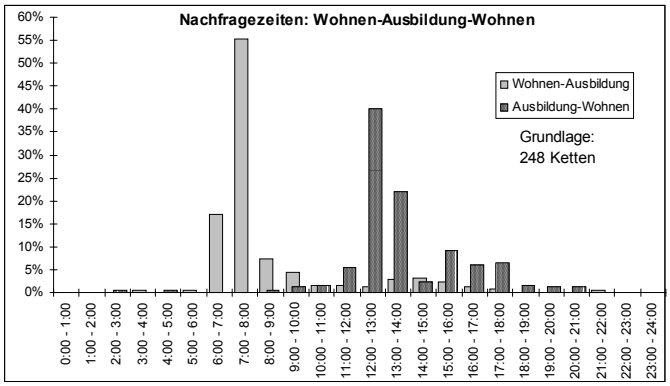


Abbildung A3 - 53: Startzeitverteilung für die Aktivitätenkette Wohnen-Ausbildung-Wohnen in der Region Stuttgart.

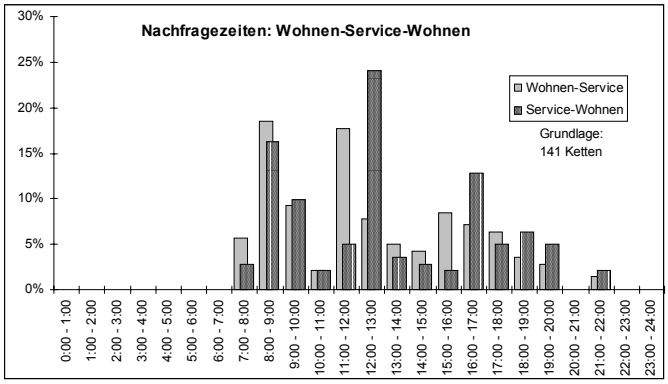


Abbildung A3 - 54: Startzeitverteilung für die Aktivitätenkette Wohnen-Service-Wohnen in der Region Stuttgart.

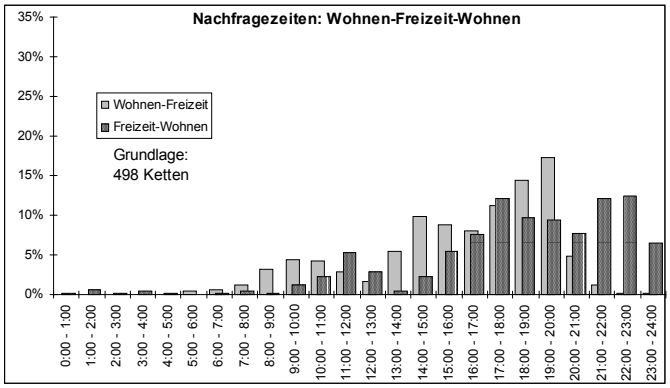


Abbildung A3 - 55: Startzeitverteilung für die Aktivitätenkette Wohnen-Freizeit-Wohnen in der Region Stuttgart.

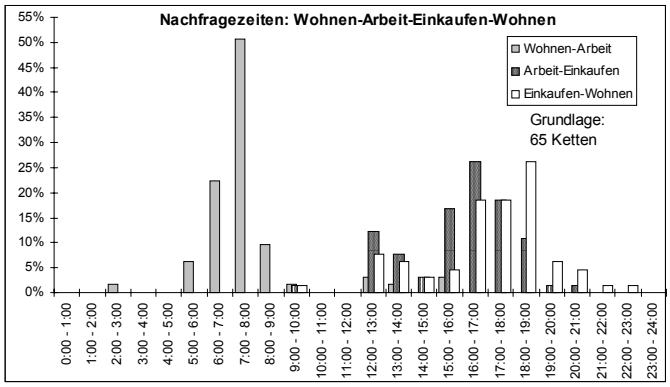


Abbildung A3 - 56: Startzeitverteilung für die Aktivitätenkette Wohnen-Arbeit-Einkaufen-Wohnen in der Region Stuttgart.

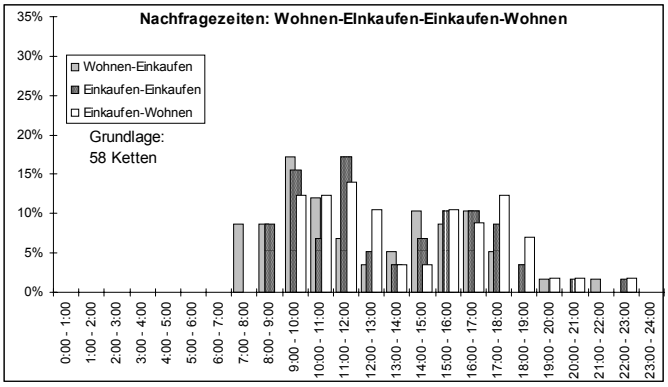


Abbildung A3 - 57: Startzeitverteilung für die Aktivitätenkette Wohnen-Einkaufen-Einkaufen-Wohnen in der Region Stuttgart.

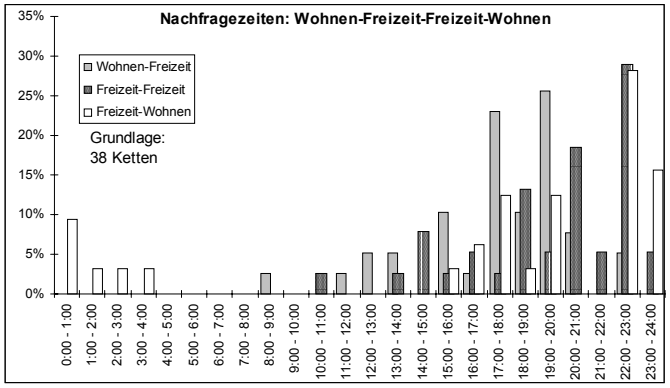


Abbildung A3 - 58: Startzeitverteilung für die Aktivitätenkette Wohnen-Freizeit-Freizeit-Wohnen in der Region Stuttgart.

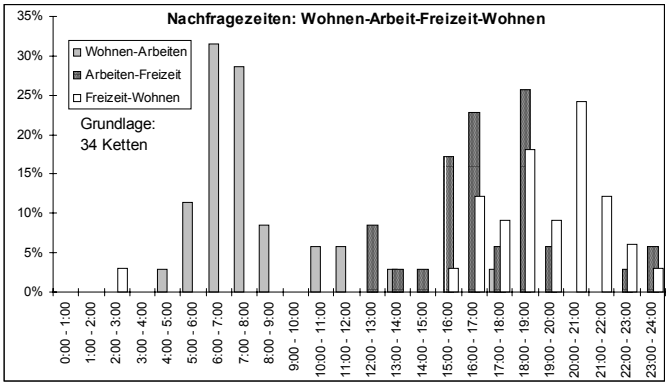


Abbildung A3 - 59: Startzeitverteilung für die Aktivitätenkette Wohnen-Arbeit-Freizeit-Wohnen in der Region Stuttgart.

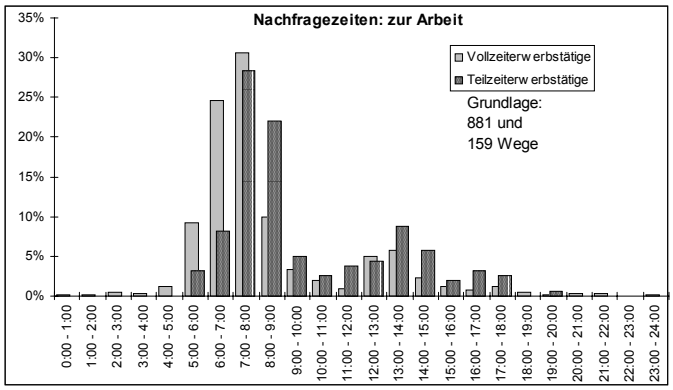


Abbildung A3 - 60: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zur Arbeit' in der Region Stuttgart nach Erwerbstätigkeit.

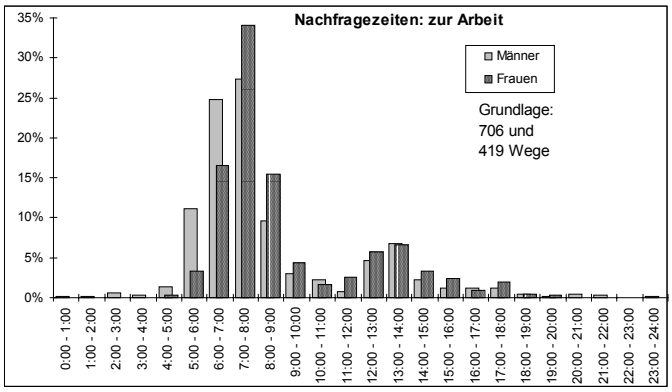


Abbildung A3 - 61: Startzeitverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zur Arbeit' in der Region Stuttgart nach Geschlecht.

1.2 Fahrtweiten

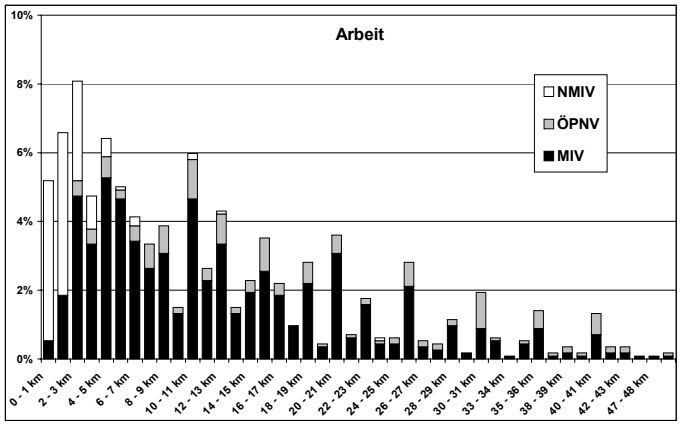


Abbildung A3 - 62: Fahrtweitenverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zur Arbeit' in Klassen von 1 km.

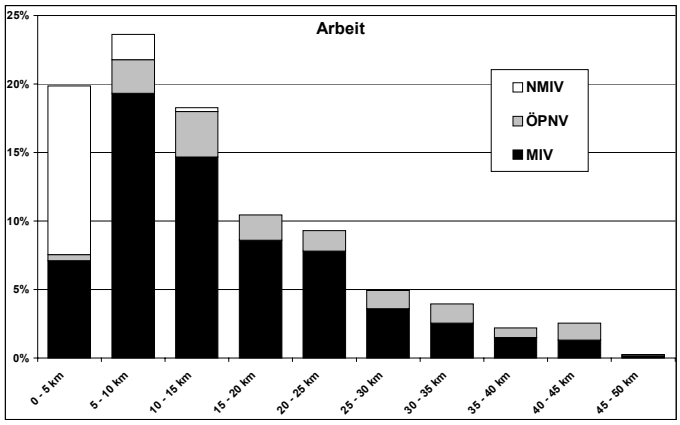


Abbildung A3 - 63: Fahrtweitenverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zur Arbeit' in Klassen von 5 km.

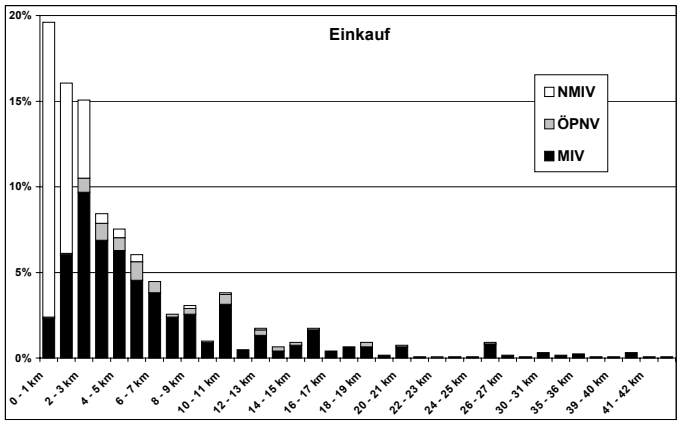


Abbildung A3 - 64: Fahrtweitenverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zum Einkaufen' in Klassen von 1 km.

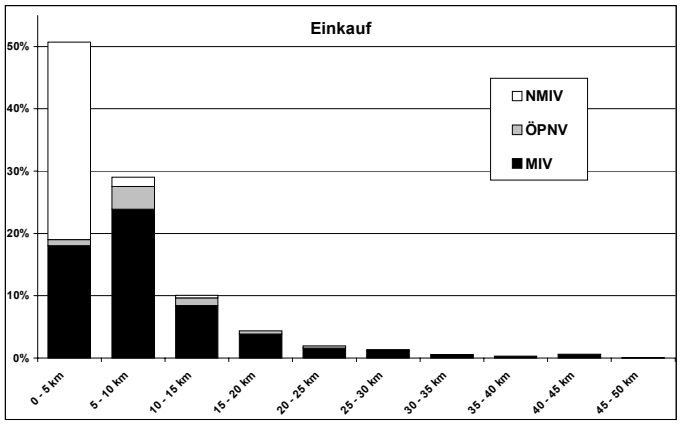


Abbildung A3 - 65: Fahrtweitenverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zum Einkaufen' in Klassen von 5 km.

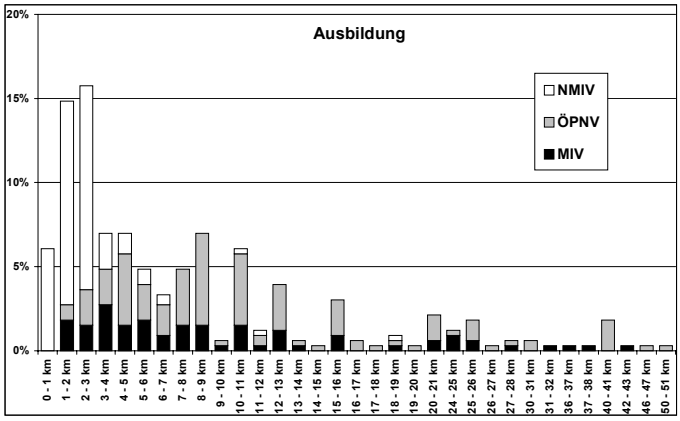


Abbildung A3 - 66: Fahrtweitenverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zur Ausbildung' in Klassen von 1 km.

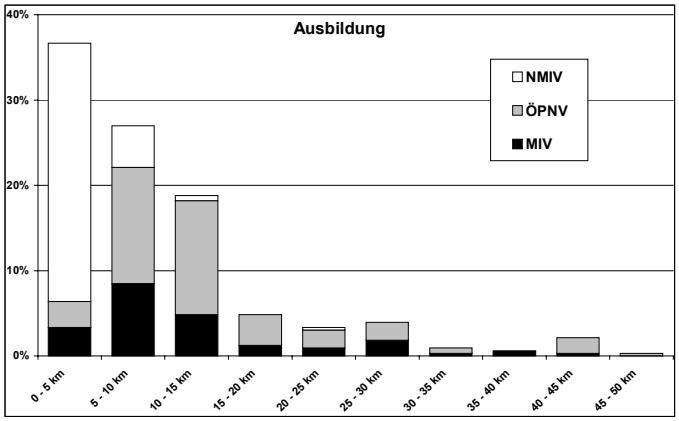


Abbildung A3 - 67: Fahrtweitenverteilung für den Aktivitätenübergang ‚zur Ausbildung' in Klassen von 5 km.

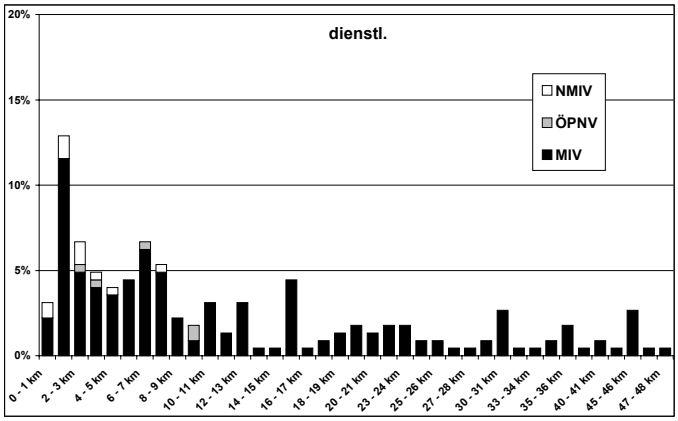


Abbildung A3 - 68: Fahrtweitenverteilung für den Aktivitätenübergang ‚Dienstliche Erledigung' in Klassen von 1 km.

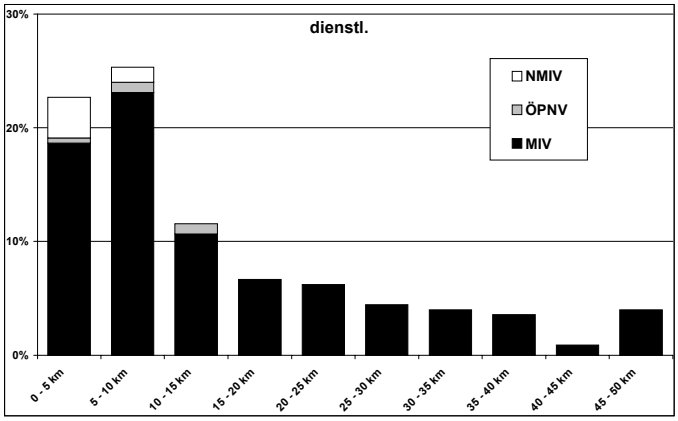


Abbildung A3 - 69: Fahrtweitenverteilung für den Aktivitätenübergang ‚Dienstliche Erledigung' in Klassen von 5 km.

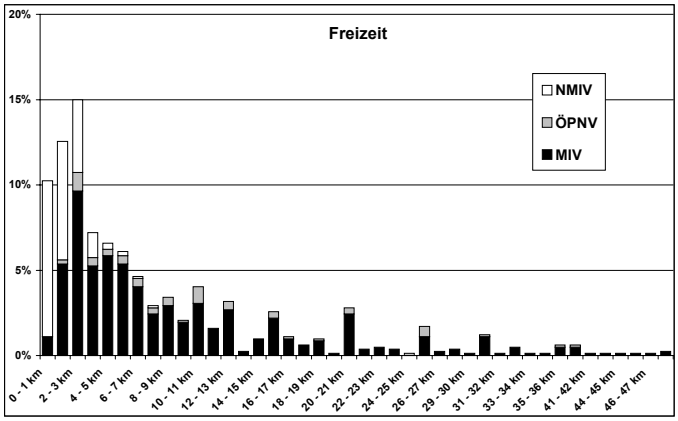


Abbildung A3 - 72: Fahrtweitenverteilung für den Aktivitätenübergang ‚Freizeit' in Klassen von 1 km.

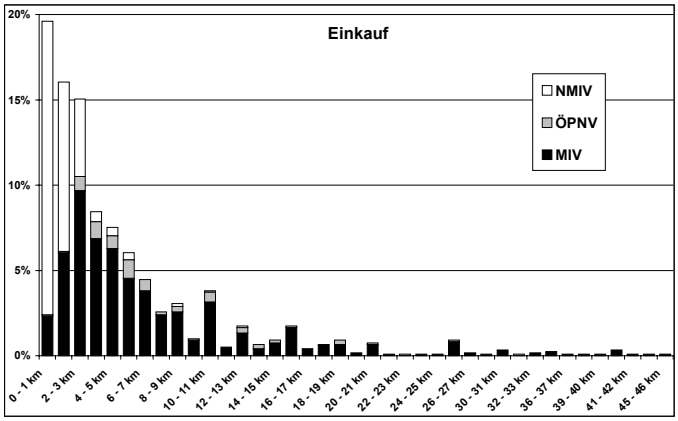


Abbildung A3 - 70: Fahrtweitenverteilung für den Aktivitätenübergang ‚Einkauf' in Klassen von 1 km.

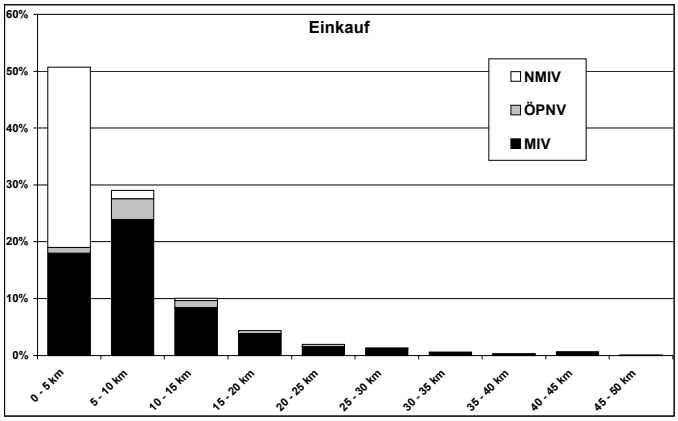


Abbildung A3 - 71: Fahrtweitenverteilung für den Aktivitätenübergang ‚Einkauf' in Klassen von 5 km.

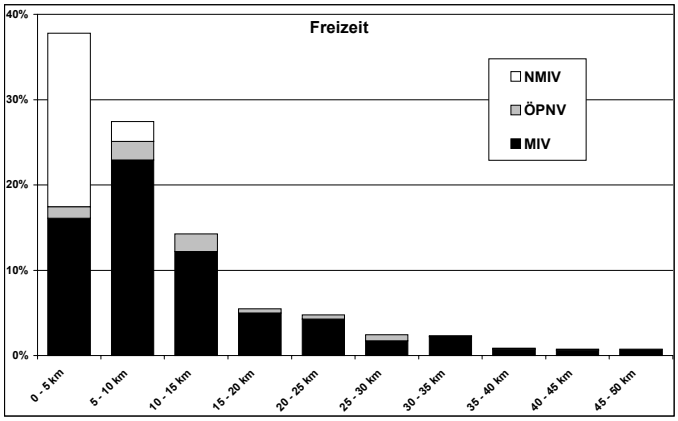


Abbildung A3 - 73: Fahrtweitenverteilung für den Aktivitätenübergang ‚Freizeit' in Klassen von 5 km.

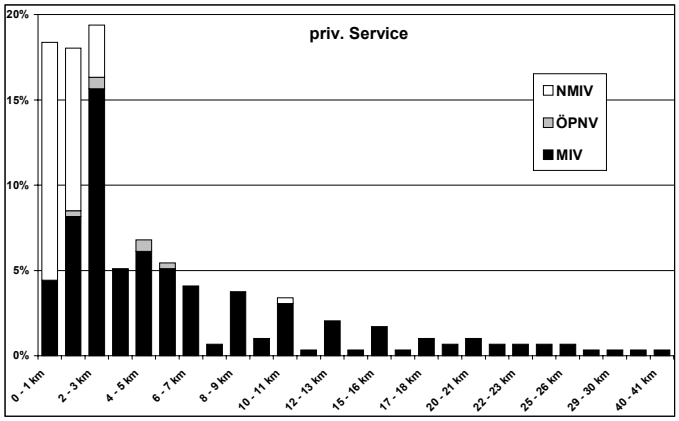


Abbildung A3 - 74: Fahrtweitenverteilung für den Aktivitätenübergang ‚priv. Service' in Klassen von 1 km.

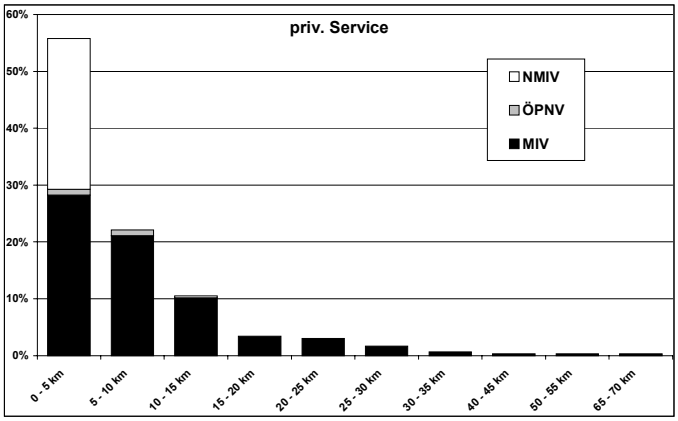


Abbildung A3 - 75: Fahrtweitenverteilung für den Aktivitätenübergang ‚priv. Service' in Klassen von 5 km.

1.3 Modal Split

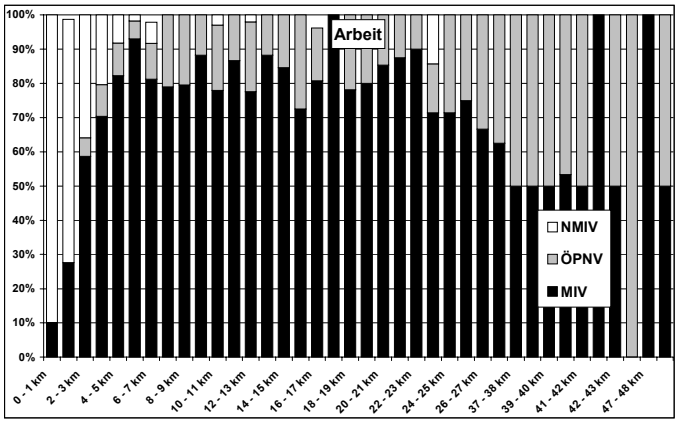


Abbildung A3 - 76: Modal Split für den Fahrtzweck 'Arbeit' in Klassen von 1 km in der Region Stuttgart.

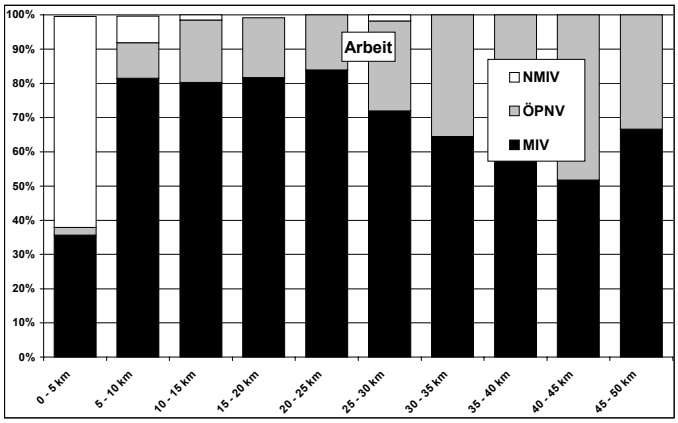


Abbildung A3 - 77: Modal Split für den Fahrtzweck 'Arbeit' in Klassen von 5 km in der Region Stuttgart.

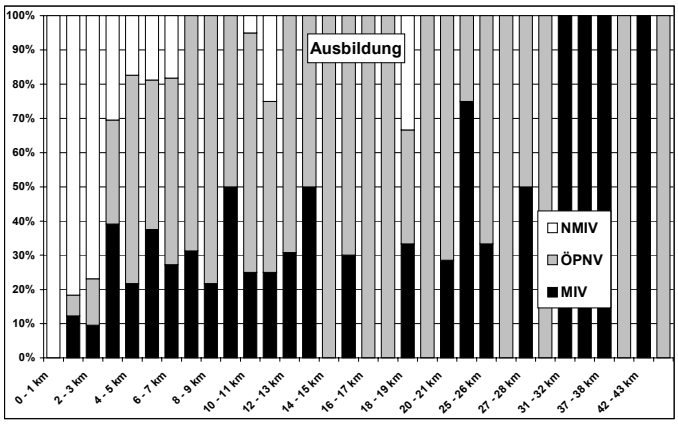


Abbildung A3 - 78: Modal Split für den Fahrtzweck 'Ausbildung' in Klassen von 1 km in der Region Stuttgart.

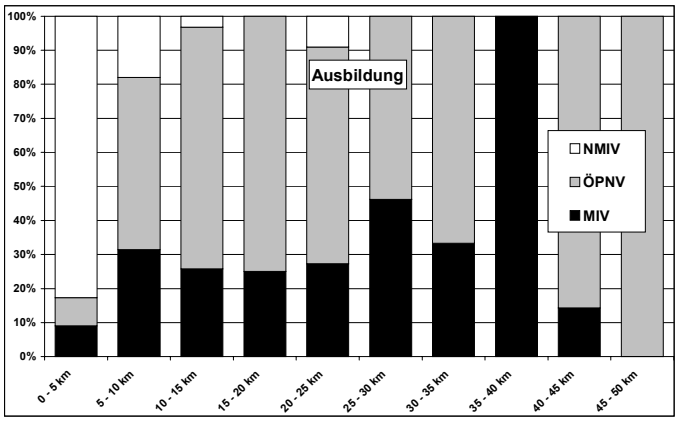


Abbildung A3 - 79: Modal Split für den Fahrtzweck 'Ausbildung' in Klassen von 5 km in der Region Stuttgart.

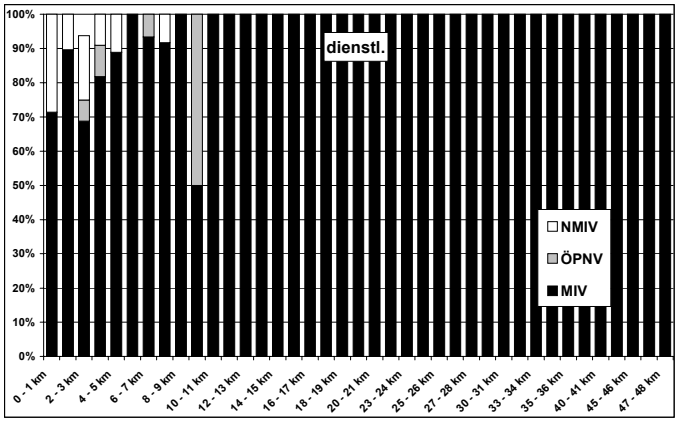


Abbildung A3 - 80: Modal Split für den Fahrtzweck 'Dienstliche Erledigung' in Klassen von 1 km in der Region Stuttgart.

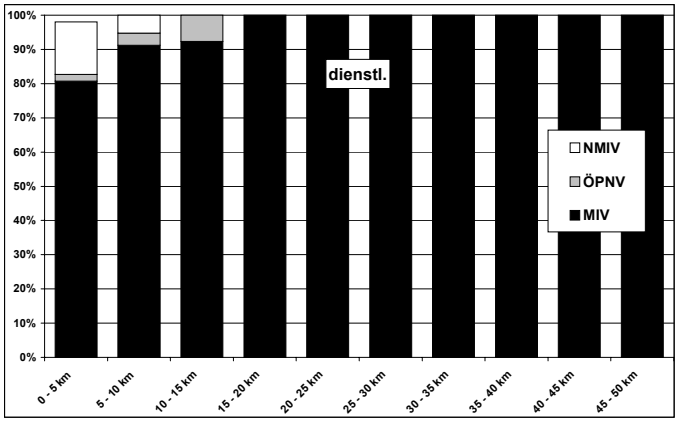


Abbildung A3 - 81: Modal Split für den Fahrtzweck 'Dienstliche Erledigung' in Klassen von 5 km in der Region Stuttgart.

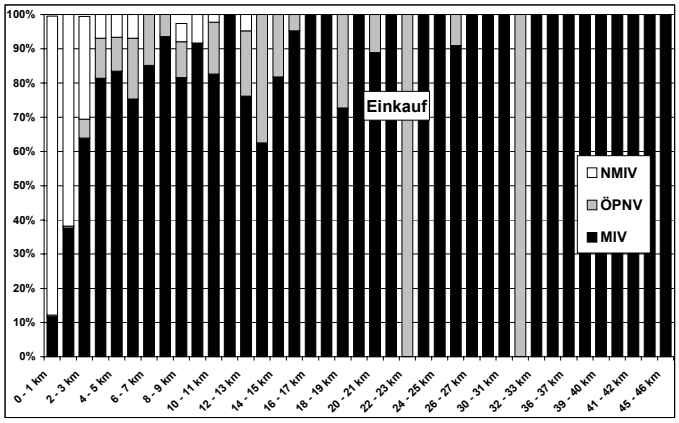


Abbildung A3 - 82: Modal Split für den Fahrtzweck 'Einkauf' in Klassen von 1 km in der Region Stuttgart.

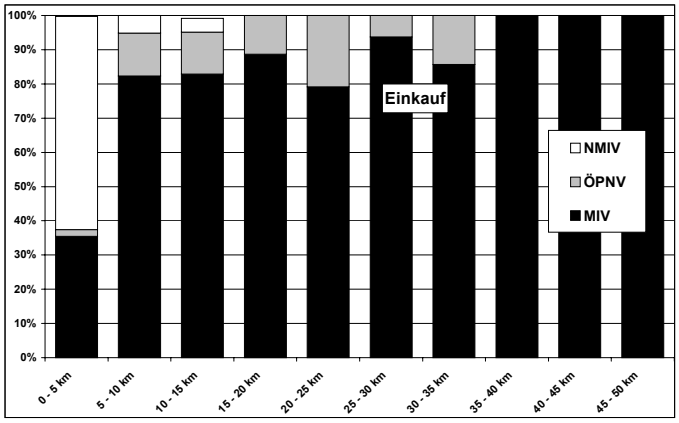


Abbildung A3 - 83: Modal Split für den Fahrtzweck 'Einkauf' in Klassen von 5 km in der Region Stuttgart.

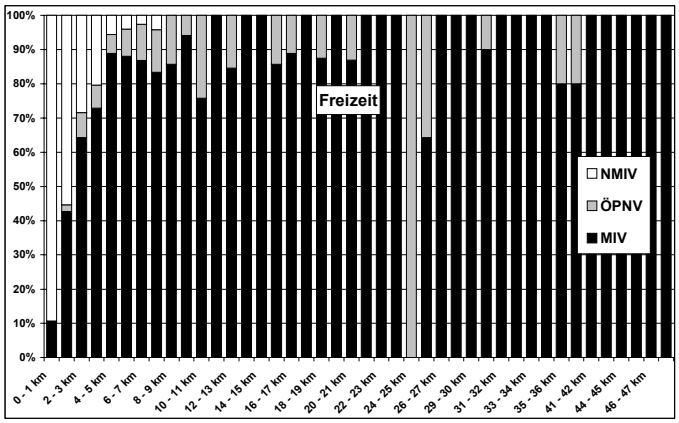


Abbildung A3 - 84: Modal Split für den Fahrtzweck 'Freizeit' in Klassen von 1 km in der Region Stuttgart.

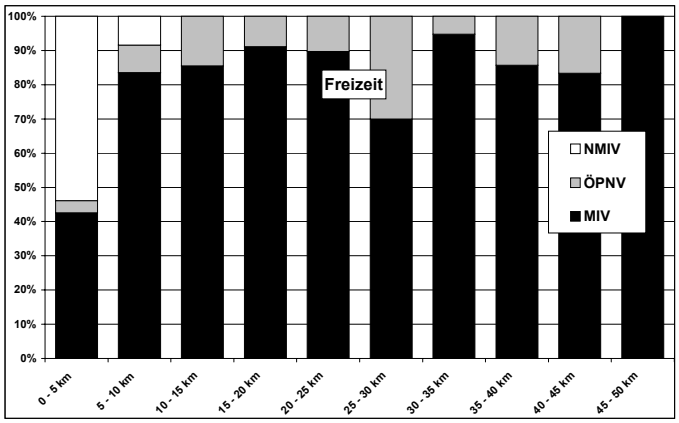


Abbildung A3 - 85: Modal Split für den Fahrtzweck 'Freizeit' in Klassen von 5 km in der Region Stuttgart.

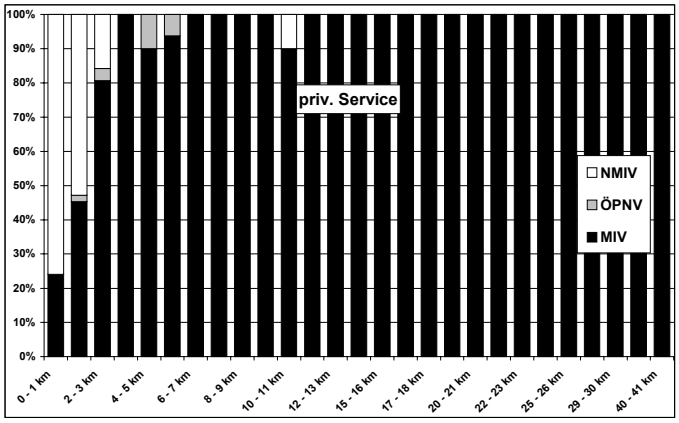


Abbildung A3 - 86: Modal Split für den Fahrtzweck 'priv. Service' in Klassen von 1 km in der Region Stuttgart.

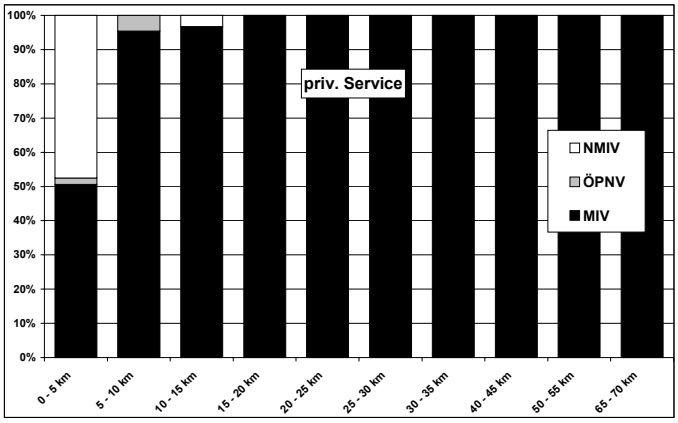


Abbildung A3 - 87: Modal Split für den Fahrtzweck 'priv. Service' in Klassen von 5 km in der Region Stuttgart.

2 KONTIV '89

2.1 Nachfragezeit

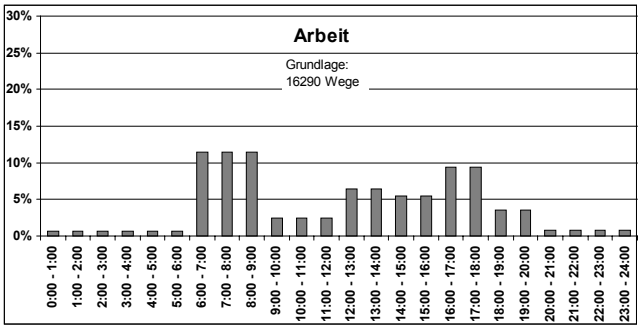


Abbildung A3 - 88: Verteilung der Fahrtzeitpunkte für die Aktivität 'Arbeit' nach KONTIV '89 Tabelle 29

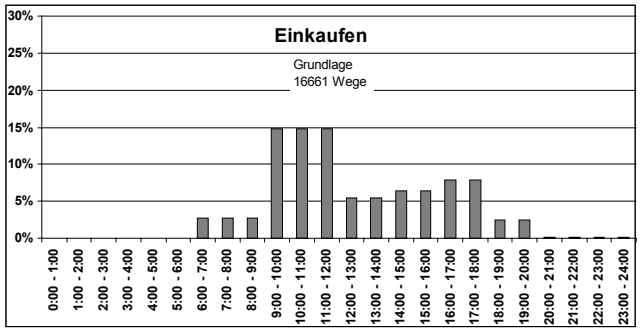


Abbildung A3 - 89: Verteilung der Fahrtzeitpunkte für die Aktivität 'Einkaufen' nach KONTIV '89 Tabelle 29

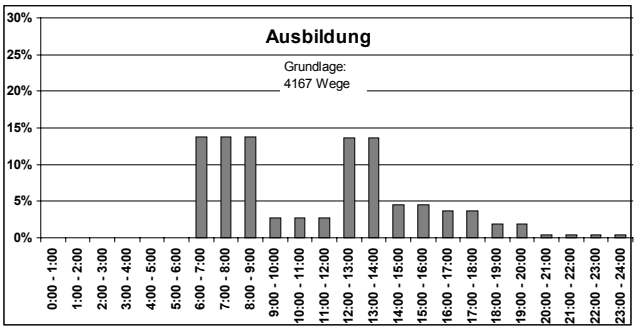


Abbildung A3 - 90: Verteilung der Fahrtzeitpunkte für die Aktivität 'Ausbildung' nach KONTIV '89 Tabelle 29

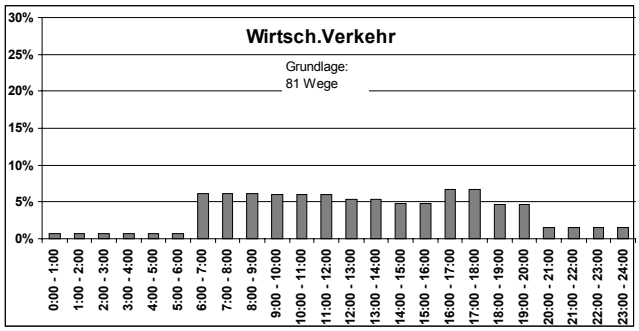


Abbildung A3 - 91: Verteilung der Fahrtzeitpunkte für die Aktivität 'Wirtsch.Verk.' nach KONTIV '89 Tabelle 29

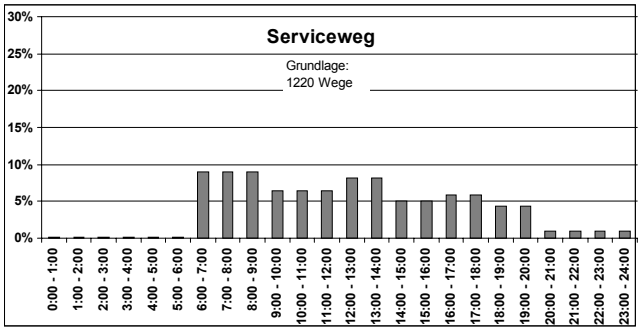


Abbildung A3 - 92: Verteilung der Fahrtzeitpunkte für die Aktivität 'Service' nach KONTIV '89 Tabelle 29

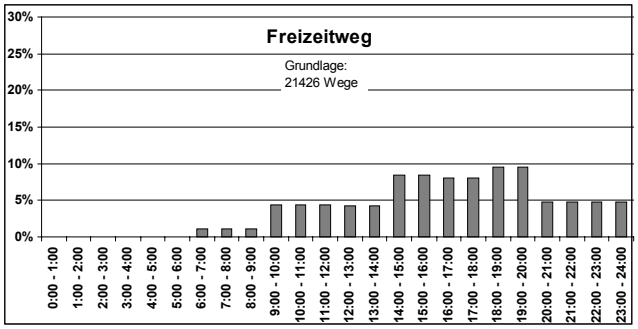


Abbildung A3 - 93: Verteilung der Fahrtzeitpunkte für die Aktivität 'Freizeit' nach KONTIV '89 Tabelle 29

2.2 Fahrtweiten

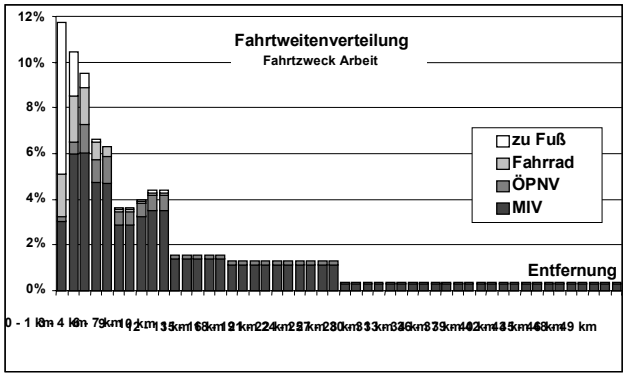


Abbildung A3 - 94: Fahrtweitenverteilung für den Fahrtzweck 'Arbeit' in Klassen von 1 km nach KONTIV '89 Tabelle 35.

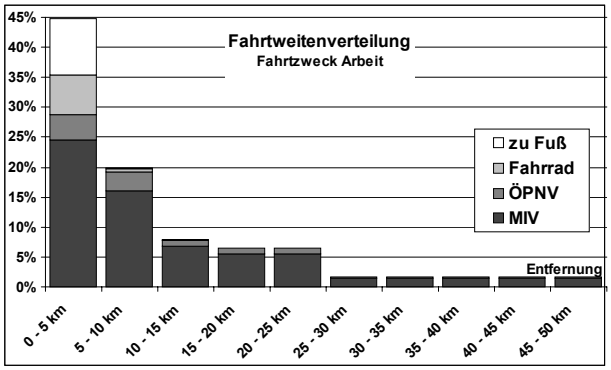


Abbildung A3 - 95: Fahrtweitenverteilung für den Fahrtzweck 'Arbeit' in Klassen von 5 km nach KONTIV '89 Tabelle 35.

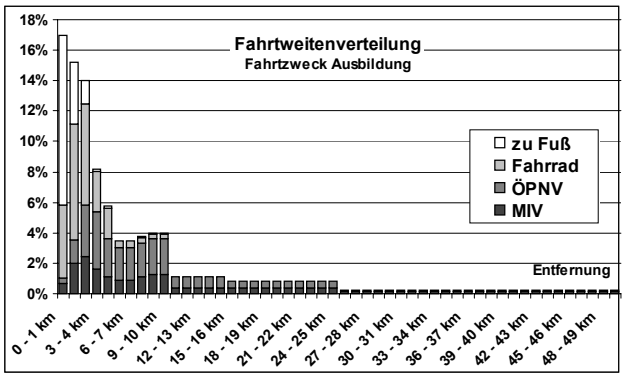


Abbildung A3 - 96: Fahrtweitenverteilung für den Fahrtzweck 'Ausbildung' in Klassen von 1 km nach KONTIV '89 Tabelle 35.

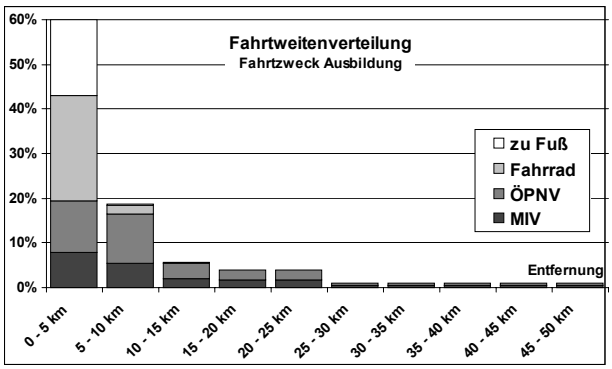


Abbildung A3 - 97: Fahrtweitenverteilung für den Fahrtzweck 'Ausbildung' in Klassen von 5 km nach KONTIV '89 Tabelle 35.

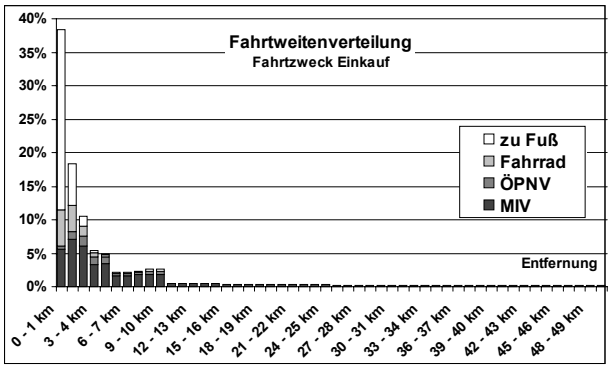


Abbildung A3 - 98: Fahrtweitenverteilung für den Fahrtzweck 'Einkauf' in Klassen von 1 km nach KONTIV '89 Tabelle 35.

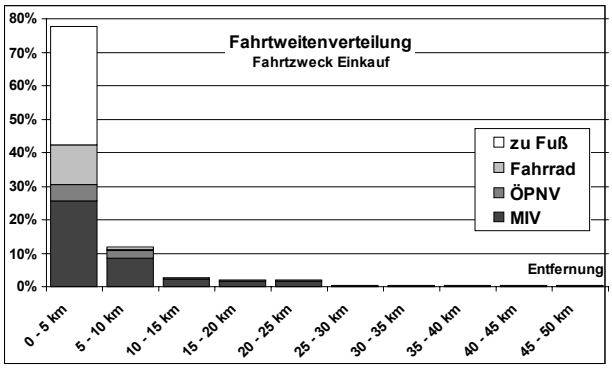


Abbildung A3 - 99: Fahrtweitenverteilung für den Fahrtzweck 'Einkauf' in Klassen von 5 km nach KONTIV '89 Tabelle 35.

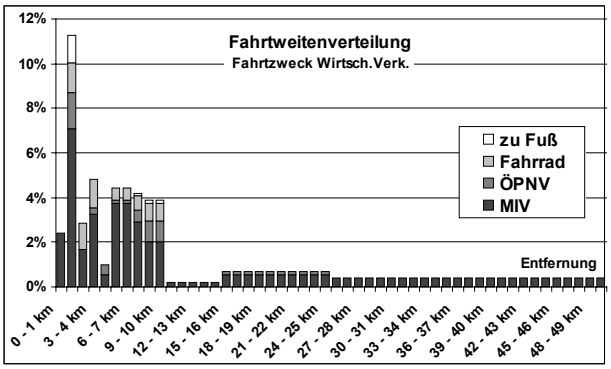


Abbildung A3 - 100: Fahrtweitenverteilung für den Fahrtzweck 'Wirtsch.Verk.' in Klassen von 1 km nach KONTIV '89 Tabelle 35.

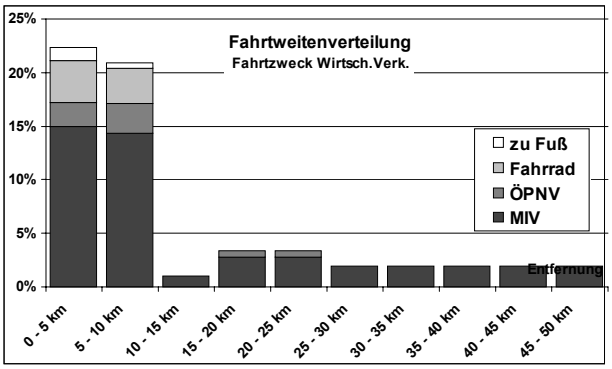


Abbildung A3 - 101: Fahrtweitenverteilung für den Fahrtzweck 'Wirtsch.Verk.' in Klassen von 5 km nach KONTIV '89 Tabelle 35.

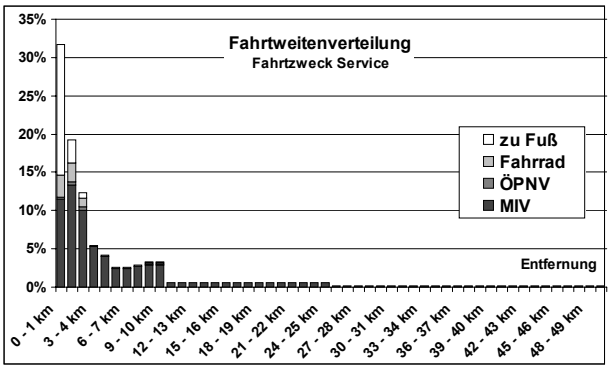


Abbildung A3 - 102: Fahrtweitenverteilung für den Fahrtzweck 'Service' in Klassen von 1 km nach KONTIV '89 Tabelle 35.

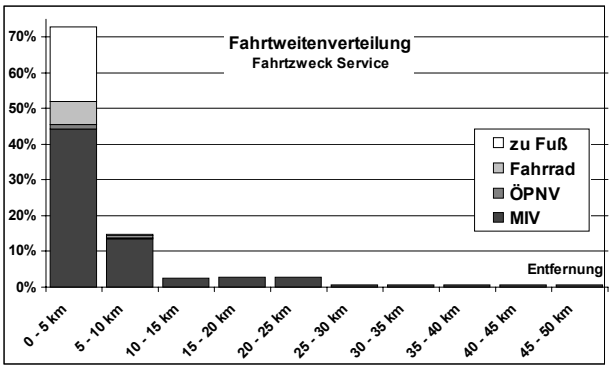


Abbildung A3 - 103: Fahrtweitenverteilung für den Fahrtzweck 'Service' in Klassen von 5 km nach KONTIV '89 Tabelle 35.

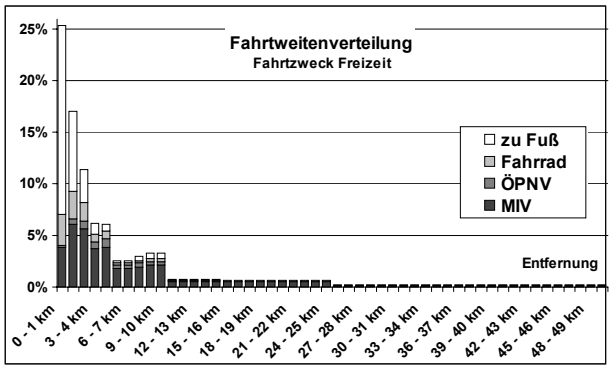


Abbildung A3 - 104: Fahrtweitenverteilung für den Fahrtzweck 'Freizeit' in Klassen von 1 km nach KONTIV '89 Tabelle 35.

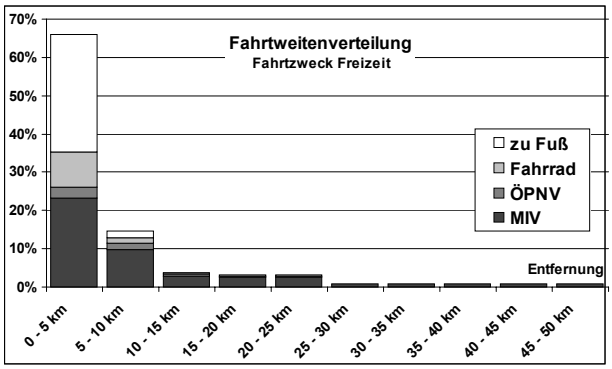


Abbildung A3 - 105: Fahrtweitenverteilung für den Fahrtzweck 'Freizeit' in Klassen von 5 km nach KONTIV '89 Tabelle 35.

2.3 Modal Split

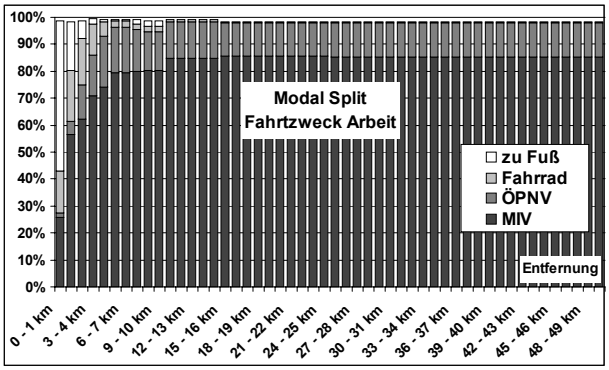


Abbildung A3 - 106: Modal Split für den Fahrtzweck 'Arbeit' in Klassen von 1 km nach KONTIV '89 Tabelle 35.

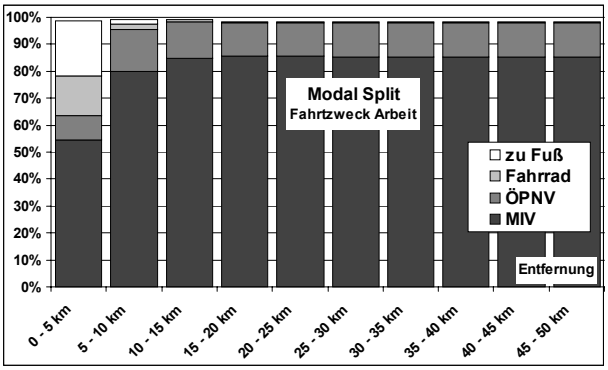


Abbildung A3 - 107: Modal Split für den Fahrtzweck 'Arbeit' in Klassen von 5 km nach KONTIV '89 Tabelle 35.

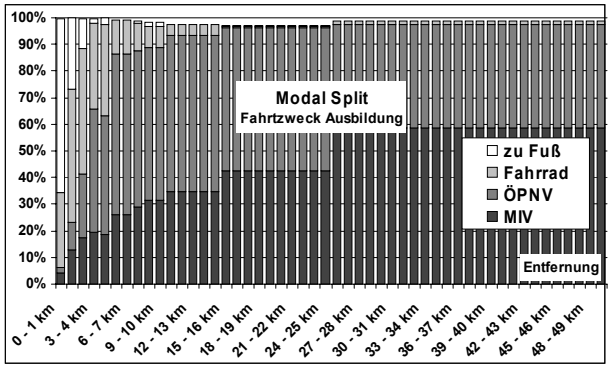


Abbildung A3 - 108: Modal Split für den Fahrtzweck 'Ausbildung' in Klassen von 1 km nach KONTIV '89 Tabelle 35.

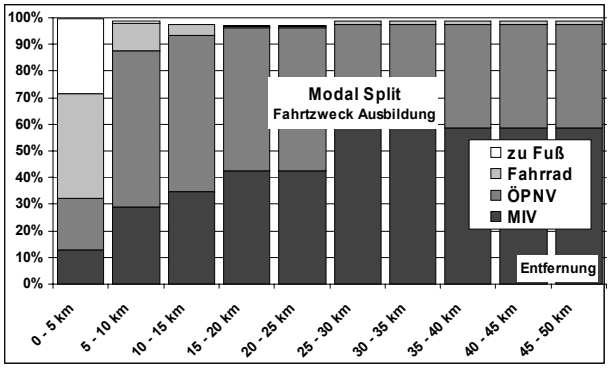


Abbildung A3 - 109: Modal Split für den Fahrtzweck 'Ausbildung' in Klassen von 5 km nach KONTIV '89 Tabelle 35.

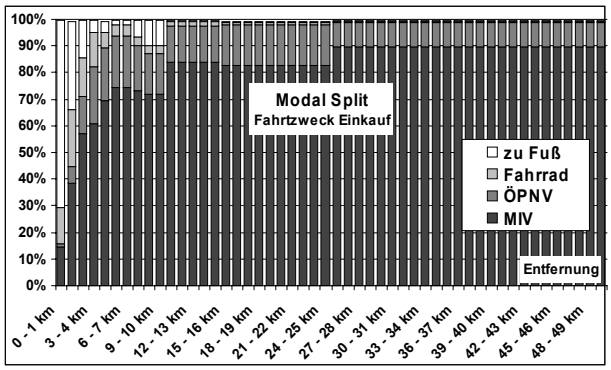


Abbildung A3 - 110: Modal Split für den Fahrtzweck 'Einkaufen' in Klassen von 1 km nach KONTIV '89 Tabelle 35.

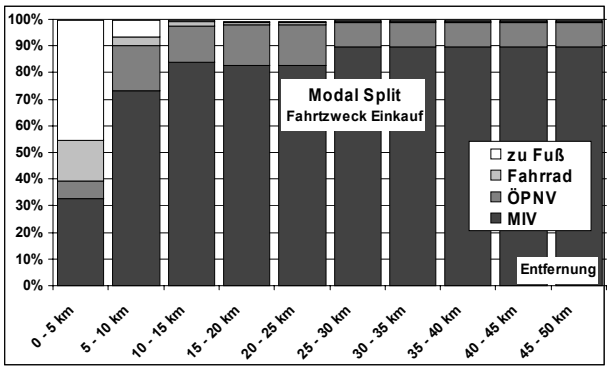


Abbildung A3 - 111: Modal Split für den Fahrtzweck 'Einkaufen' in Klassen von 5 km nach KONTIV '89 Tabelle 35.

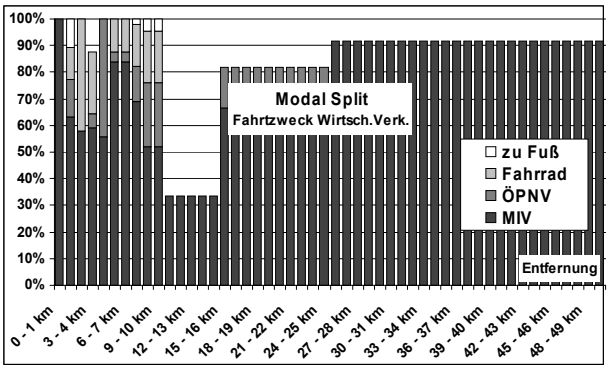


Abbildung A3 - 112: Modal Split für den Fahrtzweck 'Wirtschaftsverkehr' in Klassen von 1 km nach KONTIV '89 Tabelle 35.

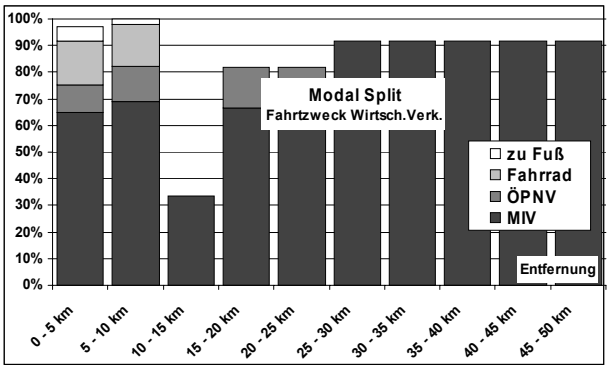


Abbildung A3 - 113: Modal Split für den Fahrtzweck 'Wirtschaftsverkehr' in Klassen von 5 km nach KONTIV '89 Tabelle 35.

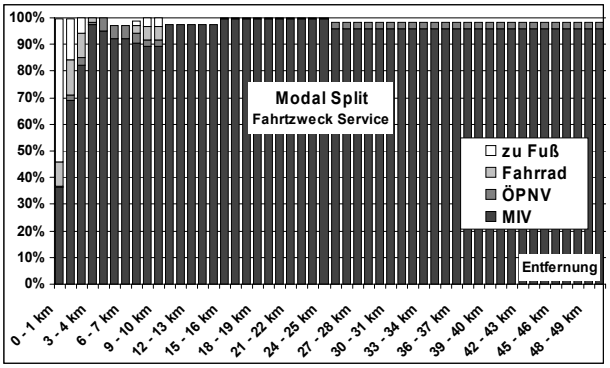


Abbildung A3 - 114: Modal Split für den Fahrtzweck 'Service' in Klassen von 1 km nach KONTIV '89 Tabelle 35.

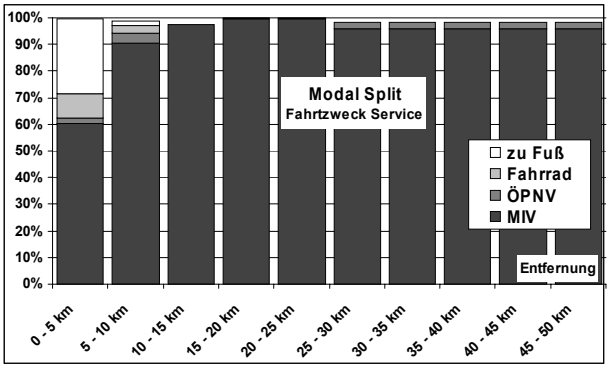


Abbildung A3 - 115: Modal Split für den Fahrtzweck 'Service' in Klassen von 5 km nach KONTIV '89 Tabelle 35.

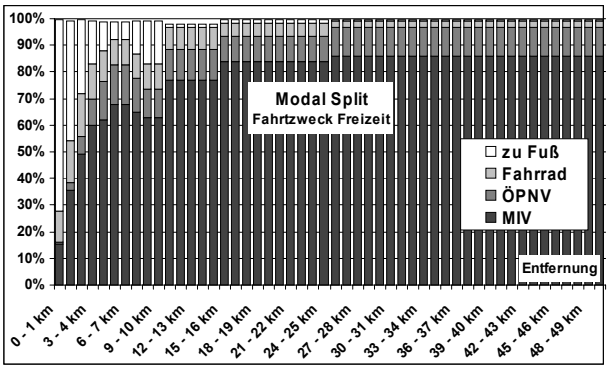


Abbildung A3 - 116: Modal Split für den Fahrtzweck 'Freizeit' in Klassen von 1 km nach KONTIV '89 Tabelle 35.

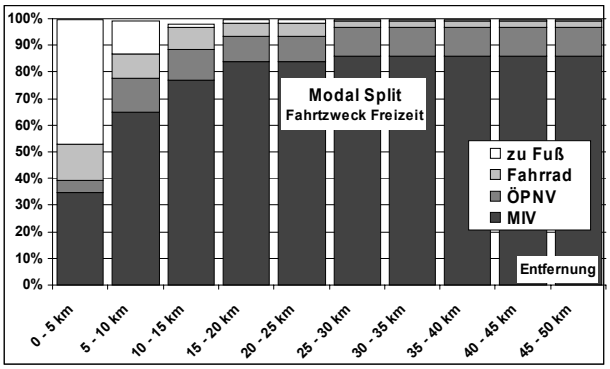


Abbildung A3 - 117: Modal Split für den Fahrtzweck 'Freizeit' in Klassen von 5 km nach KONTIV '89 Tabelle 35.

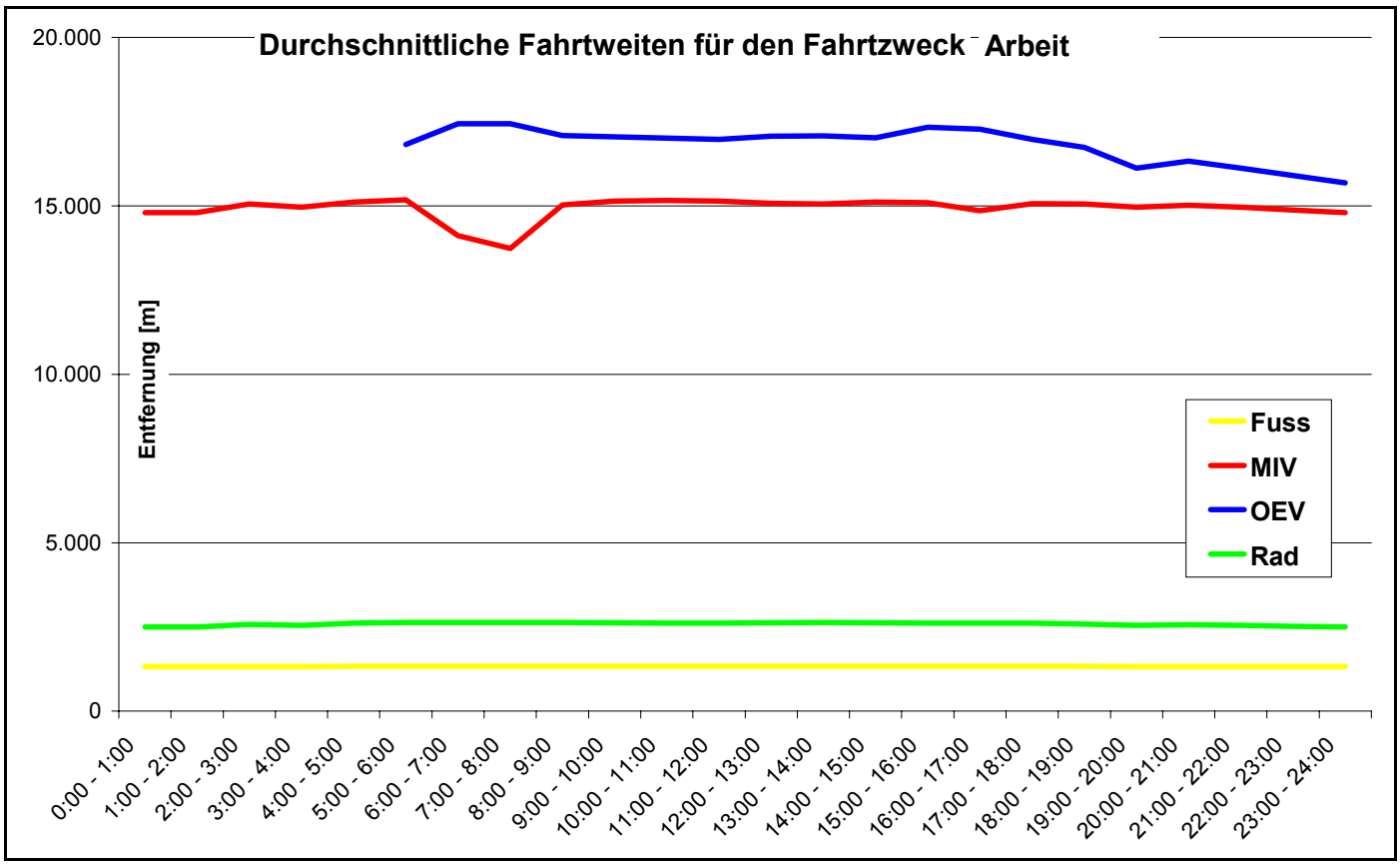


Abbildung A4 - 1: *Durchschnittliche Fahrtweiten für den Fahrtzweck Arbeit, differenziert nach Zeitintervallen und Verkehrsmitteln; alle Fahrten in der Region Stuttgart; Bezugsszenario*

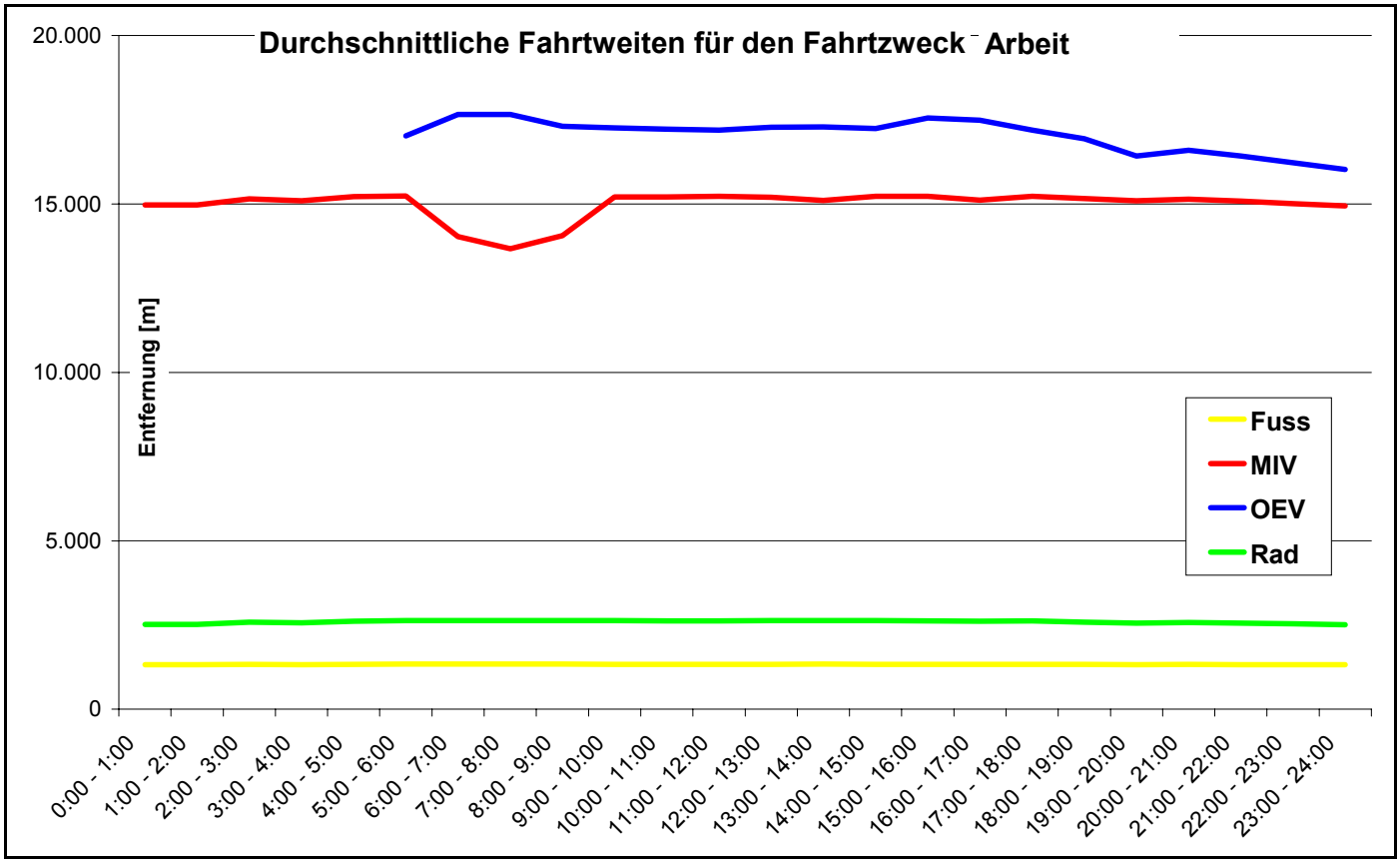


Abbildung A4 - 2: *Durchschnittliche Fahrtweiten für den Fahrtzweck Arbeit, differenziert nach Zeitintervallen und Verkehrsmitteln; alle Fahrten in der Region Stuttgart; Maßnahmeszenario*

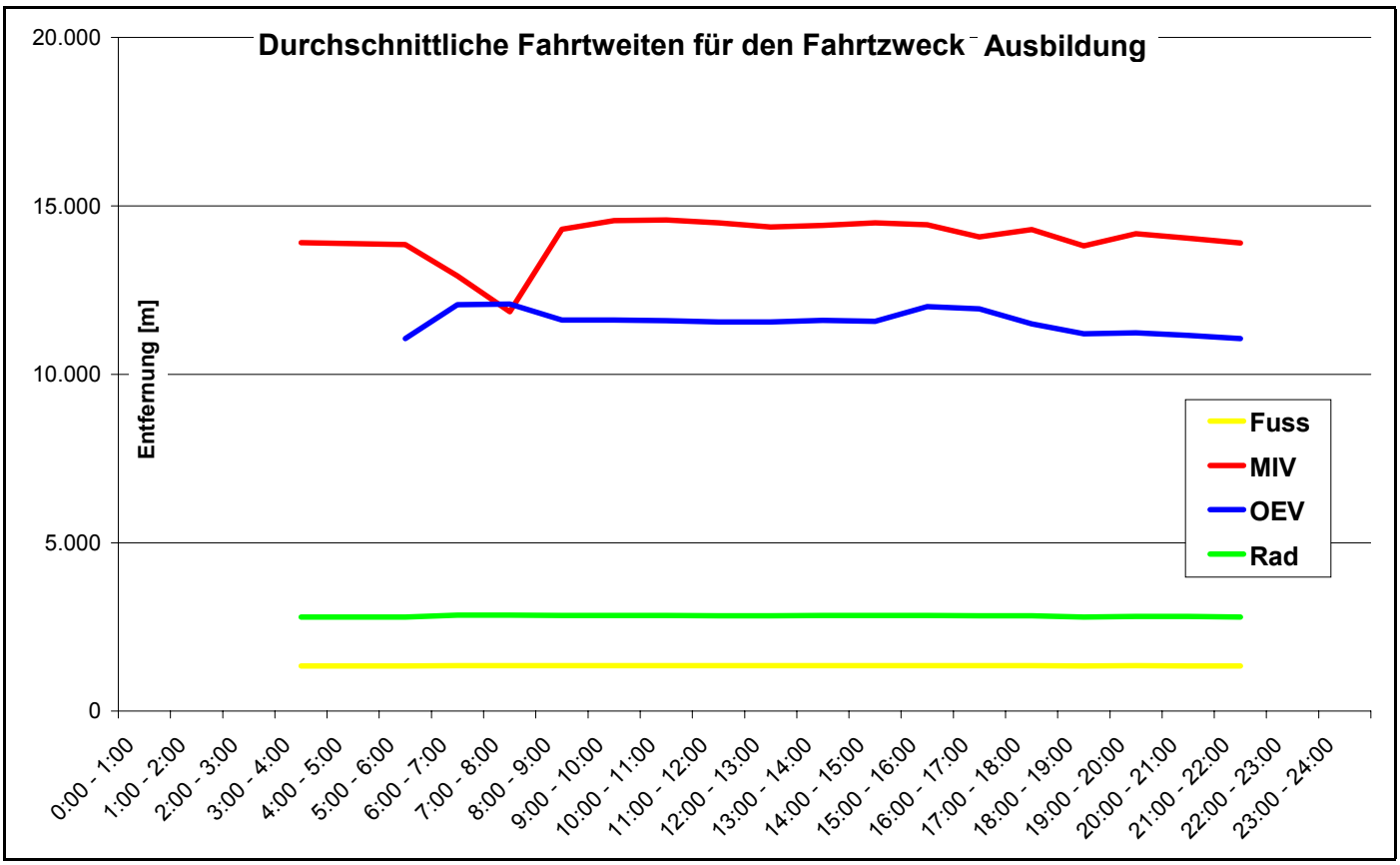


Abbildung A4 - 3: *Durchschnittliche Fahrtweiten für den Fahrtzweck Ausbildung, differenziert nach Zeitintervallen und Verkehrsmitteln; alle Fahrten in der Region Stuttgart; Bezugsszenario*

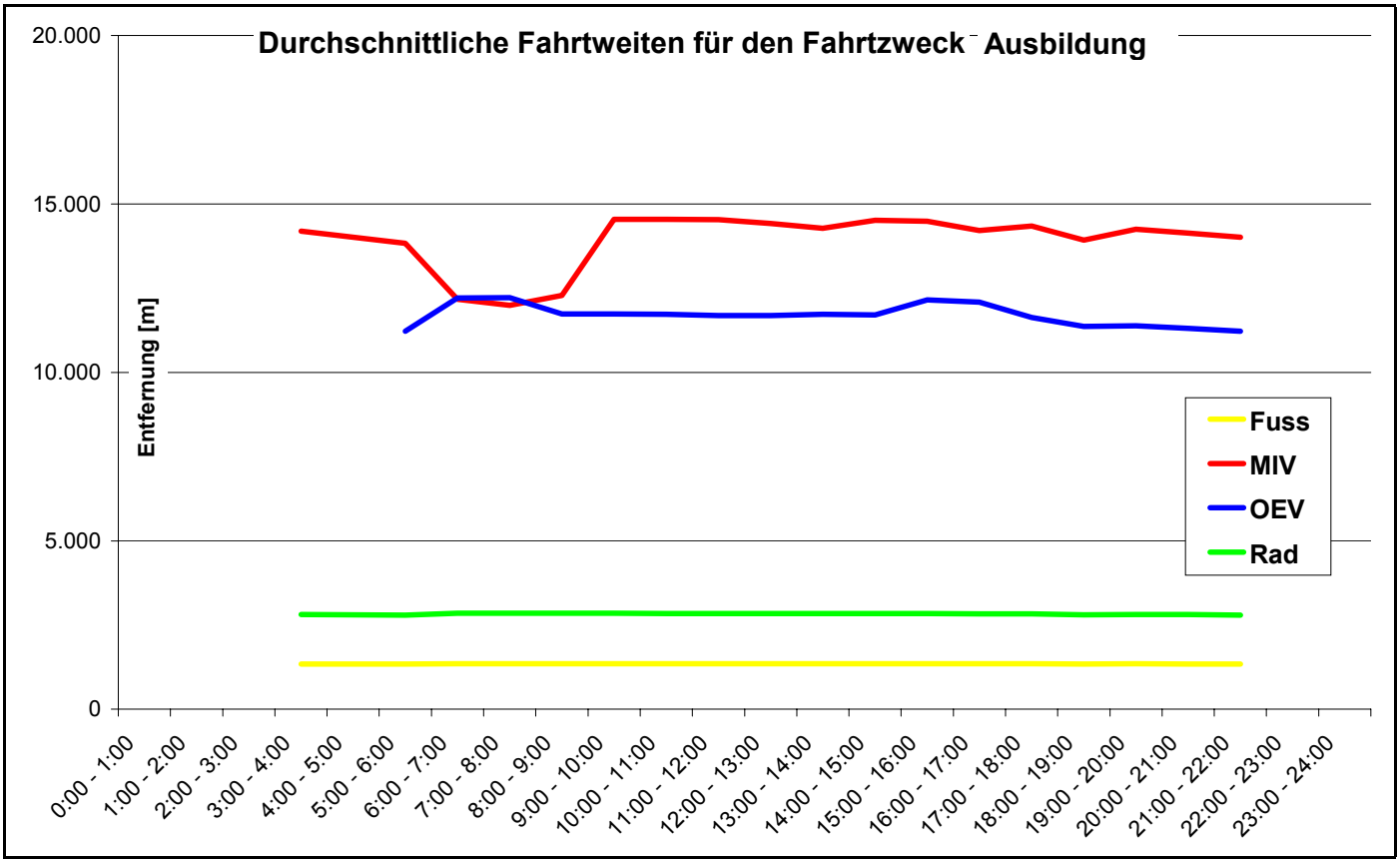


Abbildung A4 - 4: *Durchschnittliche Fahrtweiten für den Fahrtzweck Ausbildung, differenziert nach Zeitintervallen und Verkehrsmitteln; alle Fahrten in der Region Stuttgart; Maßnahmeszenario*

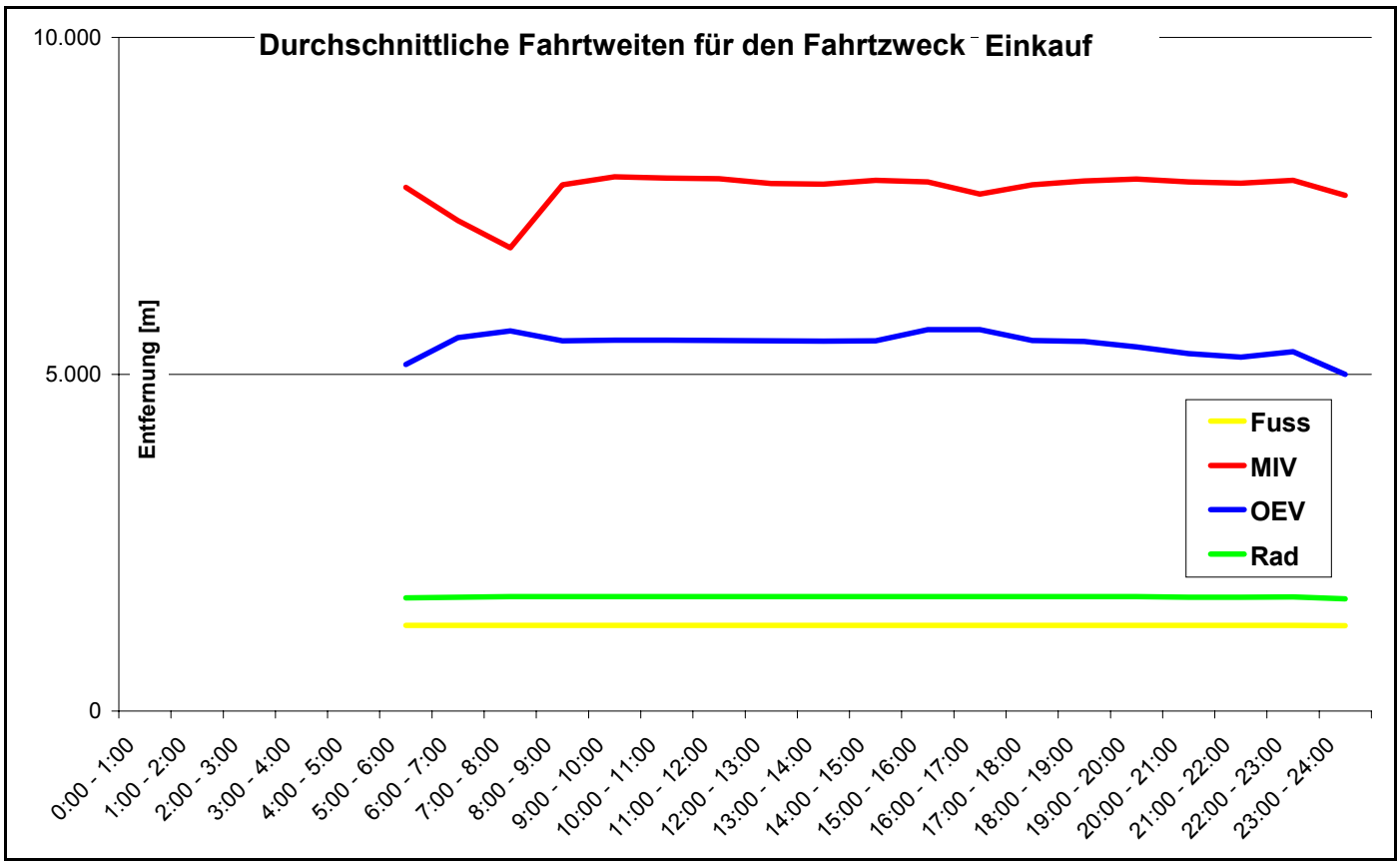


Abbildung A4 - 5: *Durchschnittliche Fahrtweiten für den Fahrtzweck Einkauf, differenziert nach Zeitintervallen und Verkehrsmitteln; alle Fahrten in der Region Stuttgart; Bezugsszenario*

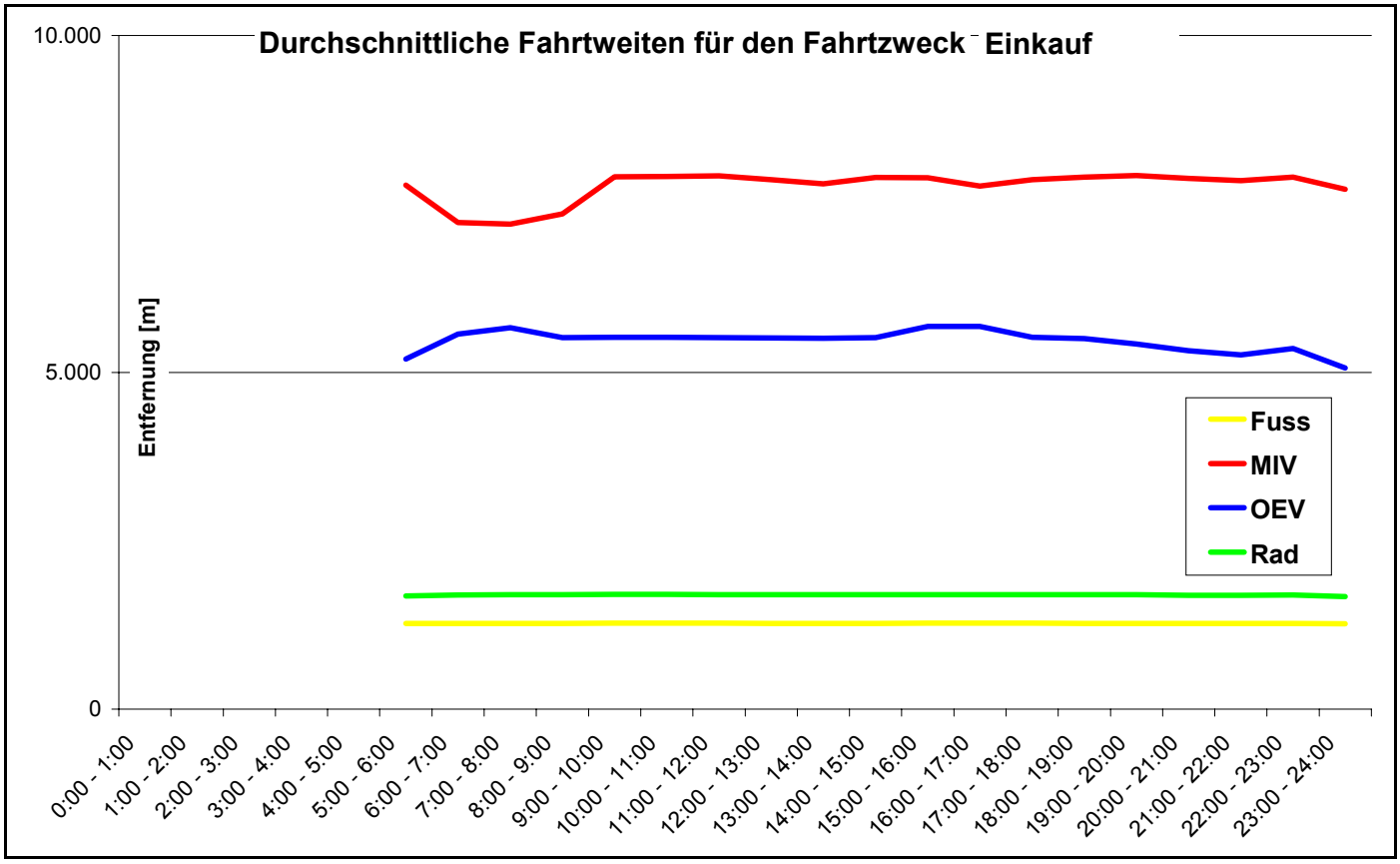


Abbildung A4 - 6: *Durchschnittliche Fahrtweiten für den Fahrtzweck Einkauf, differenziert nach Zeitintervallen und Verkehrsmitteln; alle Fahrten in der Region Stuttgart; Maßnahmeszenario*

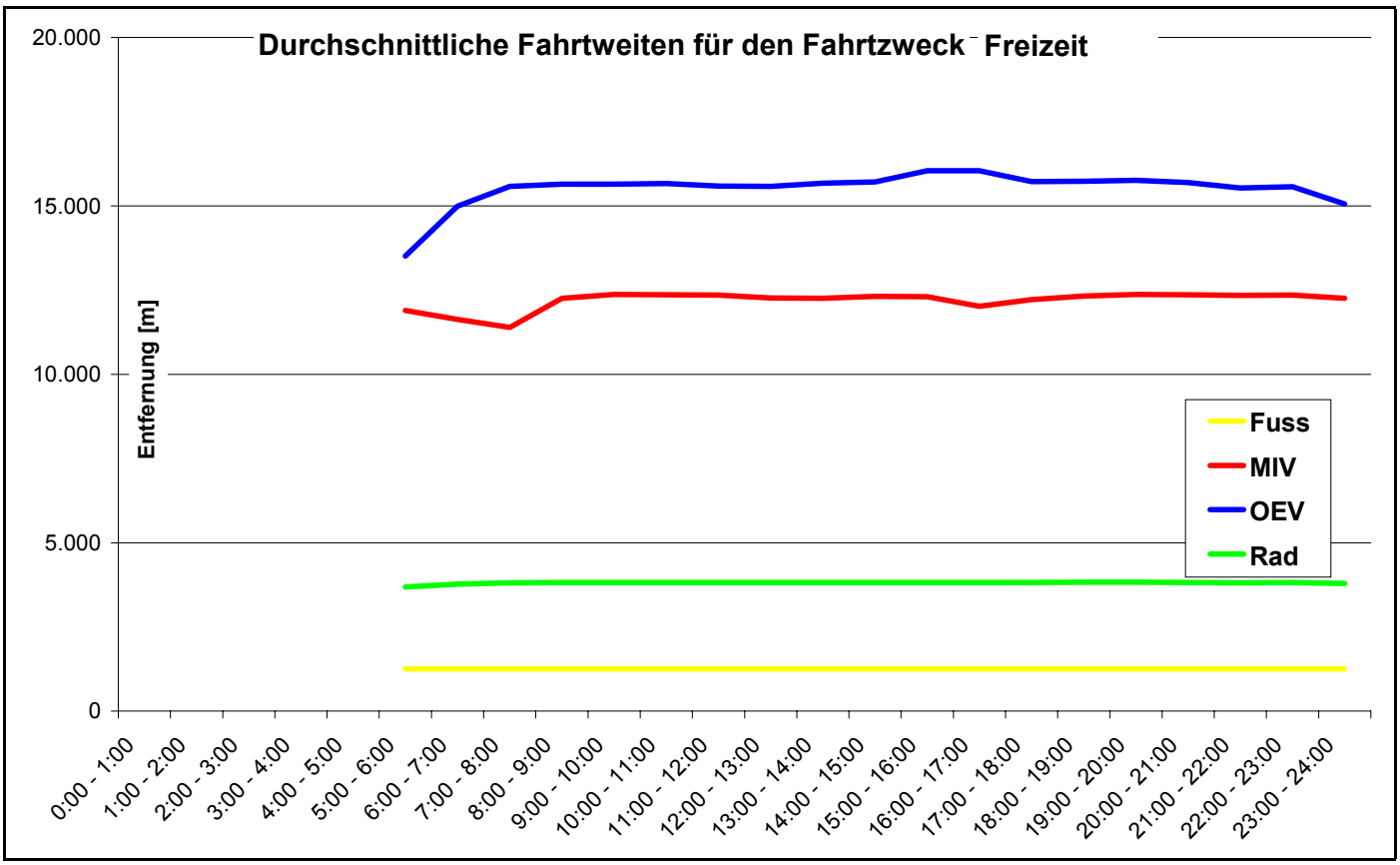


Abbildung A4 - 7: *Durchschnittliche Fahrtweiten für den Fahrtzweck Freizeit, differenziert nach Zeitintervallen und Verkehrsmitteln; alle Fahrten in der Region Stuttgart; Bezugsszenario*

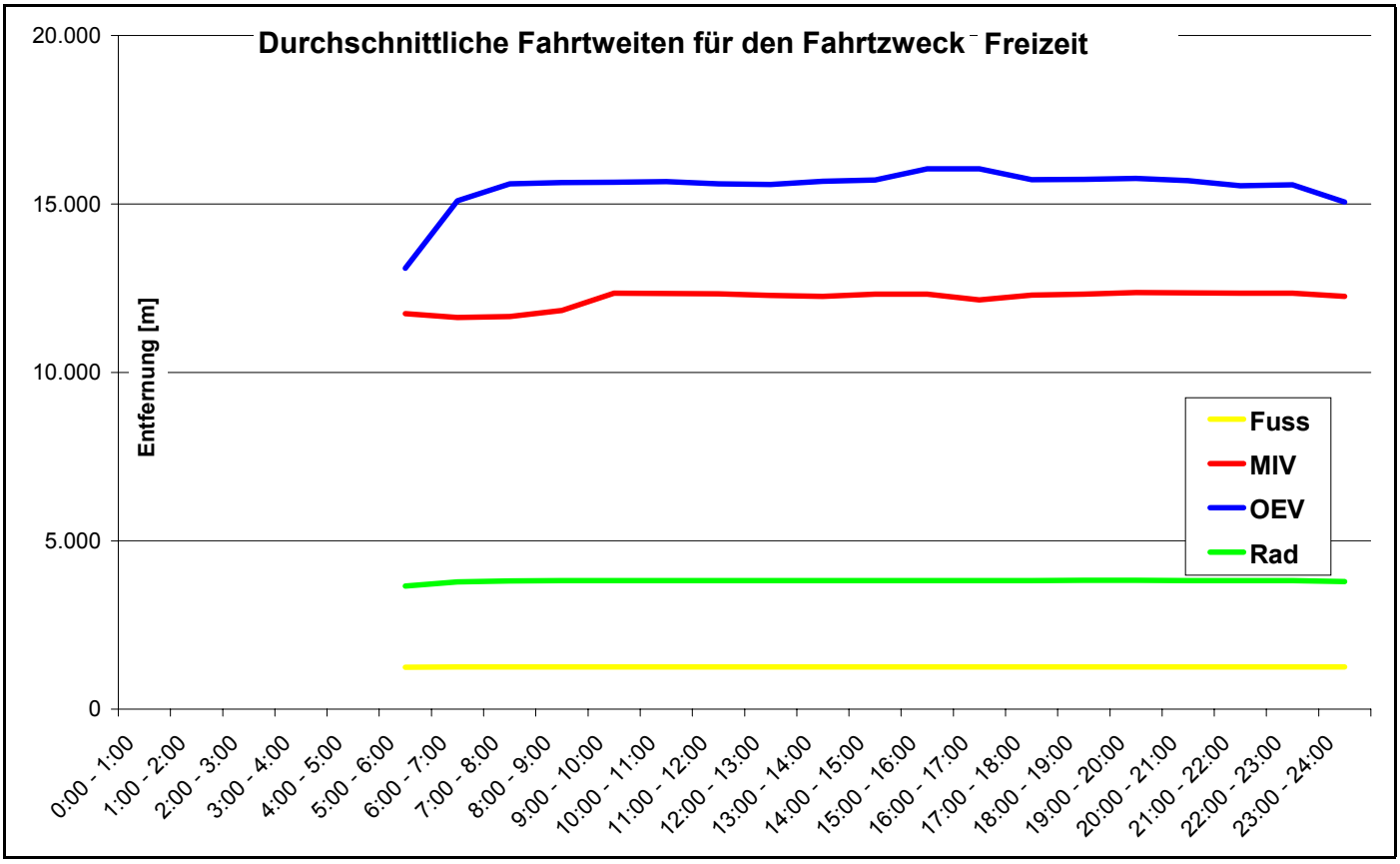


Abbildung A4 - 8: *Durchschnittliche Fahrtweiten für den Fahrtzweck Freizeit, differenziert nach Zeitintervallen und Verkehrsmitteln; alle Fahrten in der Region Stuttgart; Maßnahmeszenario*

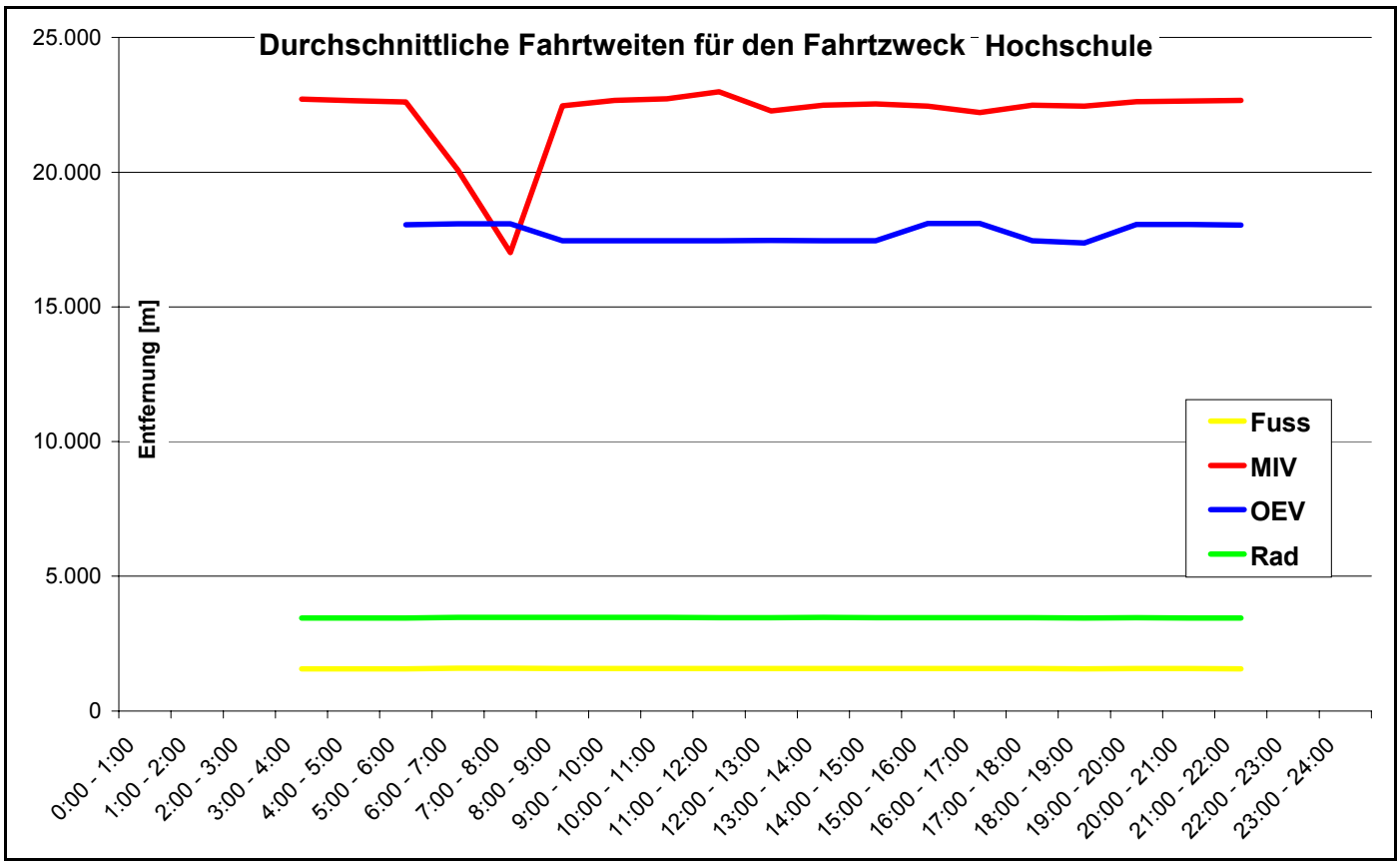


Abbildung A4 - 9: *Durchschnittliche Fahrtweiten für den Fahrtzweck Hochschule, differenziert nach Zeitintervallen und Verkehrsmitteln; alle Fahrten in der Region Stuttgart; Bezugsszenario*

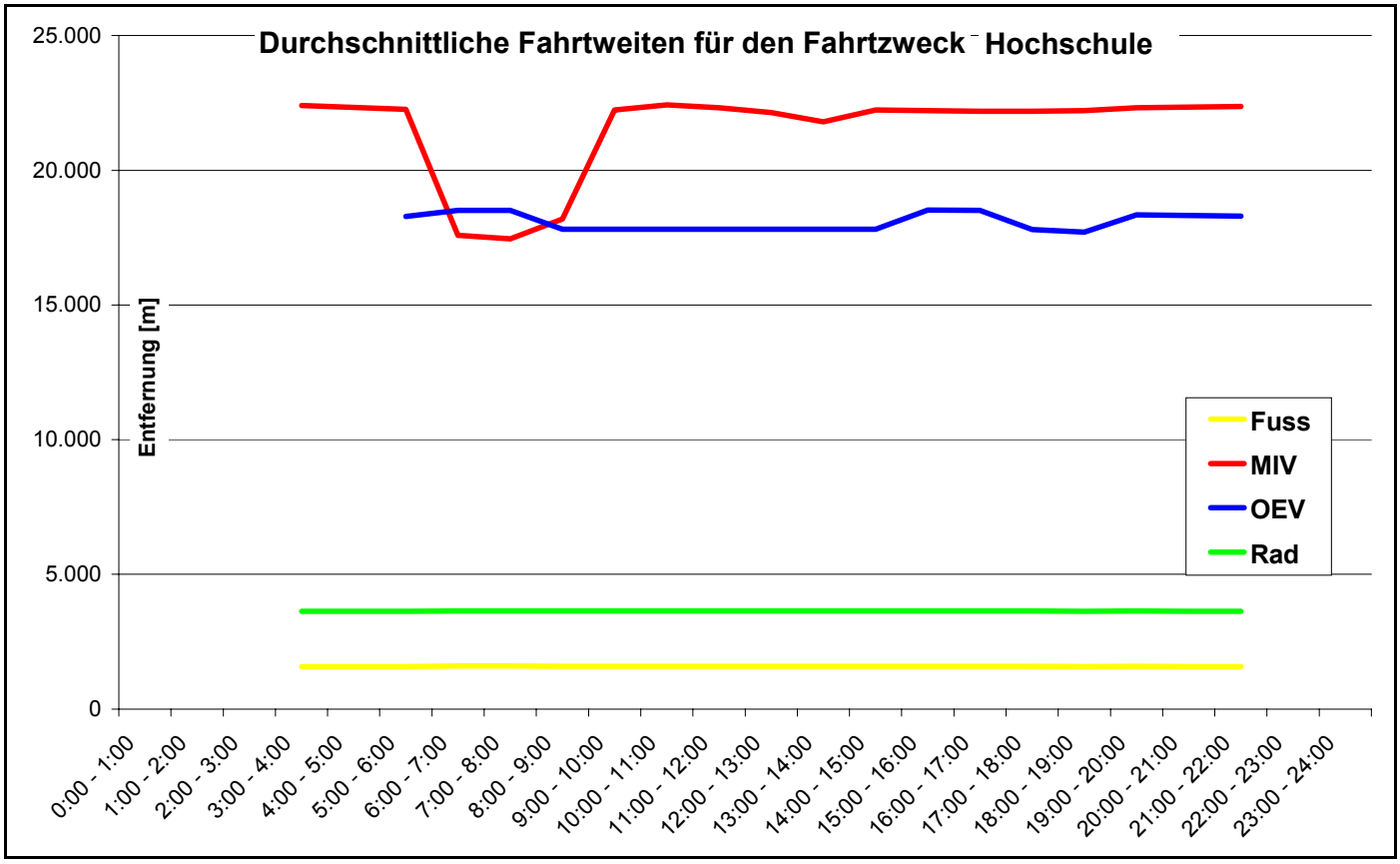


Abbildung A4 - 10: *Durchschnittliche Fahrtweiten für den Fahrtzweck Hochschule, differenziert nach Zeitintervallen und Verkehrsmitteln; alle Fahrten in der Region Stuttgart; Maßnahmeszenario*

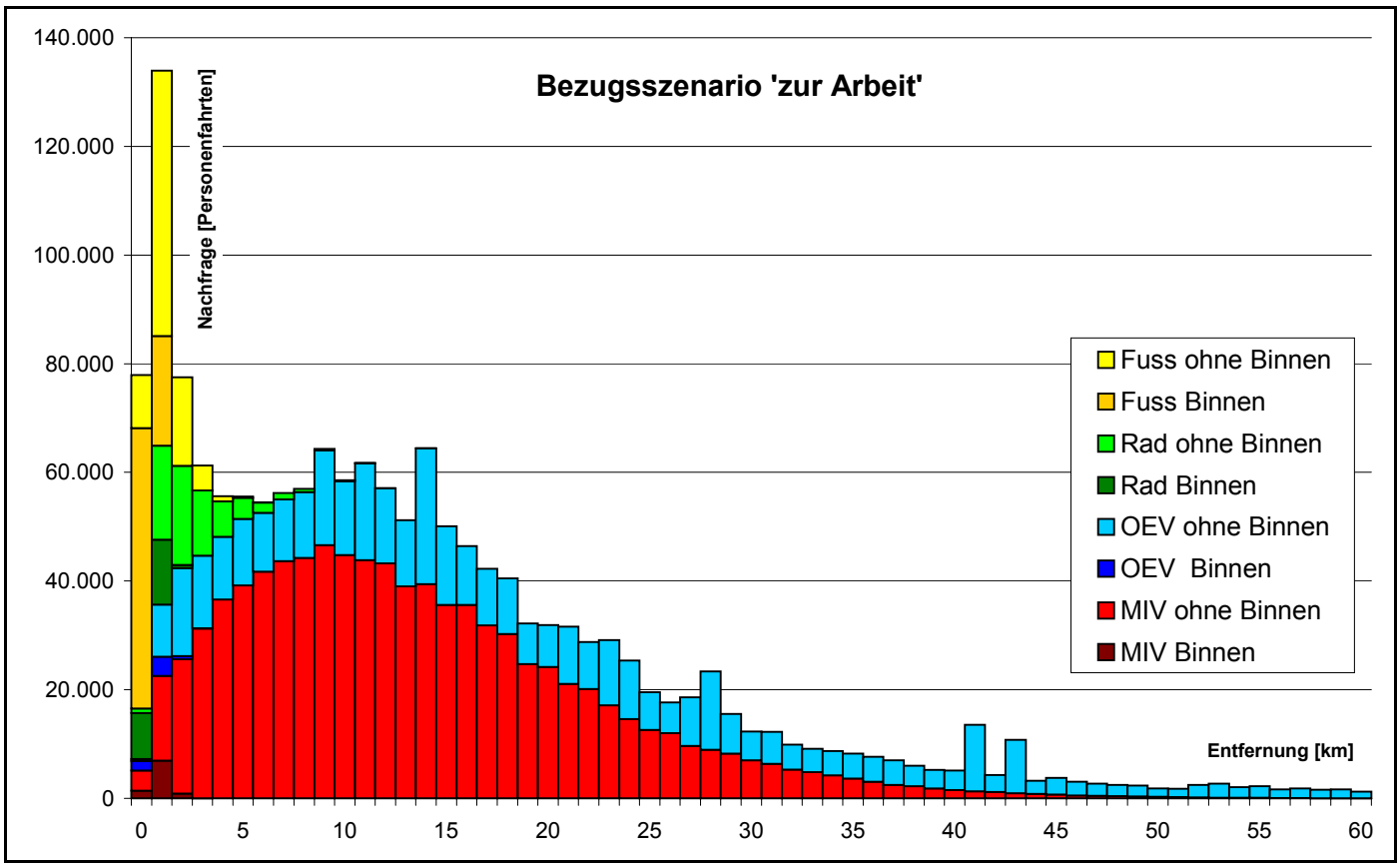


Abbildung A5 - 1: *Fahrtweitenverteilung für den Fahrtzweck zur Arbeit; Klasseneinteilung 1km; Fahrten innerhalb der Region Stuttgart; differenziert nach Verkehrsmitteln, Zellbinnenverkehr und zellüberschreitendem Verkehr; Bezugsszenario*

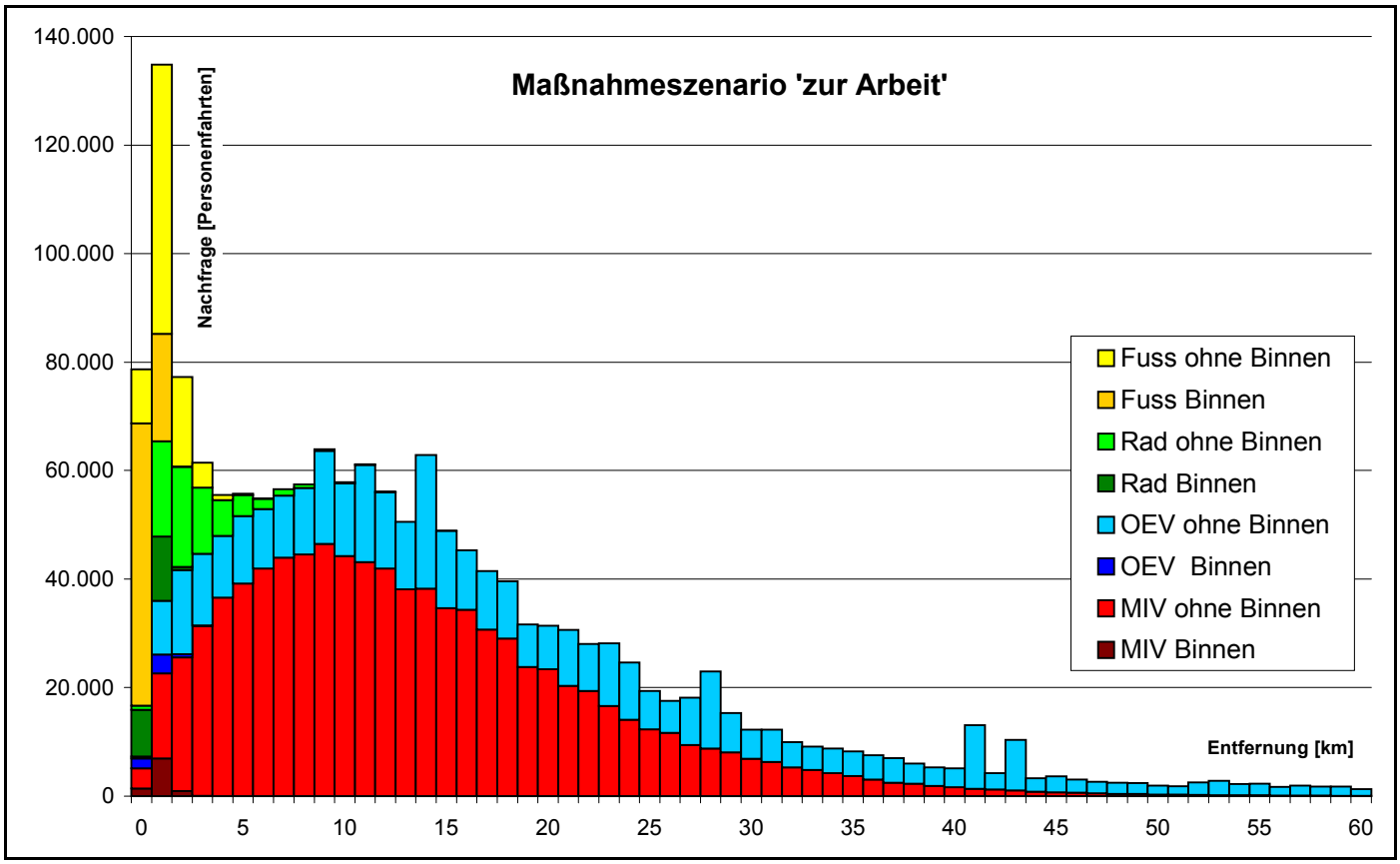


Abbildung A5 - 2: *Fahrtweitenverteilung für den Fahrtzweck zur Arbeit; Klasseneinteilung 1km; Fahrten innerhalb der Region Stuttgart; differenziert nach Verkehrsmitteln, Zellbinnenverkehr und zellüberschreitendem Verkehr; Maßnahmeszenario*

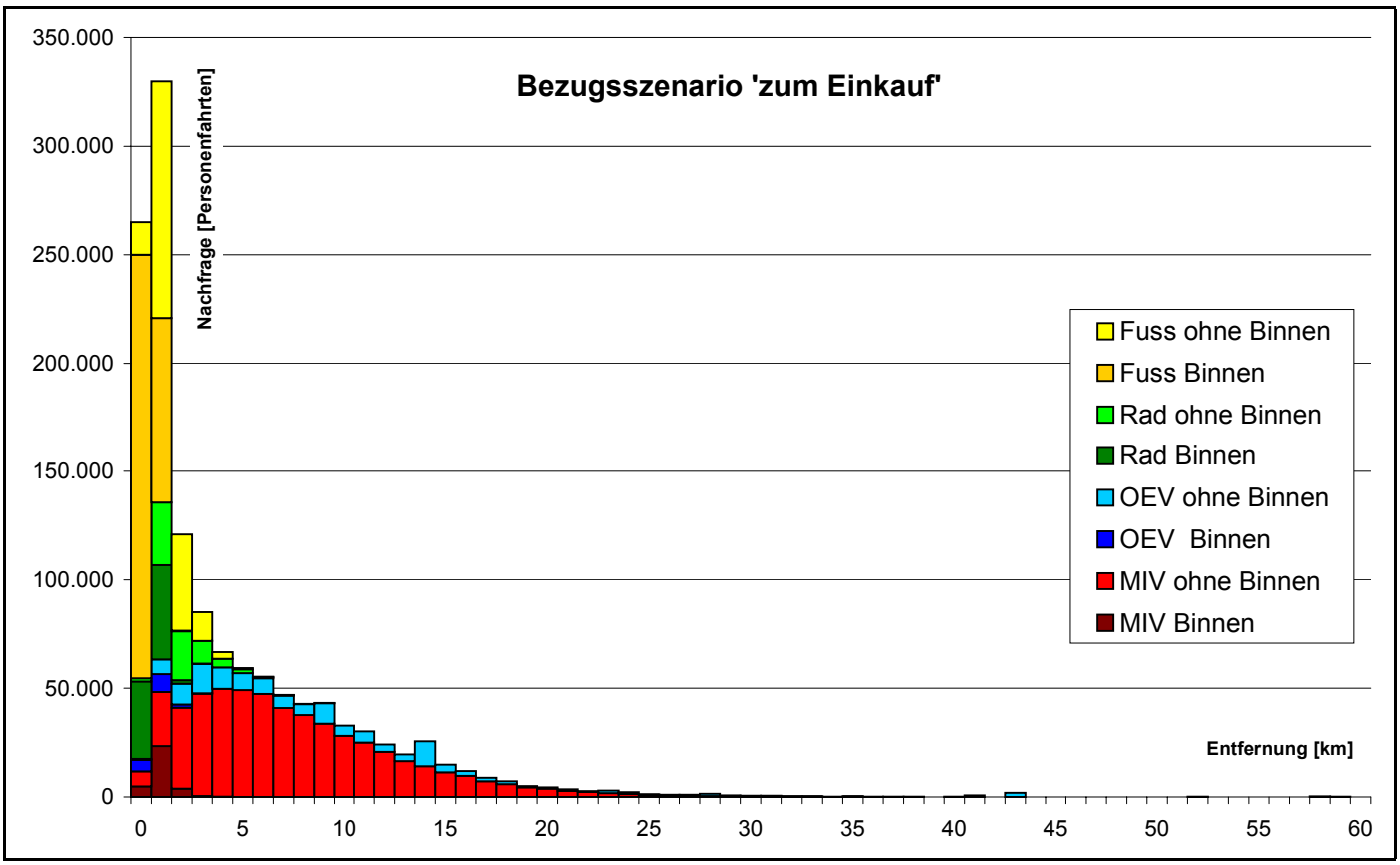


Abbildung A5 - 3: *Fahrtweitenverteilung für den Fahrtzweck zum Einkauf; Klasseneinteilung 1km; Fahrten innerhalb der Region Stuttgart; differenziert nach Verkehrsmitteln, Zellbinnenverkehr und zellüberschreitendem Verkehr; Bezugsszenario*

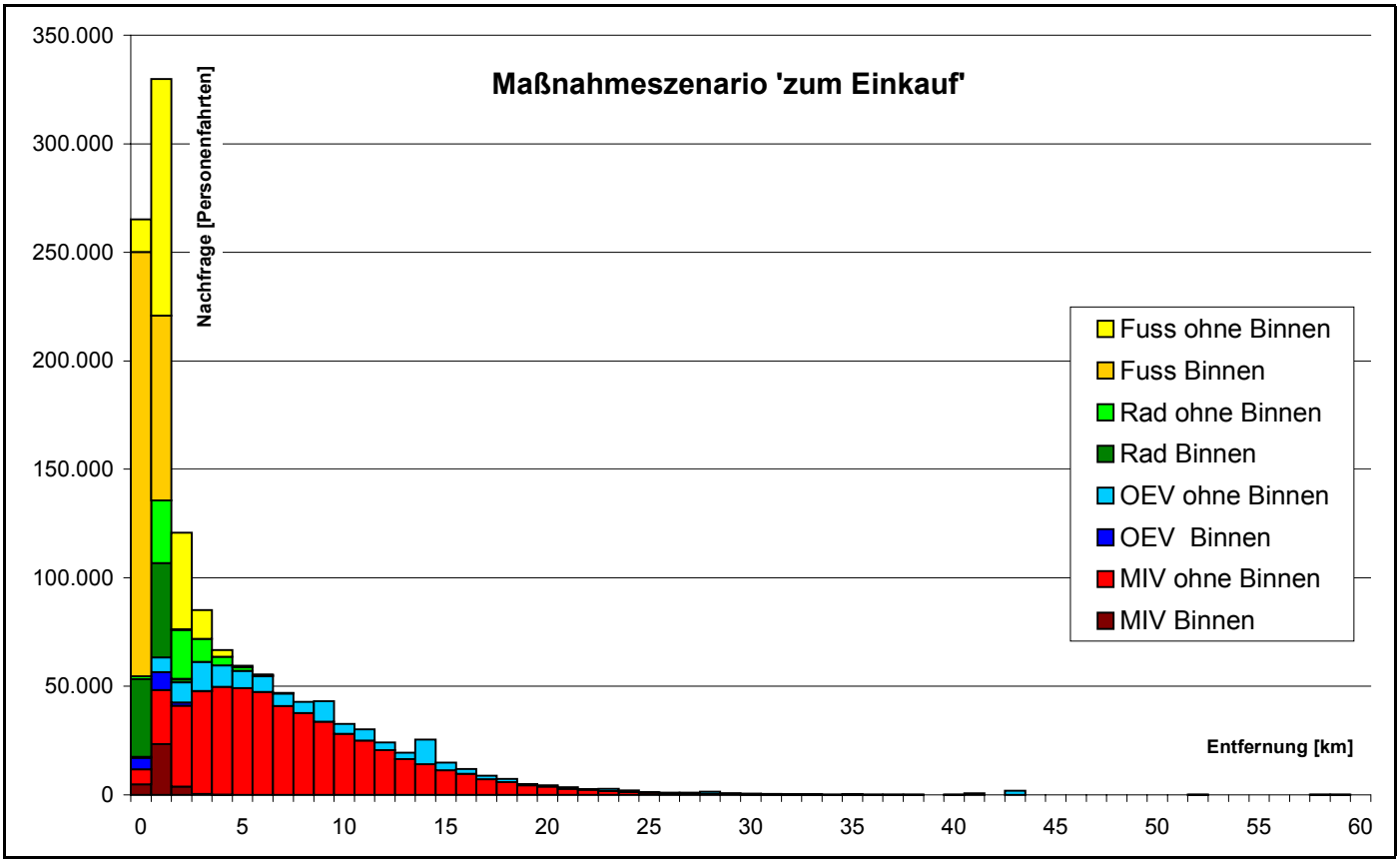


Abbildung A5 - 4: *Fahrtweitenverteilung für den Fahrtzweck zum Einkauf; Klasseneinteilung 1km; Fahrten innerhalb der Region Stuttgart; differenziert nach Verkehrsmitteln, Zellbinnenverkehr und zellüberschreitendem Verkehr; Maßnahmeszenario*

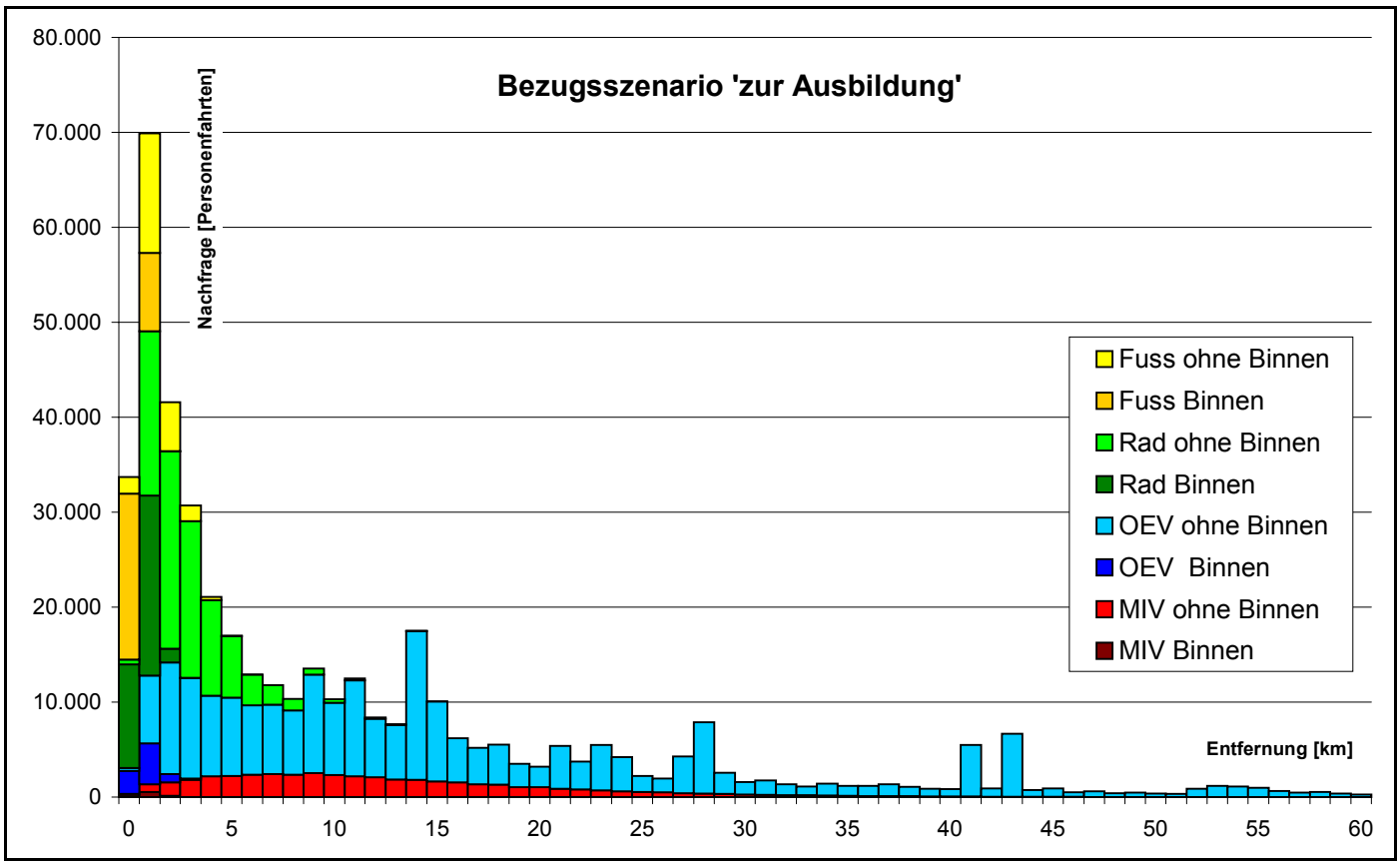


Abbildung A5 - 5: *Fahrtweitenverteilung für den Fahrtzweck zur Ausbildung; Klasseneinteilung 1km; Fahrten innerhalb der Region Stuttgart; differenziert nach Verkehrsmitteln, Zellbinnenverkehr und zellüberschreitendem Verkehr; Bezugsszenario*

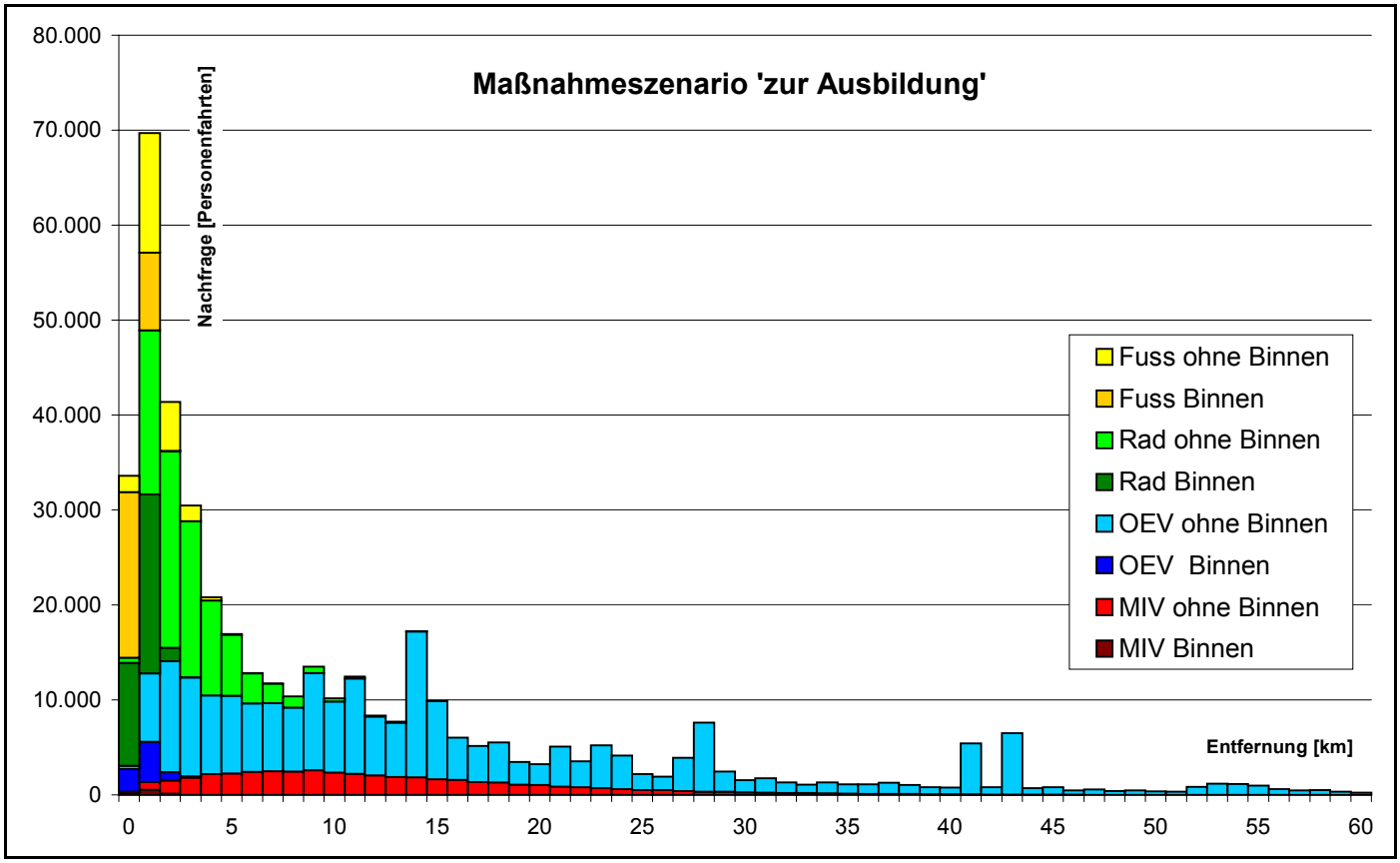


Abbildung A5 - 6: *Fahrtweitenverteilung für den Fahrtzweck zur Ausbildung; Klasseneinteilung 1km; Fahrten innerhalb der Region Stuttgart; differenziert nach Verkehrsmitteln, Zellbinnenverkehr und zellüberschreitendem Verkehr; Maßnahmeszenario*

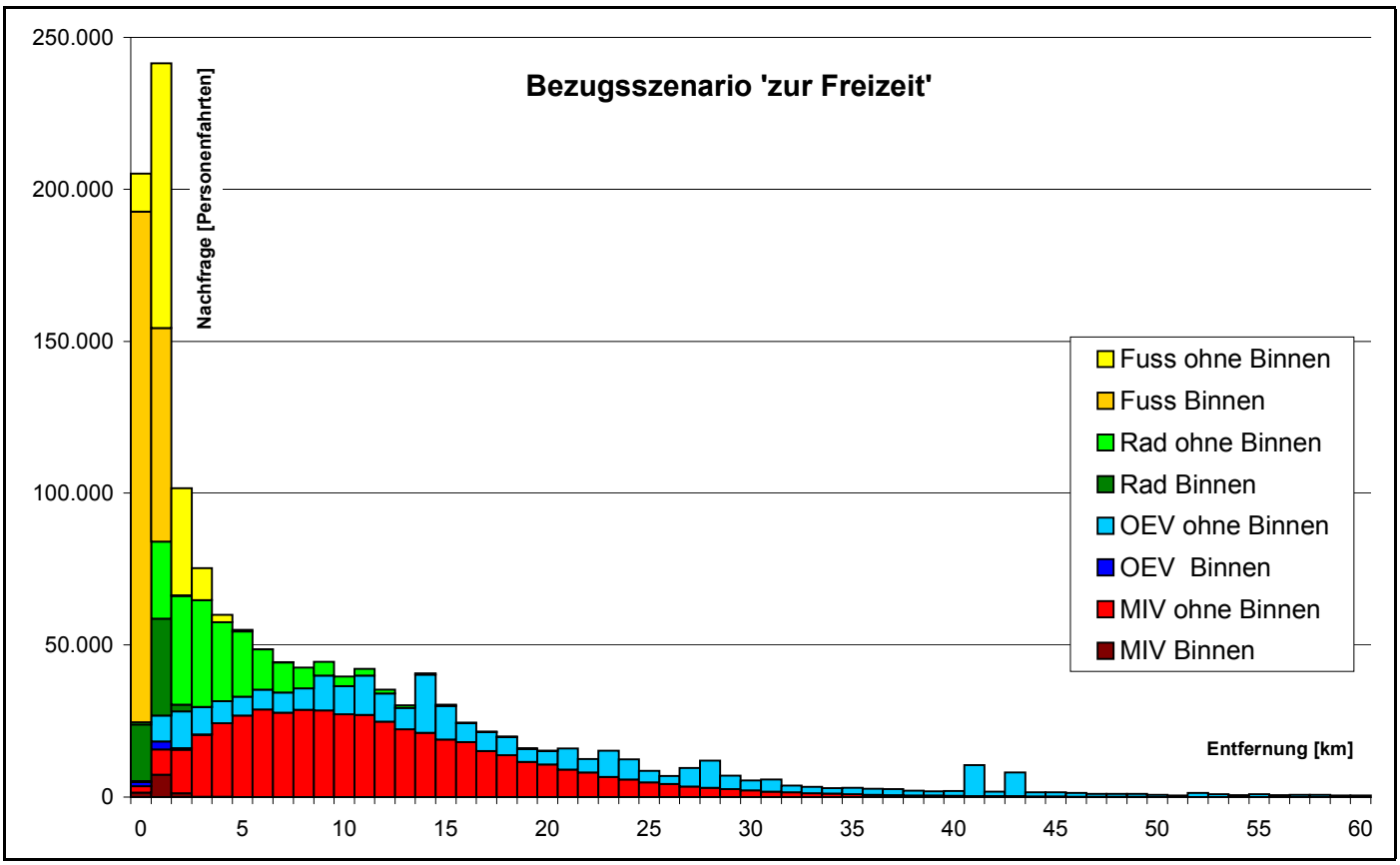


Abbildung A5 - 7: *Fahrtweitenverteilung für den Fahrtzweck zur Freizeit; Klasseneinteilung 1km; Fahrten innerhalb der Region Stuttgart; differenziert nach Verkehrsmitteln, Zellbinnenverkehr und zellüberschreitendem Verkehr; Bezugsszenario*

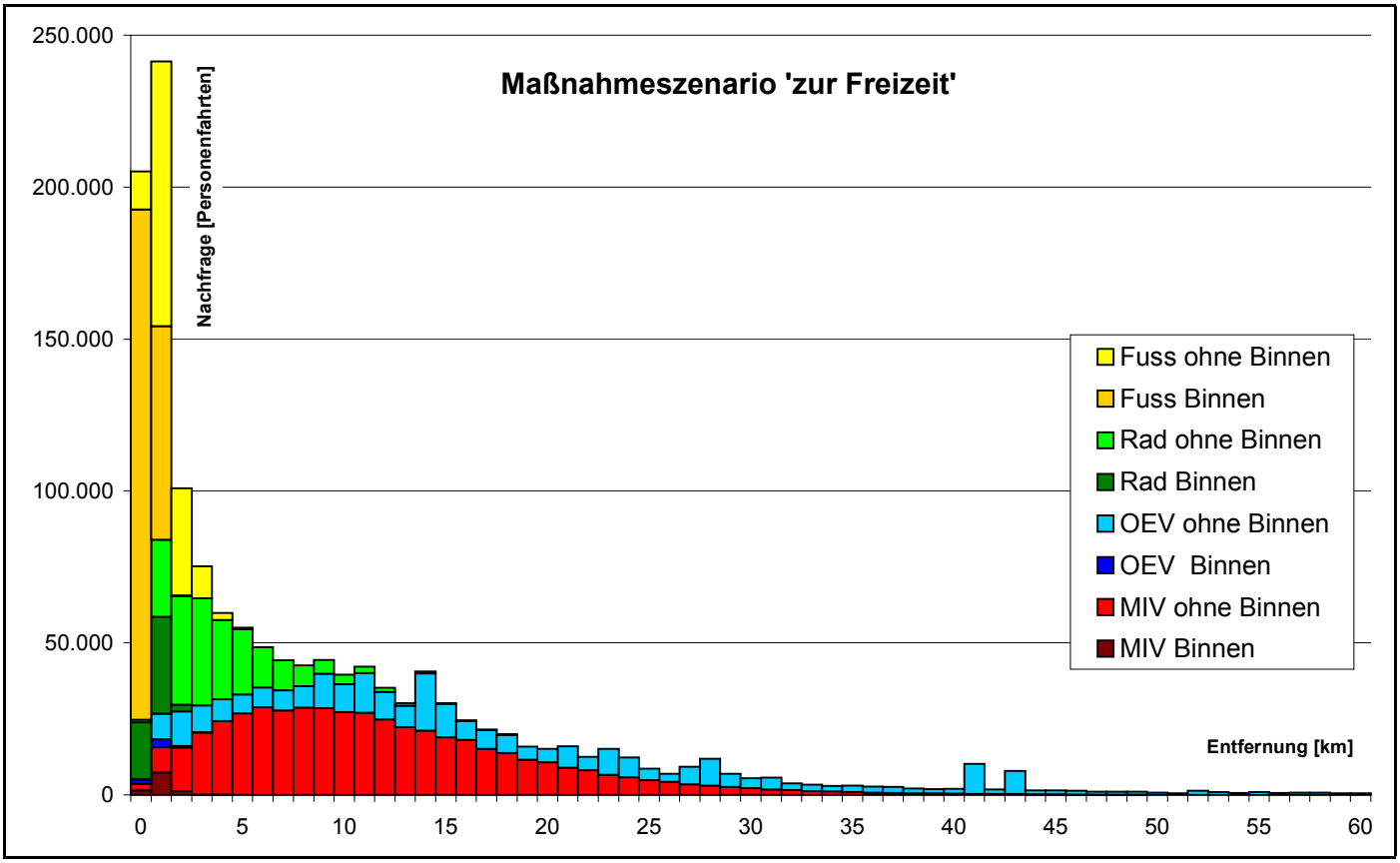


Abbildung A5 - 8: *Fahrtweitenverteilung für den Fahrtzweck zur Freizeit; Klasseneinteilung 1km; Fahrten innerhalb der Region Stuttgart; differenziert nach Verkehrsmitteln, Zellbinnenverkehr und zellüberschreitendem Verkehr; Maßnahmeszenario*

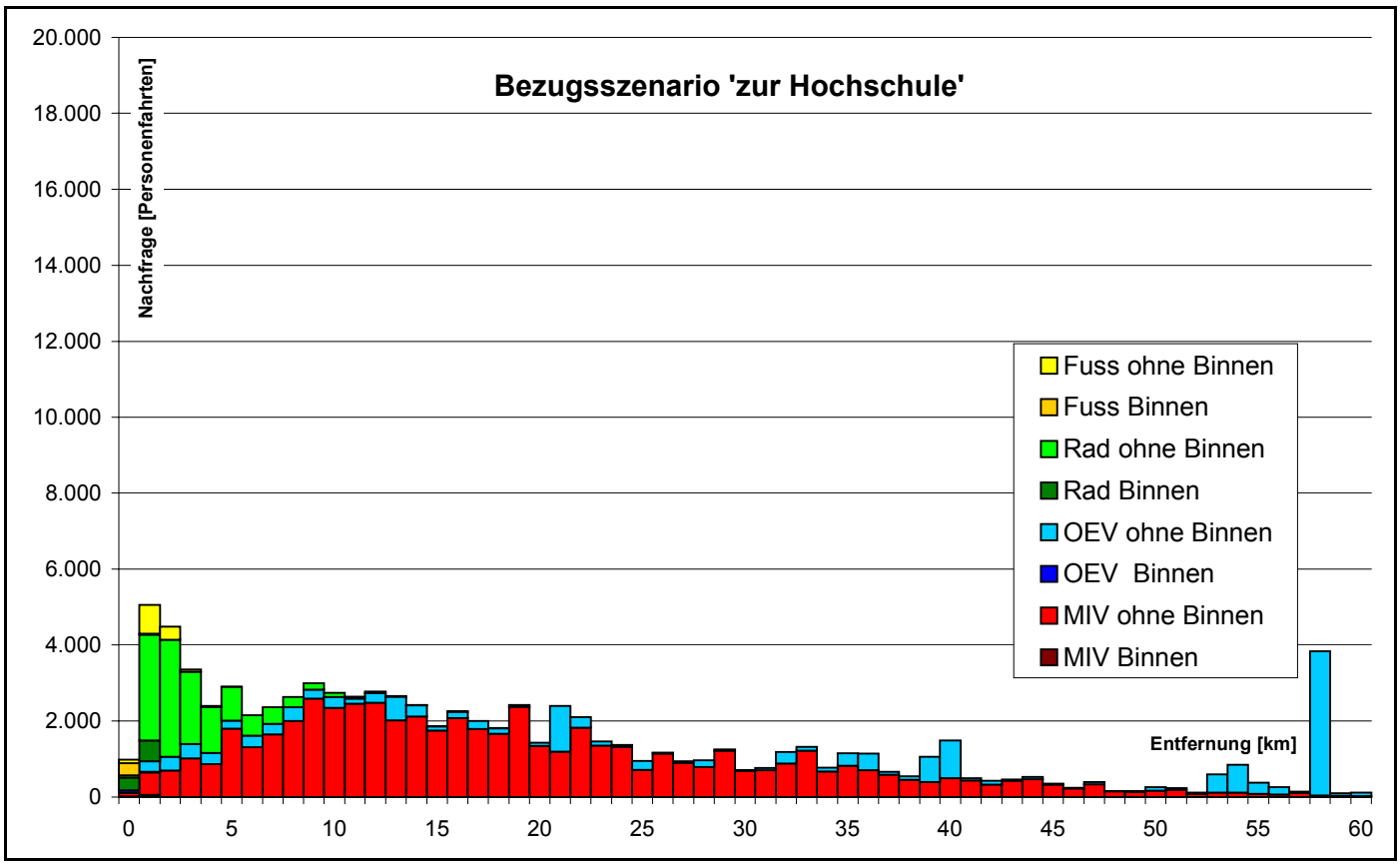


Abbildung A5 - 9: *Fahrtweitenverteilung für den Fahrtzweck zur Hochschule; Klasseneinteilung 1km; Fahrten innerhalb der Region Stuttgart; differenziert nach Verkehrsmitteln, Zellbinnenverkehr und zellüberschreitendem Verkehr; Bezugsszenario*

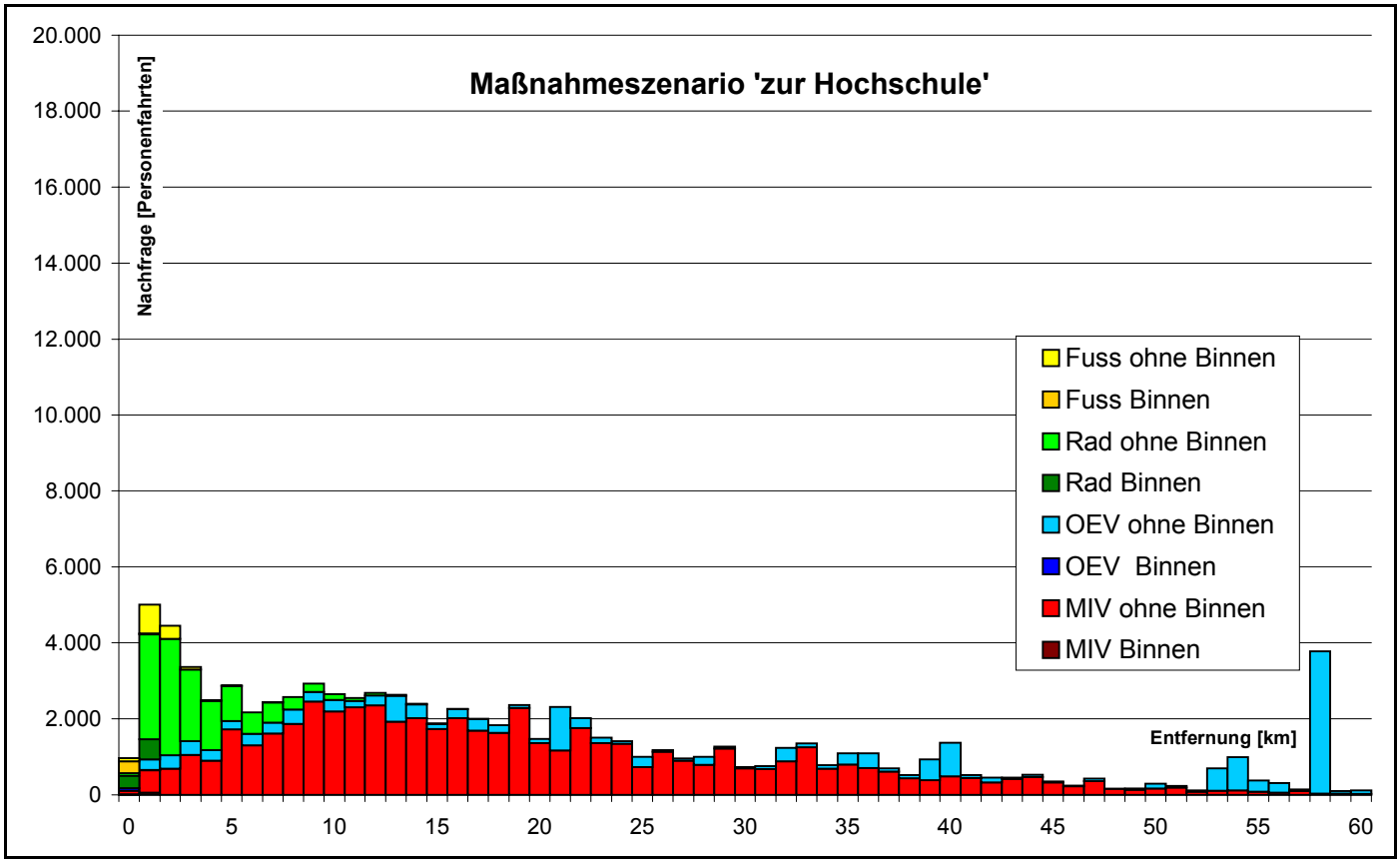


Abbildung A5 - 10: *Fahrtweitenverteilung für den Fahrtzweck zur Hochschule; Klasseneinteilung 1km; Fahrten innerhalb der Region Stuttgart; differenziert nach Verkehrsmitteln, Zellbinnenverkehr und zellüberschreitendem Verkehr; Maßnahmeszenario*

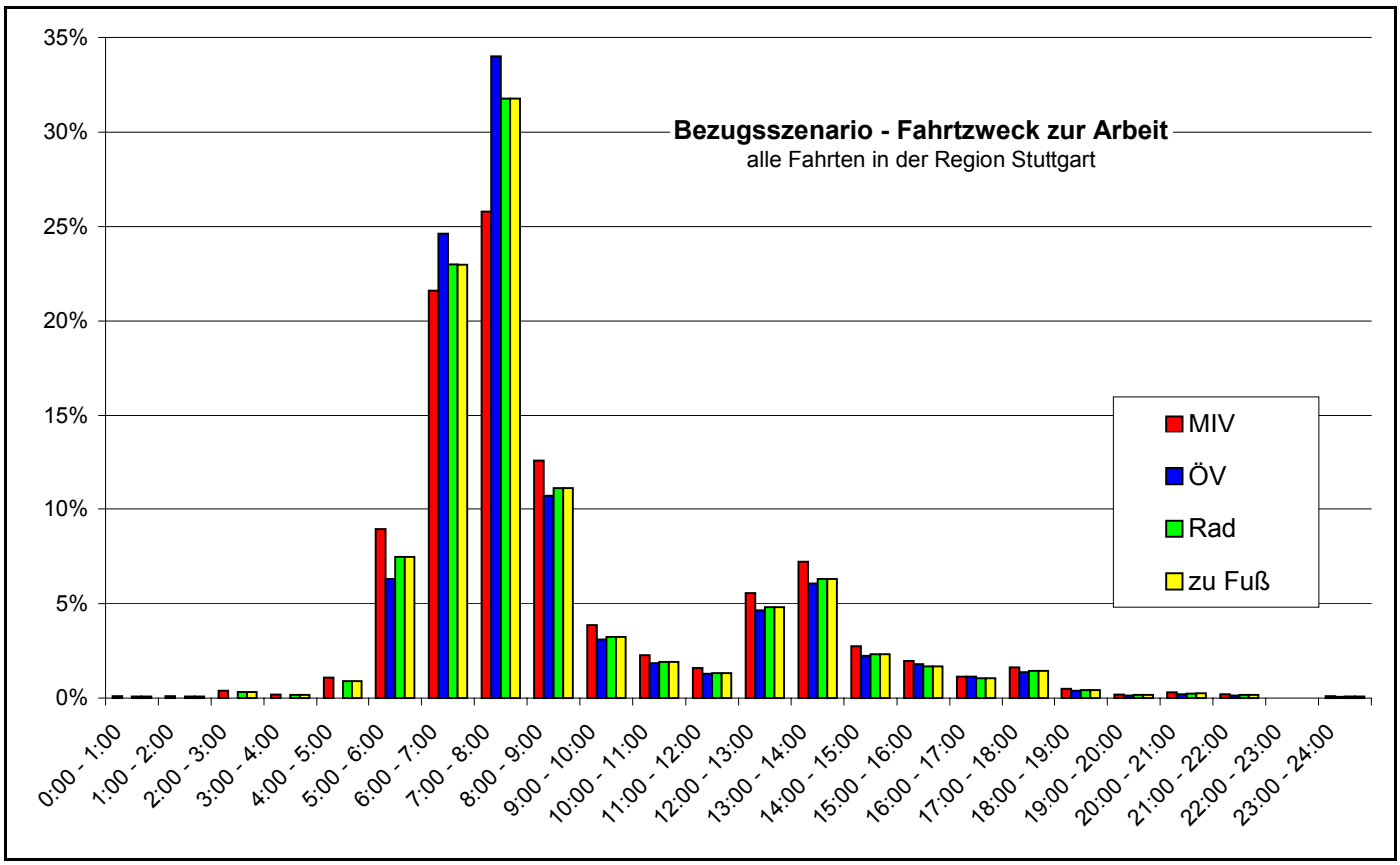


Abbildung A6 - 1: Zeitliche Verteilung der Personenverkehrsnachfrage differenziert nach Verkehrsmitteln; Bezugsszenario; Fahrtzweck zur Arbeit; alle Fahrten in der Region Stuttgart

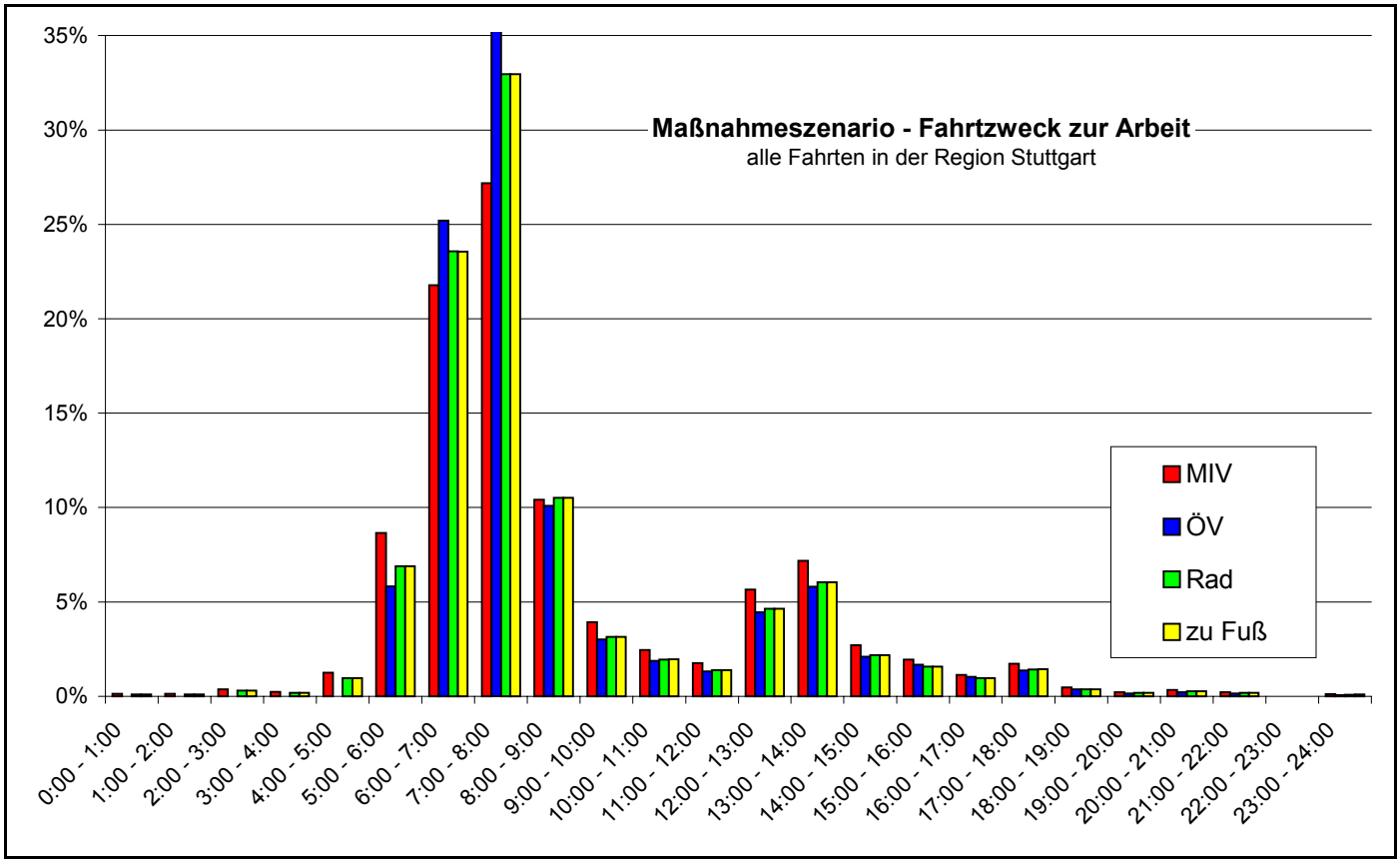


Abbildung A6 - 2: Zeitliche Verteilung der Personenverkehrsnachfrage differenziert nach Verkehrsmitteln; Maßnahmeszenario; Fahrtzweck zur Arbeit; alle Fahrten in der Region Stuttgart

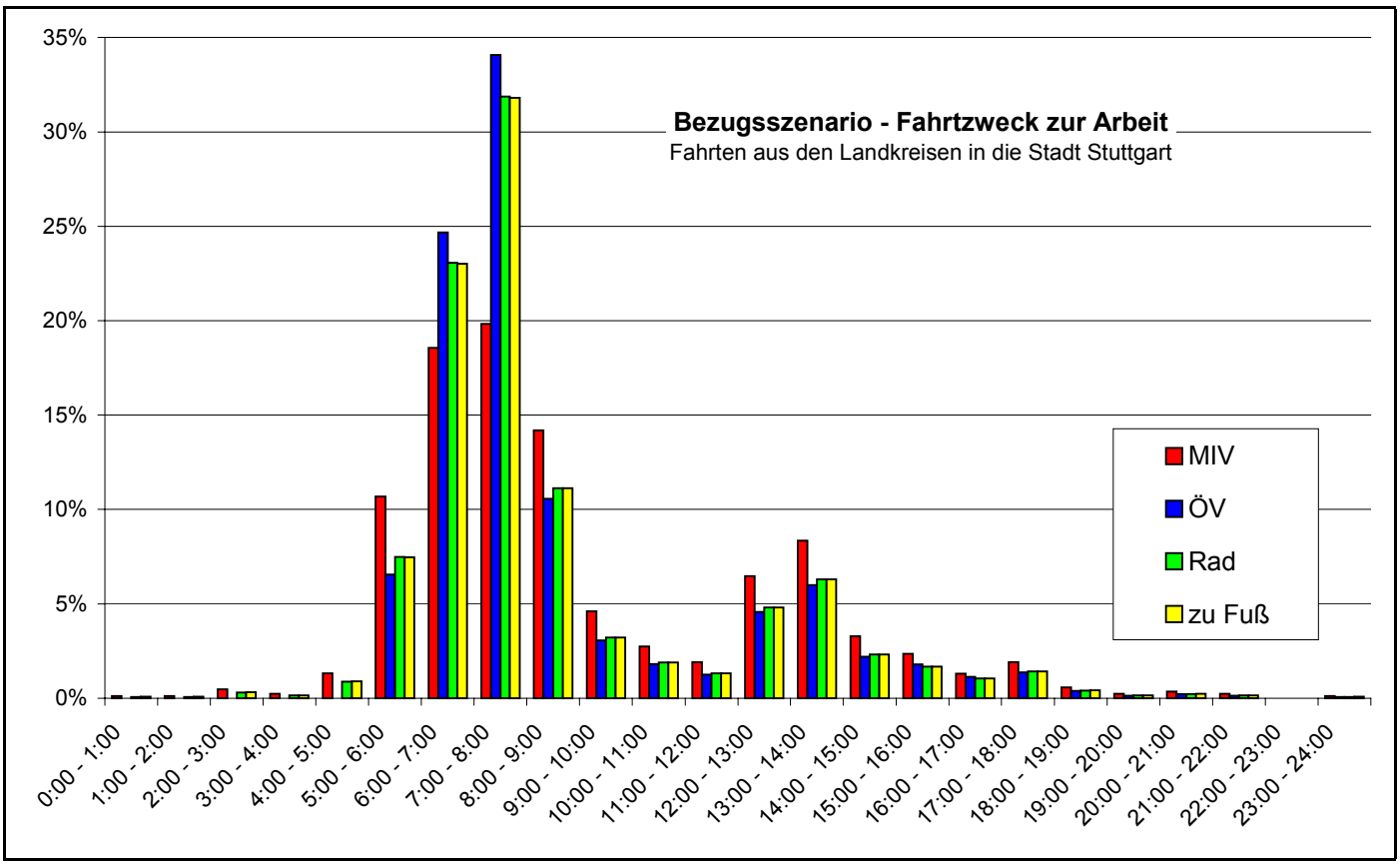


Abbildung A6 - 3: Zeitliche Verteilung der Personenverkehrsnachfrage differenziert nach Verkehrsmitteln; Bezugsszenario; Fahrtzweck zur Arbei; Fahrten aus den Landkreisen nach Stuttgart t

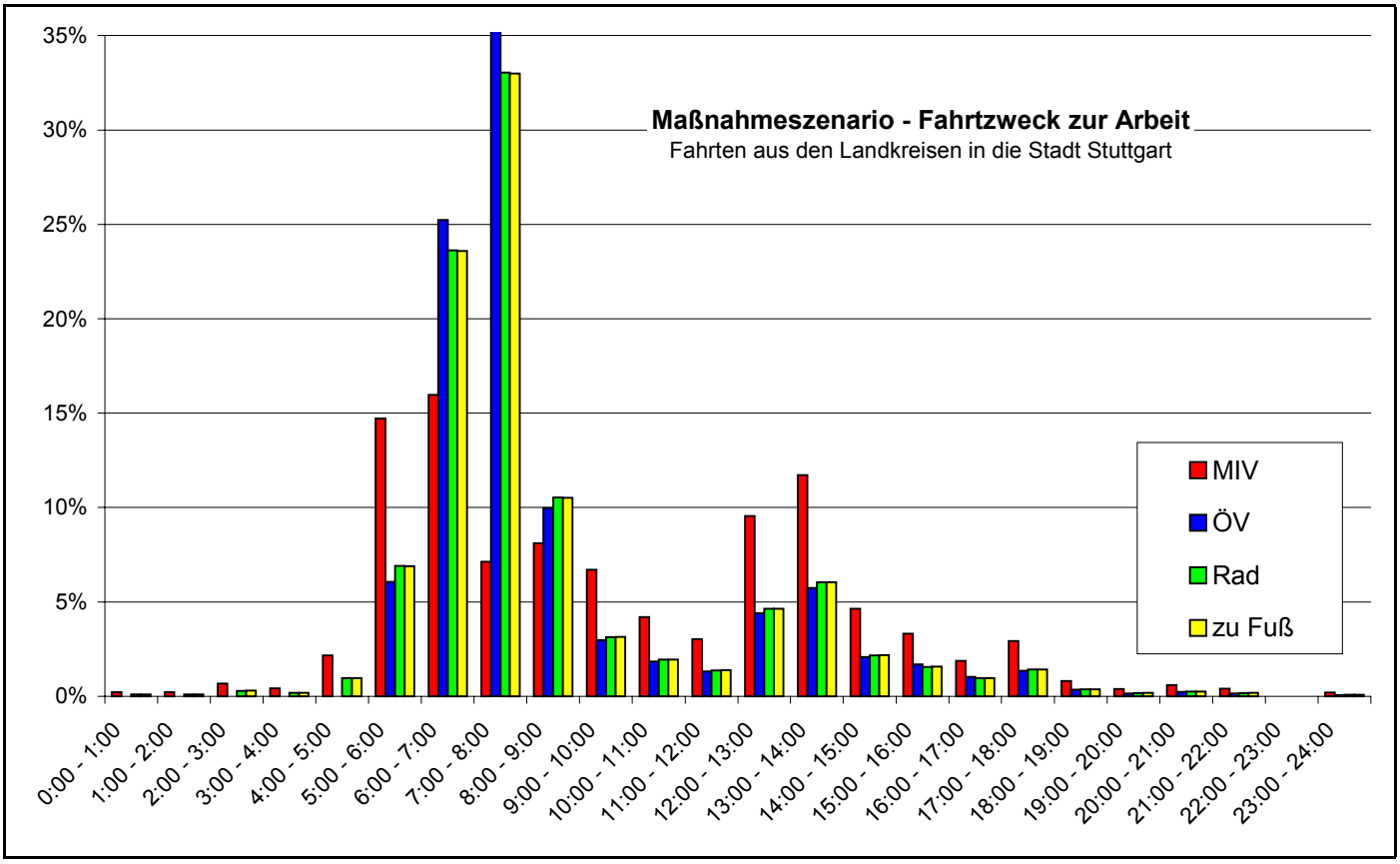


Abbildung A6 - 4: Zeitliche Verteilung der Personenverkehrsnachfrage differenziert nach Verkehrsmitteln; Maßnahmeszenario; Fahrtzweck zur Arbeit; Fahrten aus den Landkreisen nach Stuttgart

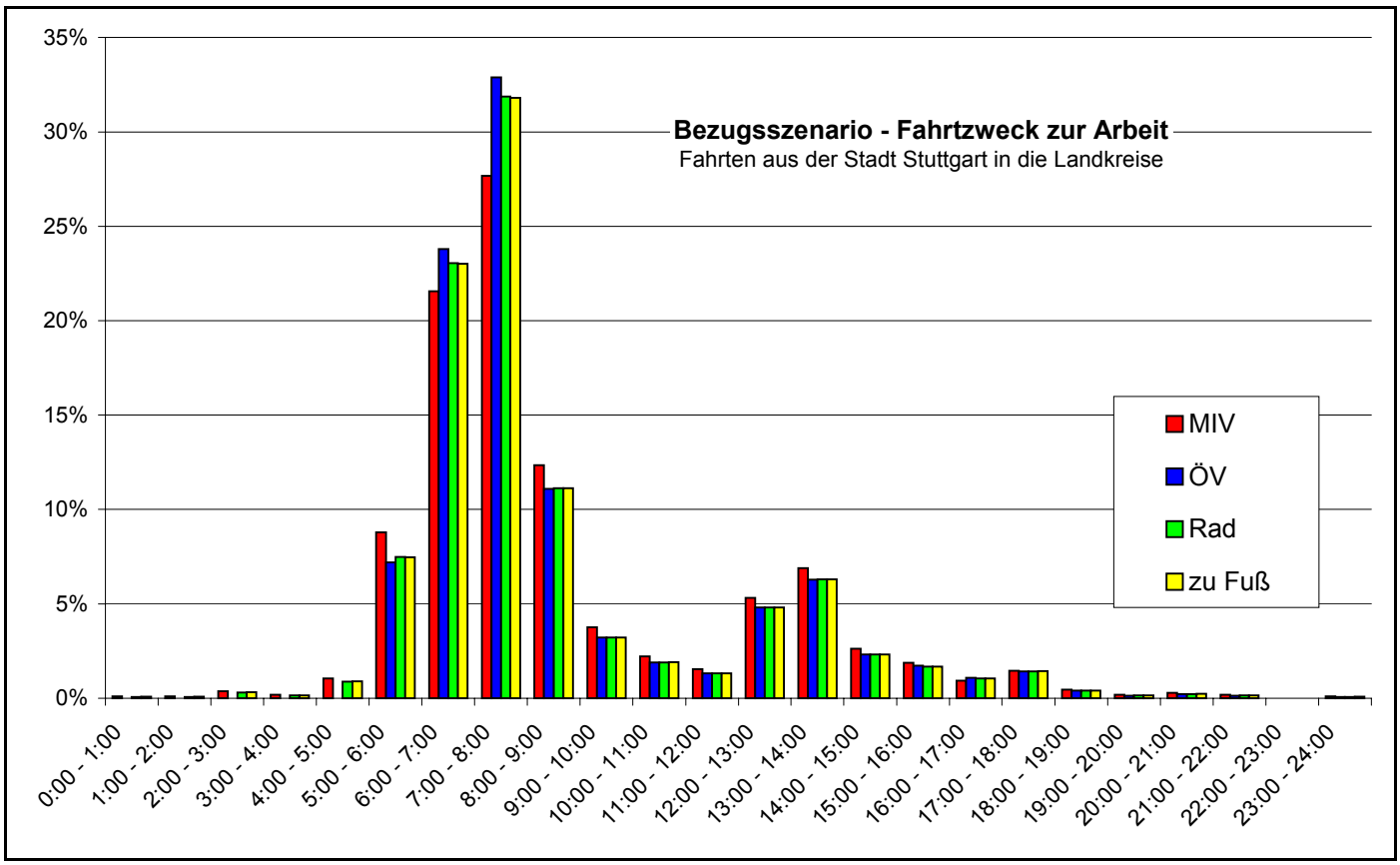


Abbildung A6 - 5: Zeitliche Verteilung der Personenverkehrsnachfrage differenziert nach Verkehrsmitteln; Maßnahmeszenario; Fahrtzweck zur Arbeit; Fahrten aus Stuttgart in die Landkreise

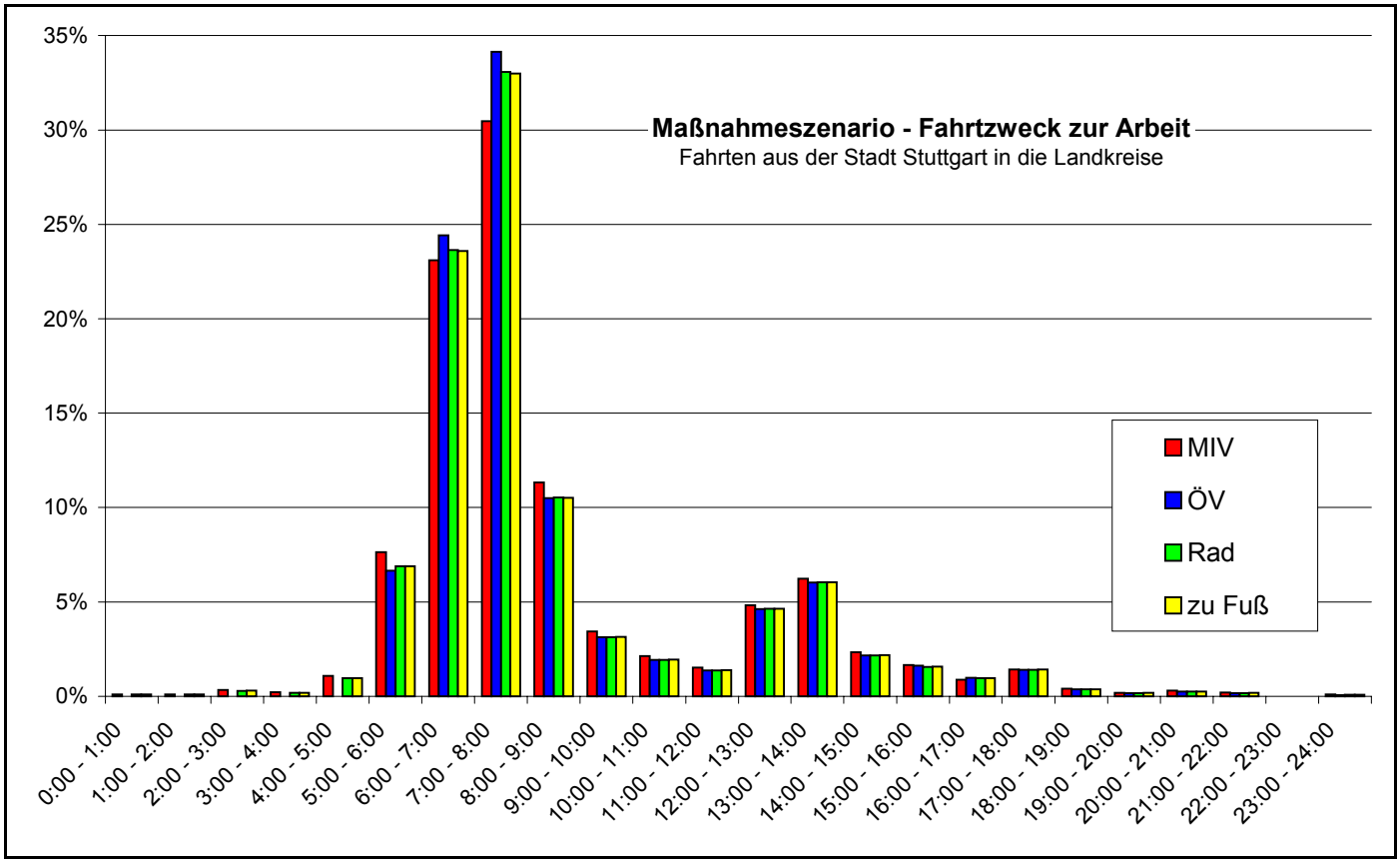


Abbildung A6 - 6: Zeitliche Verteilung der Personenverkehrsnachfrage differenziert nach Verkehrsmitteln; Maßnahmeszenario; Fahrtzweck zur Arbeit; Fahrten aus Stuttgart in die Landkreise

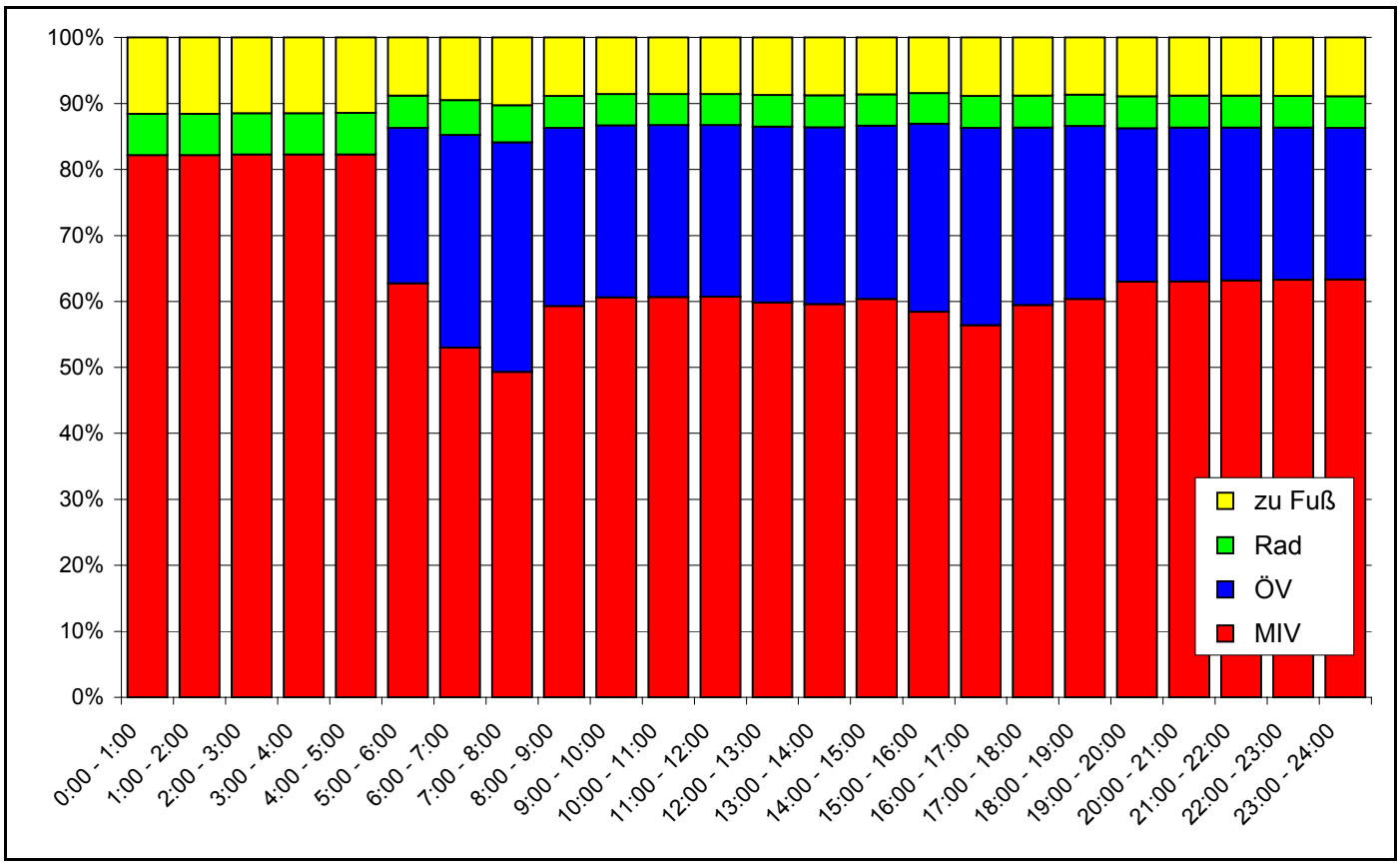


Abbildung A7 - 1: Zeitlich differenzierte Modal Split Werte für den Fahrtzweck zur Arbeit; alle Fahrten in der Region Stuttgart; Bezugsszenario

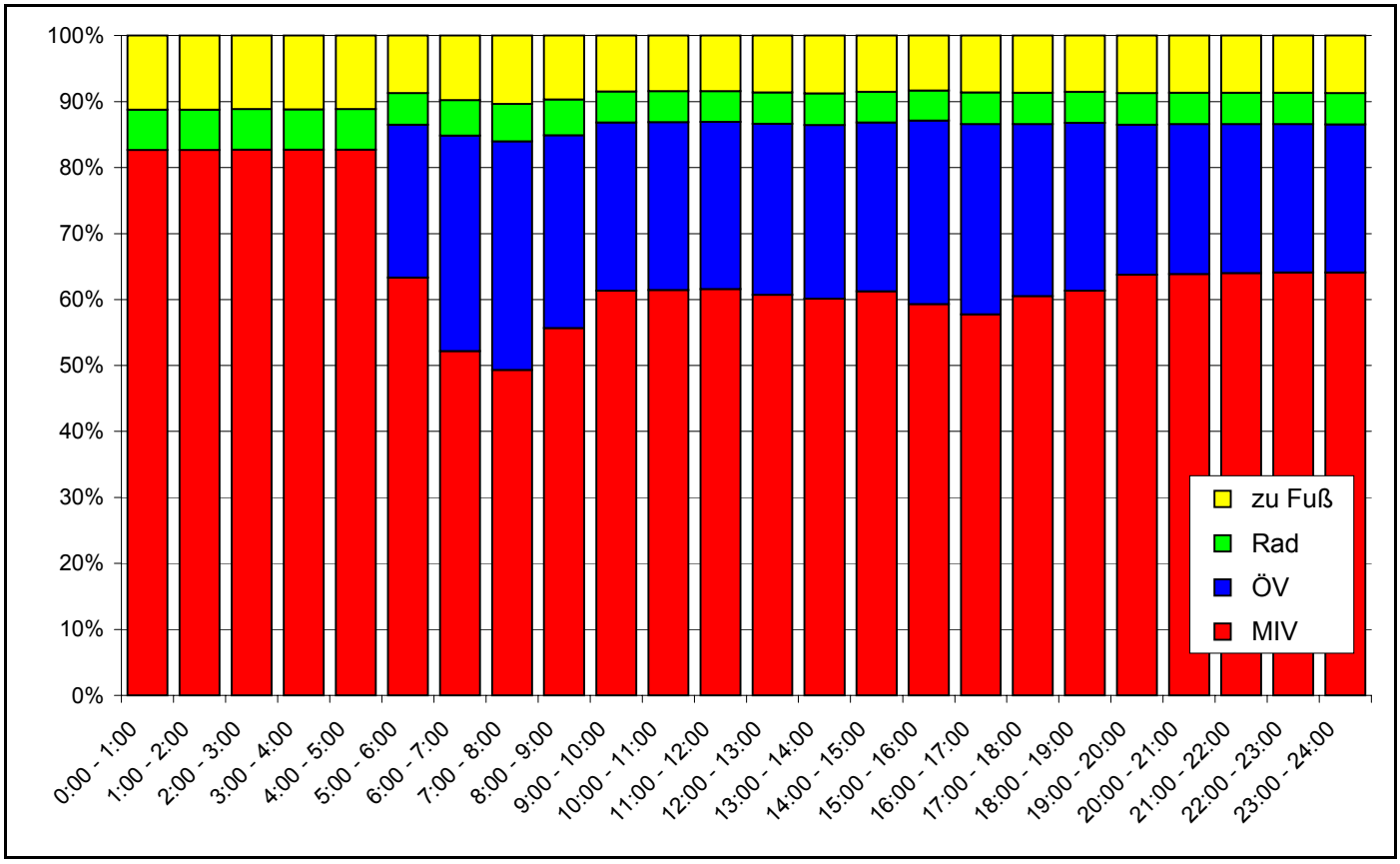


Abbildung A7 - 2: Zeitlich differenzierte Modal Split Werte für den Fahrtzweck zur Arbeit; alle Fahrten in der Region Stuttgart; Maßnahmeszenario

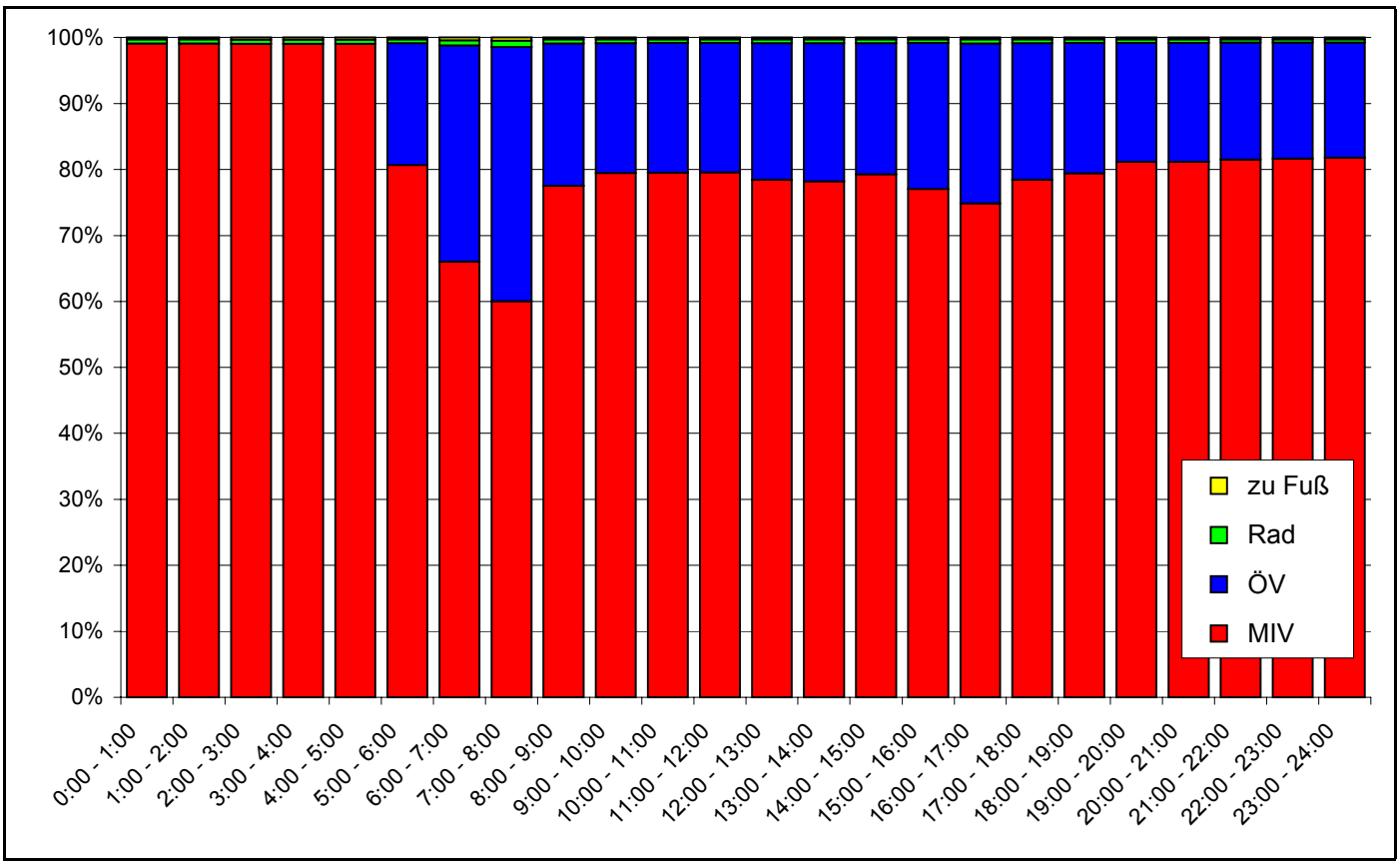


Abbildung A7 - 3: Zeitlich differenzierte Modal Split Werte für den Fahrtzweck zur Arbeit; Fahrten aus den Landkreisen nach Stuttgart; Bezugsszenario

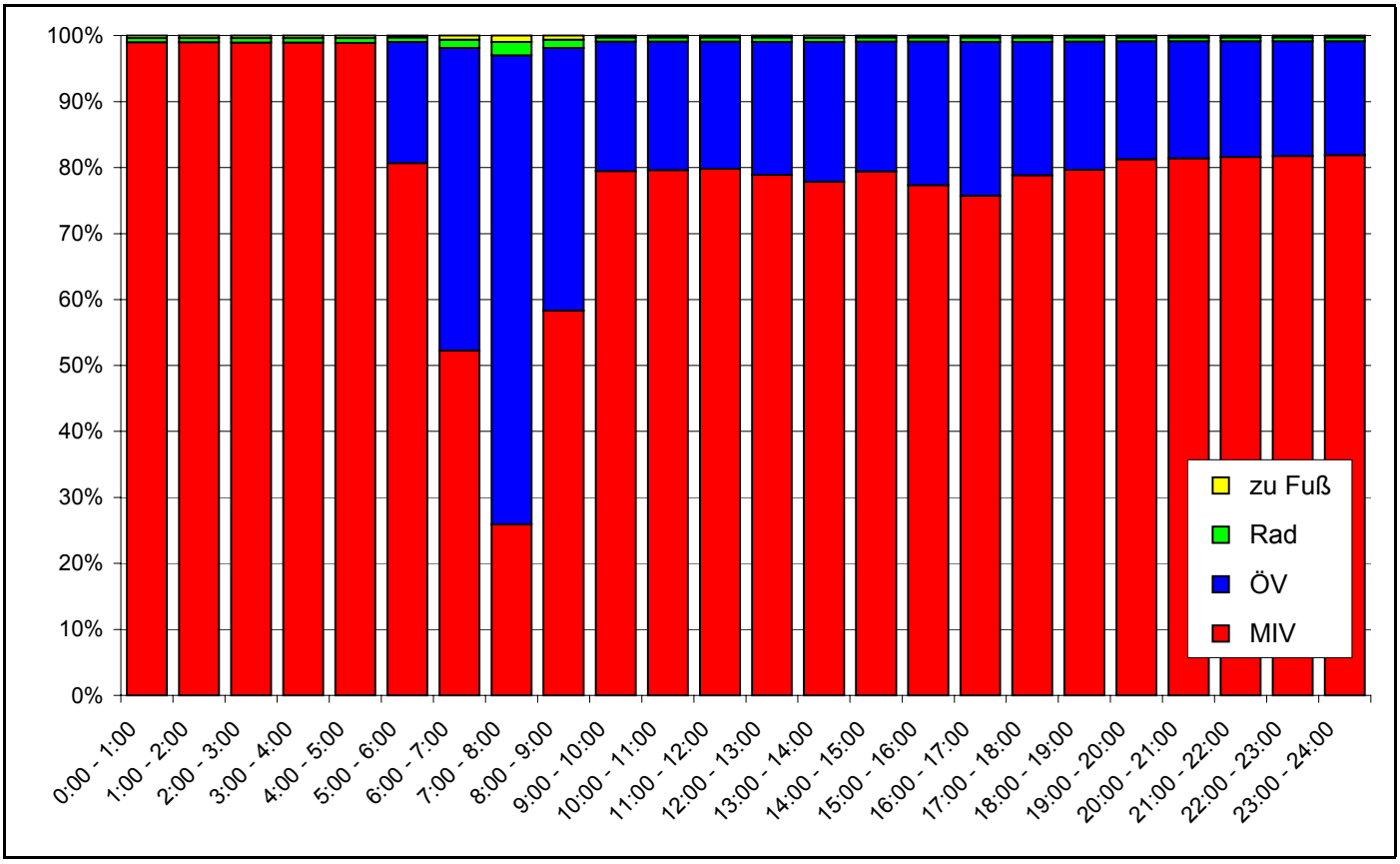


Abbildung A7 - 4: Zeitlich differenzierte Modal Split Werte für den Fahrtzweck zur Arbeit; Fahrten aus den Landkreisen nach Stuttgart; Maßnahmeszenario

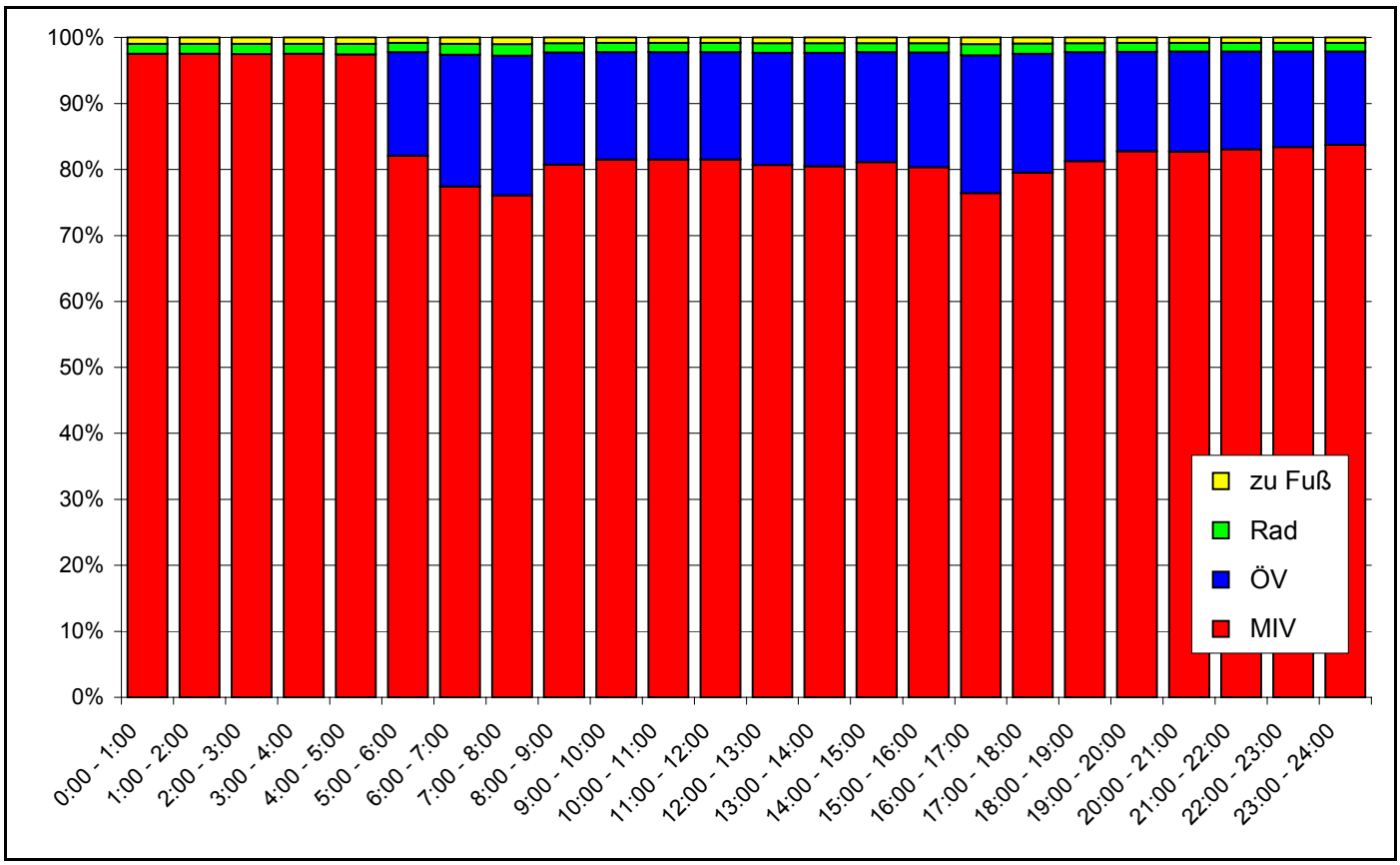


Abbildung A7 - 5: Zeitlich differenzierte Modal Split Werte für den Fahrtzweck zur Arbeit; Fahrten von Stuttgart in die Landkreise; Bezugsszenario

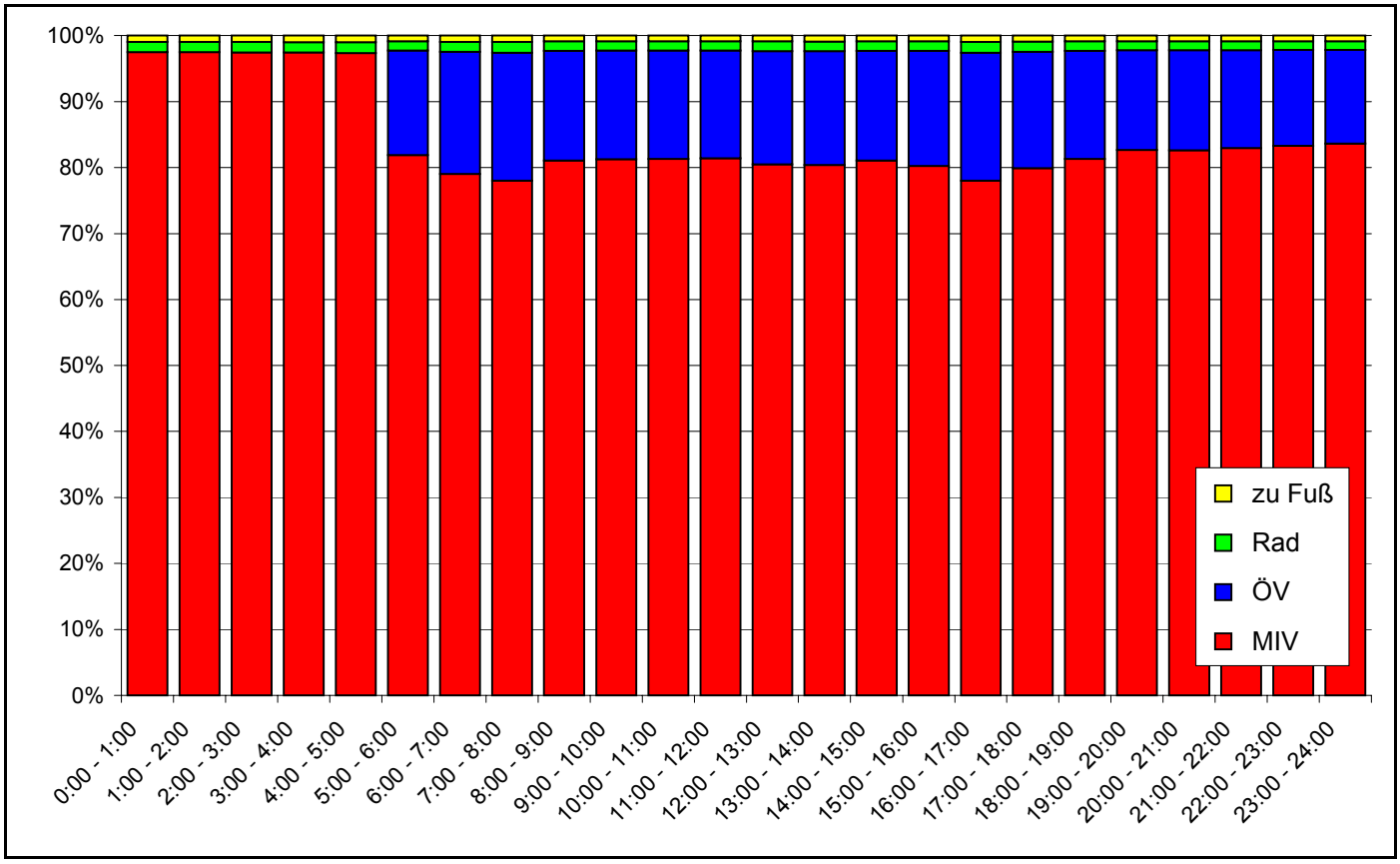


Abbildung A7 - 6: Zeitlich differenzierte Modal Split Werte für den Fahrtzweck zur Arbeit; Fahrten von Stuttgart in die Landkreise; Maßnahmeszenario

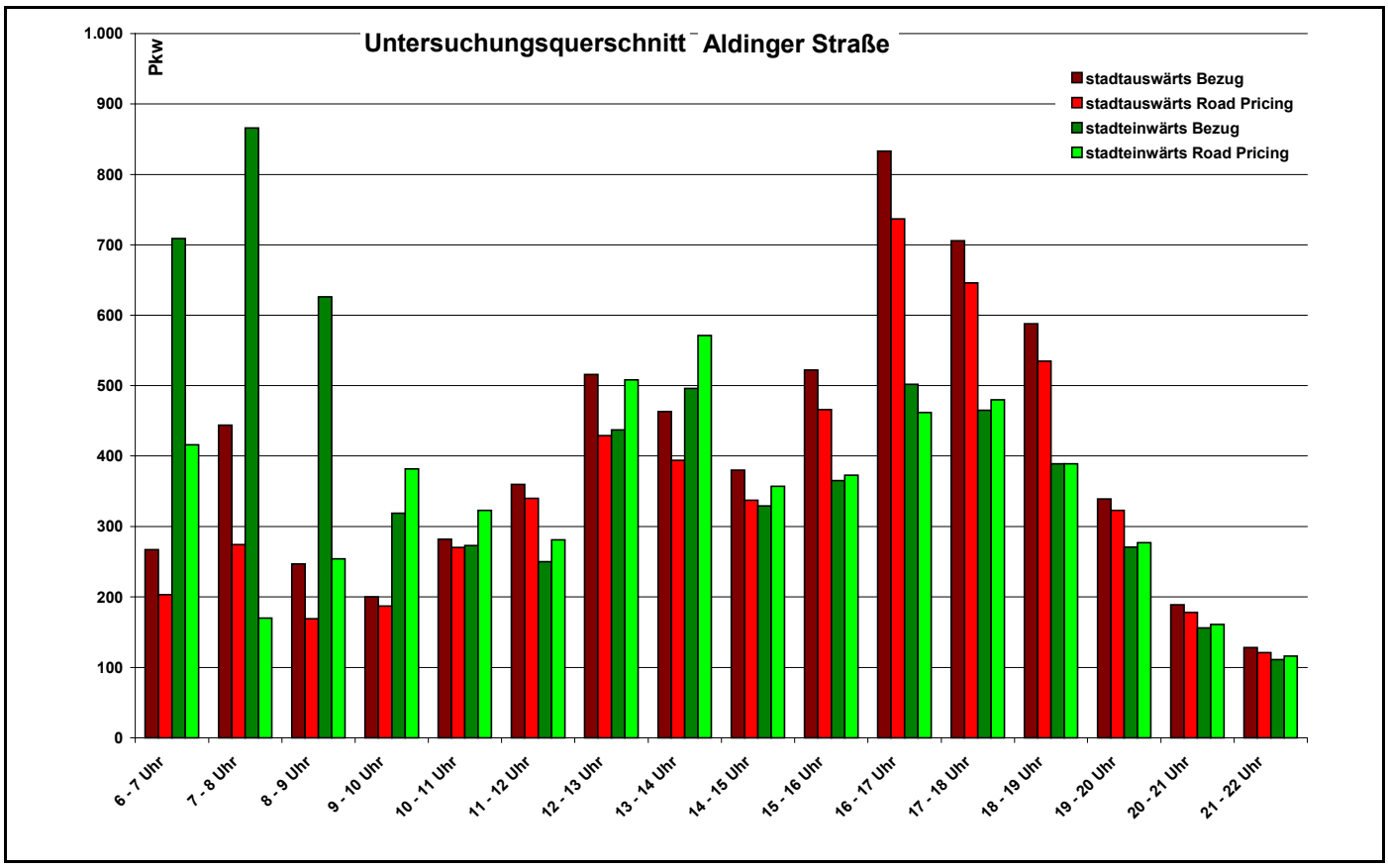


Abbildung A8 - 1: Vergleich der Tagesganglinien am Untersuchungsquerschnitt Aldinger Straße

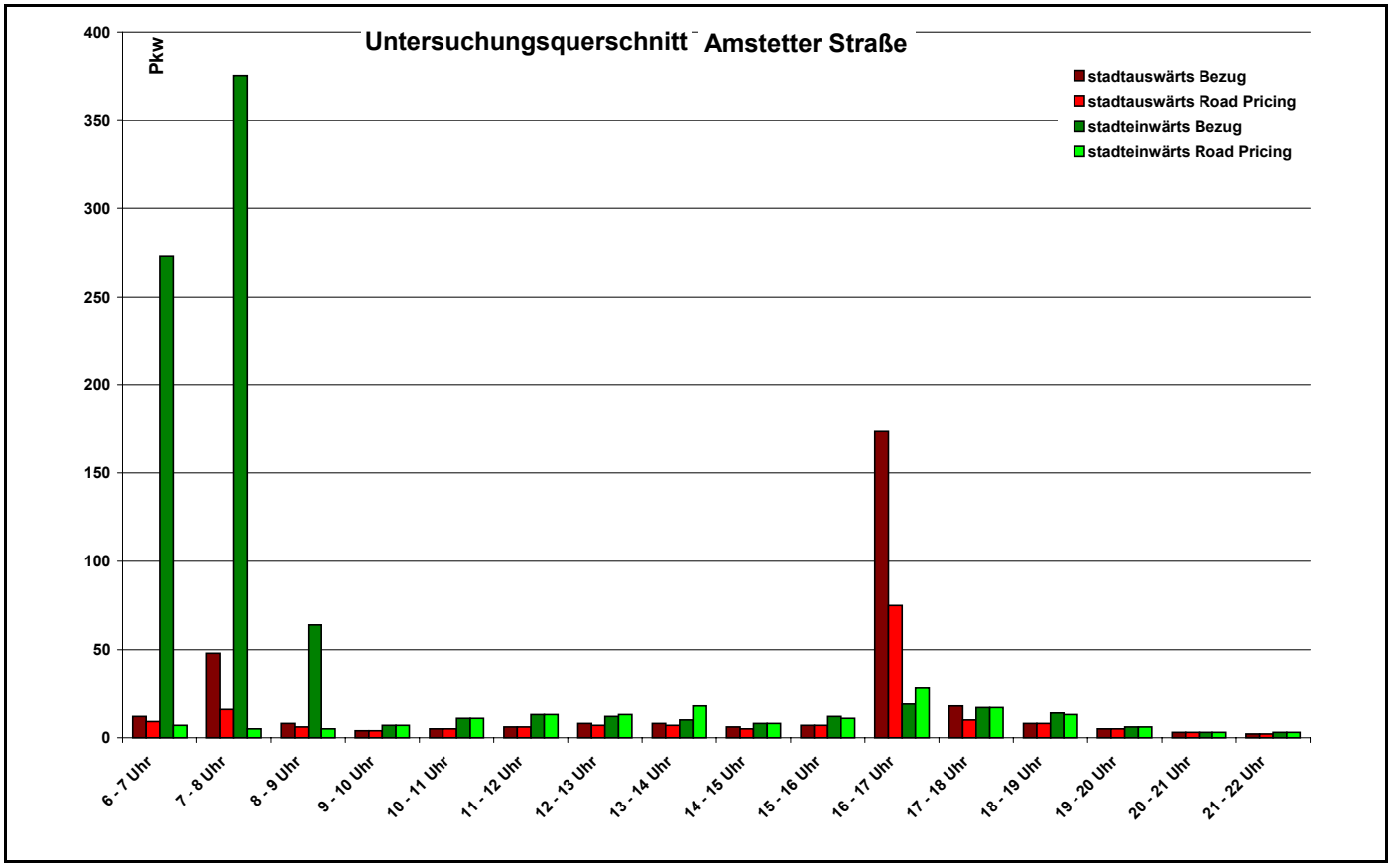


Abbildung A8 - 2: Vergleich der Tagesganglinien am Untersuchungsquerschnitt Amstetter Straße

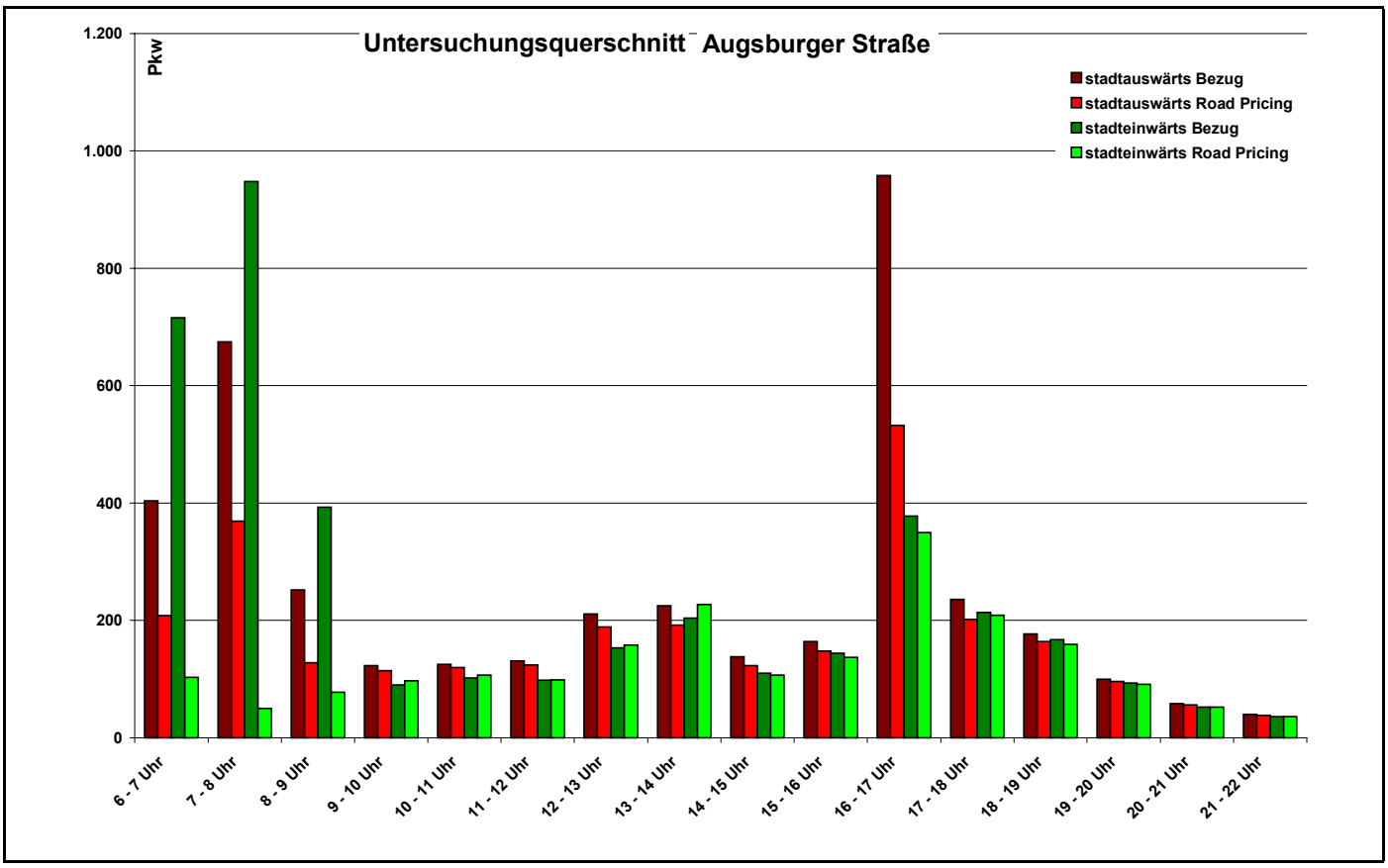


Abbildung A8 - 3: Vergleich der Tagesganglinien am Untersuchungsquerschnitt Augsburger Straße

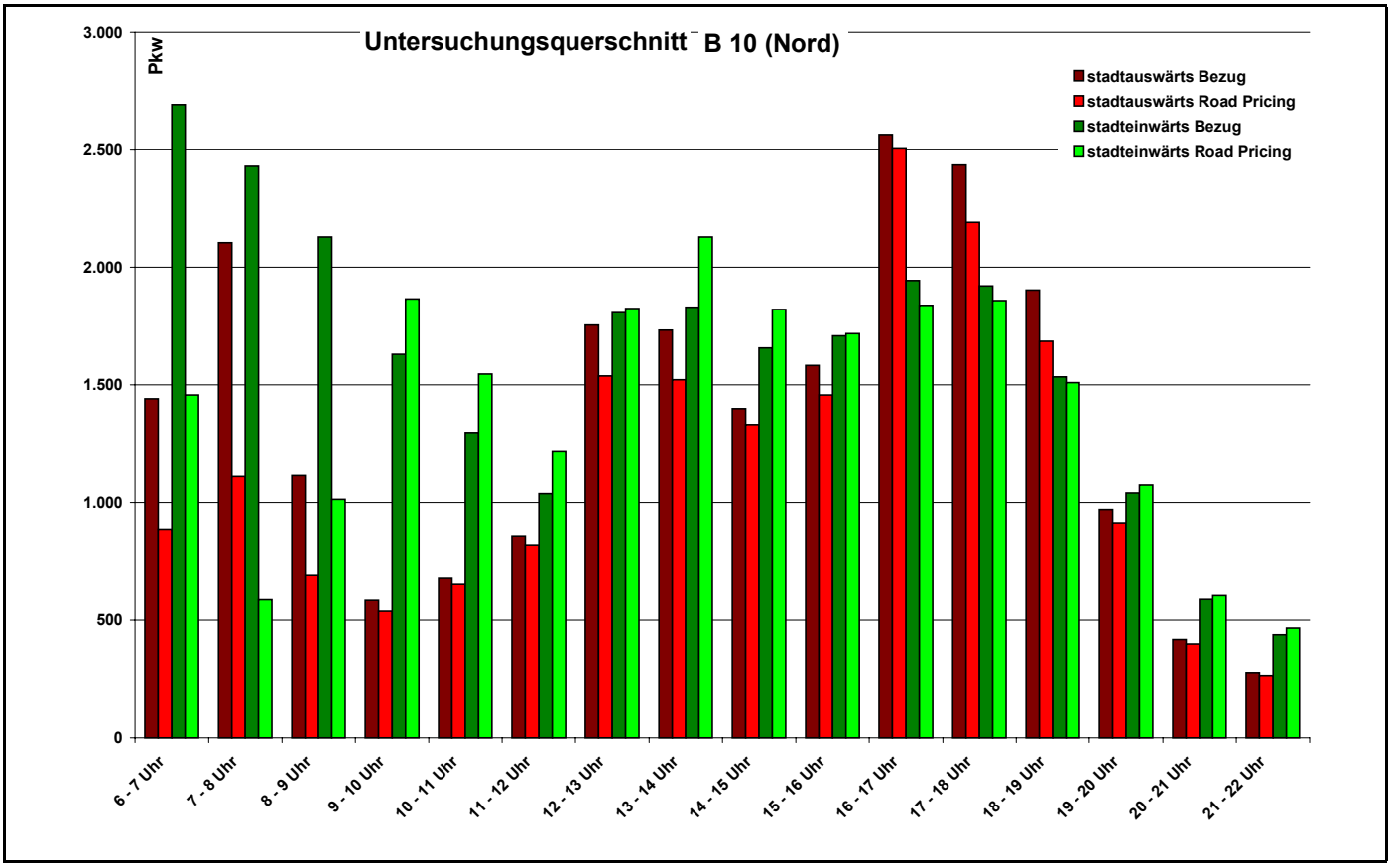


Abbildung A8 - 4: Vergleich der Tagesganglinien am Untersuchungsquerschnitt B 10 (Nord)

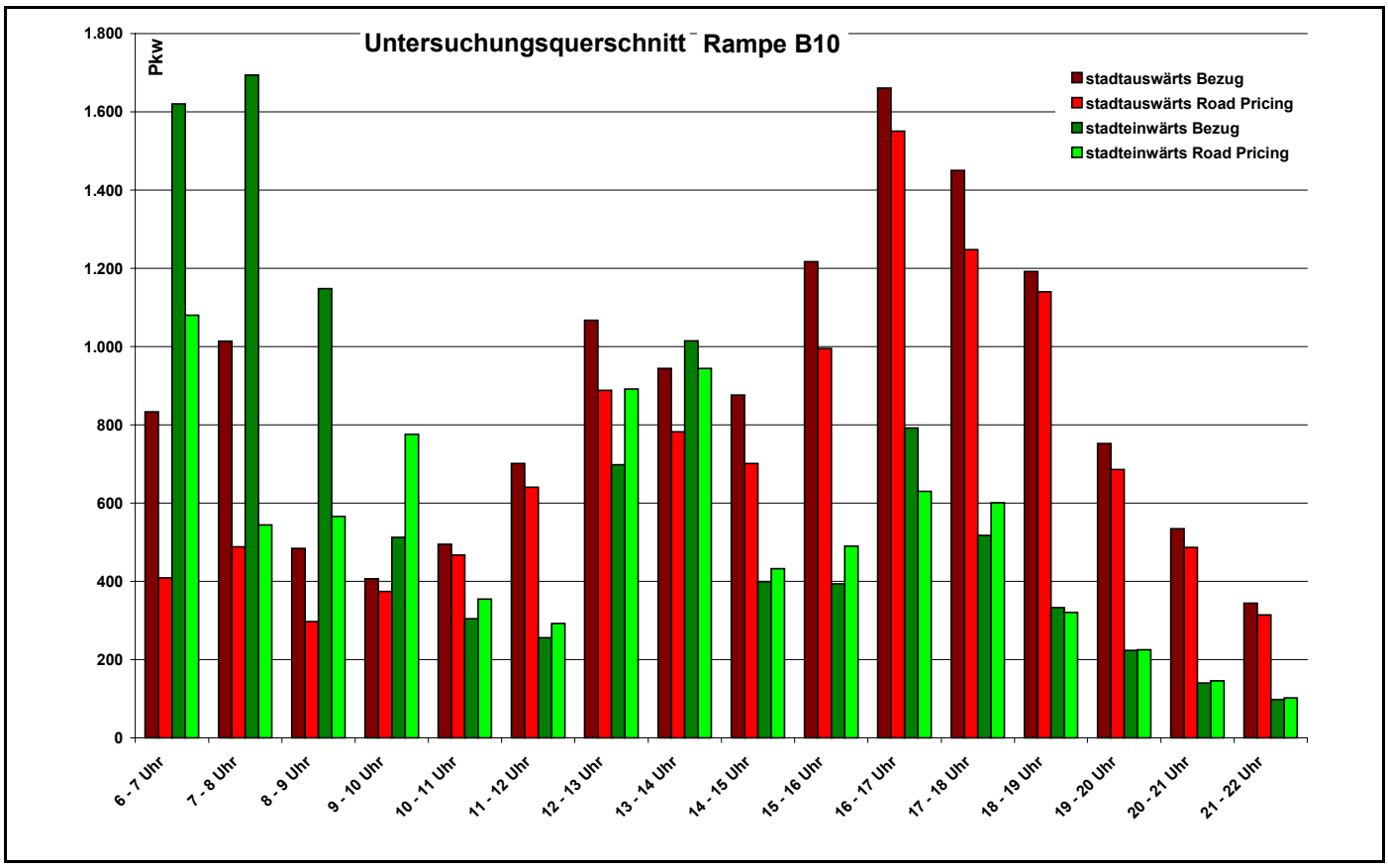


Abbildung A8 - 5: Vergleich der Tagesganglinien am Untersuchungsquerschnitt B 10 Rampe (Nord)

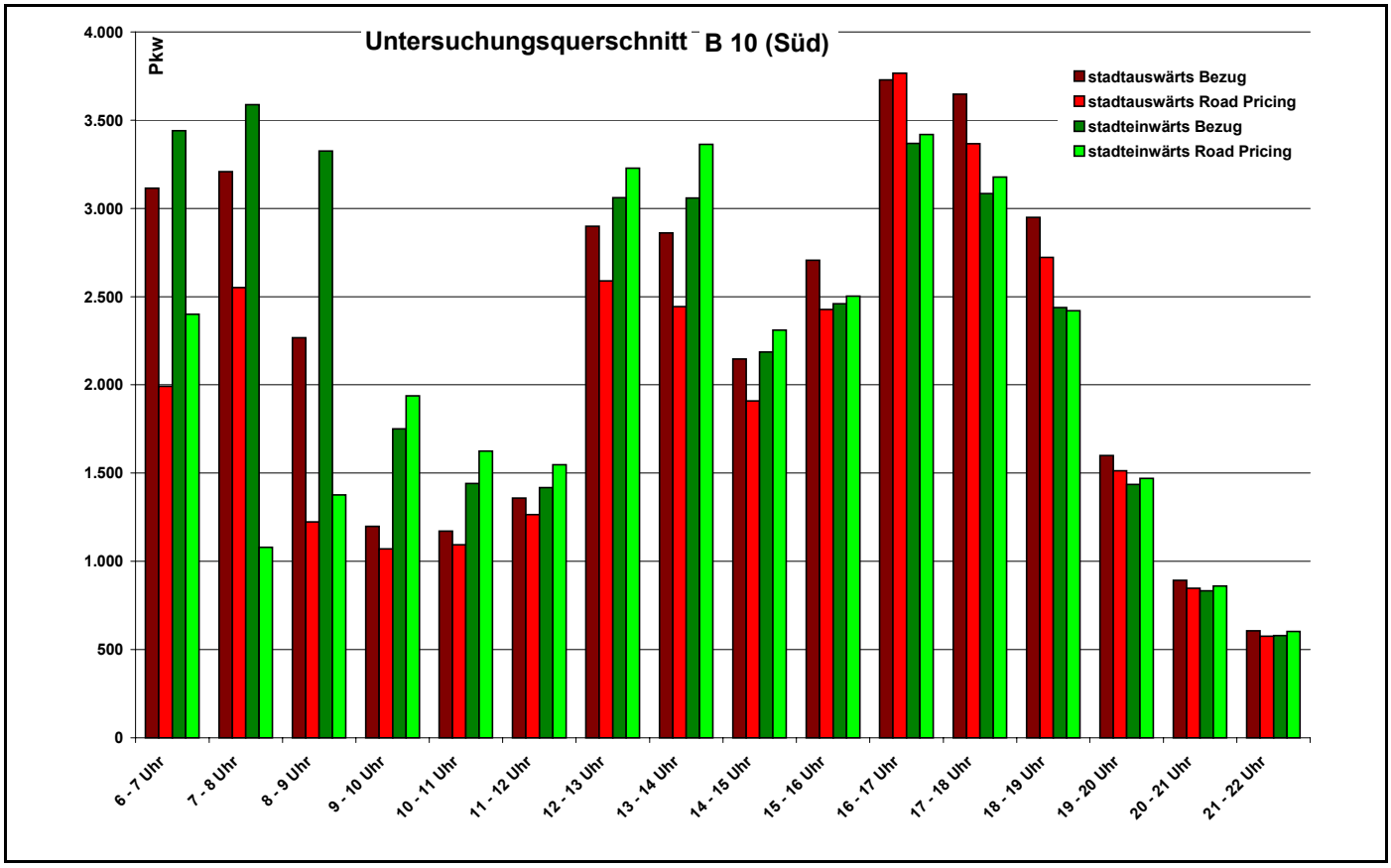


Abbildung A8 - 6: Vergleich der Tagesganglinien am Untersuchungsquerschnitt B 10 (Süd)

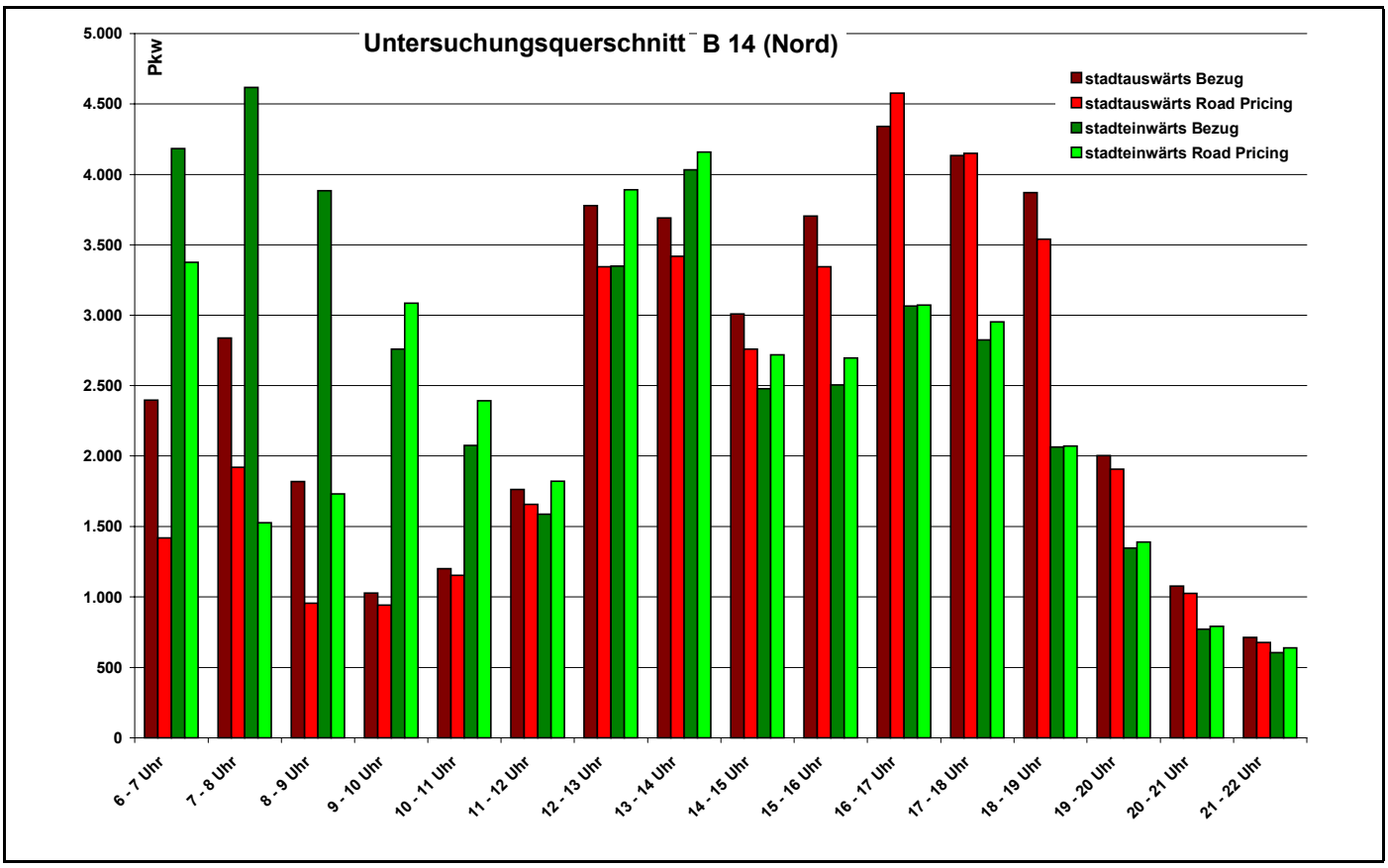


Abbildung A8 - 7: Vergleich der Tagesganglinien am Untersuchungsquerschnitt B 14 (Nord)

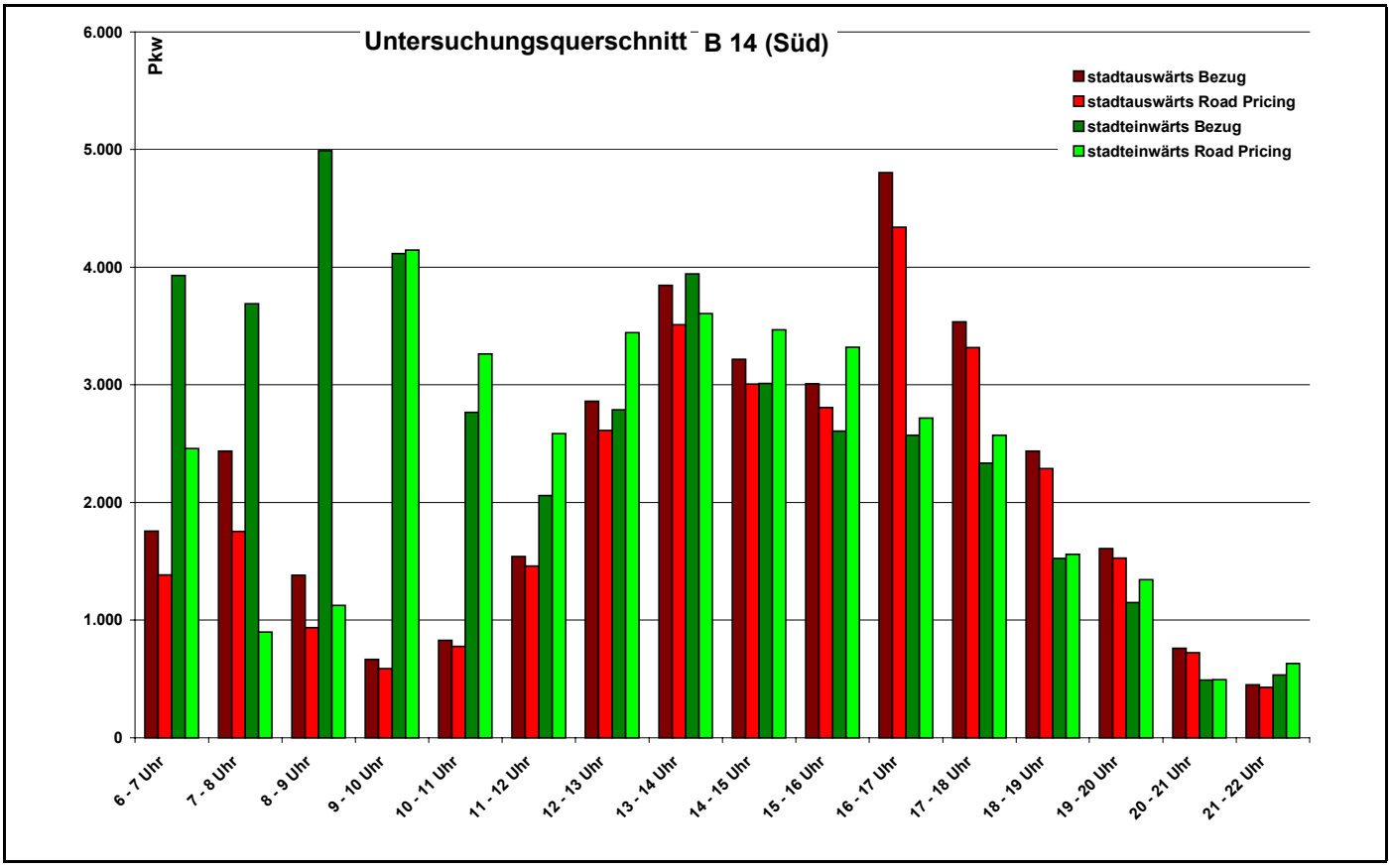


Abbildung A8 - 8: Vergleich der Tagesganglinien am Untersuchungsquerschnitt B 14 (Süd)

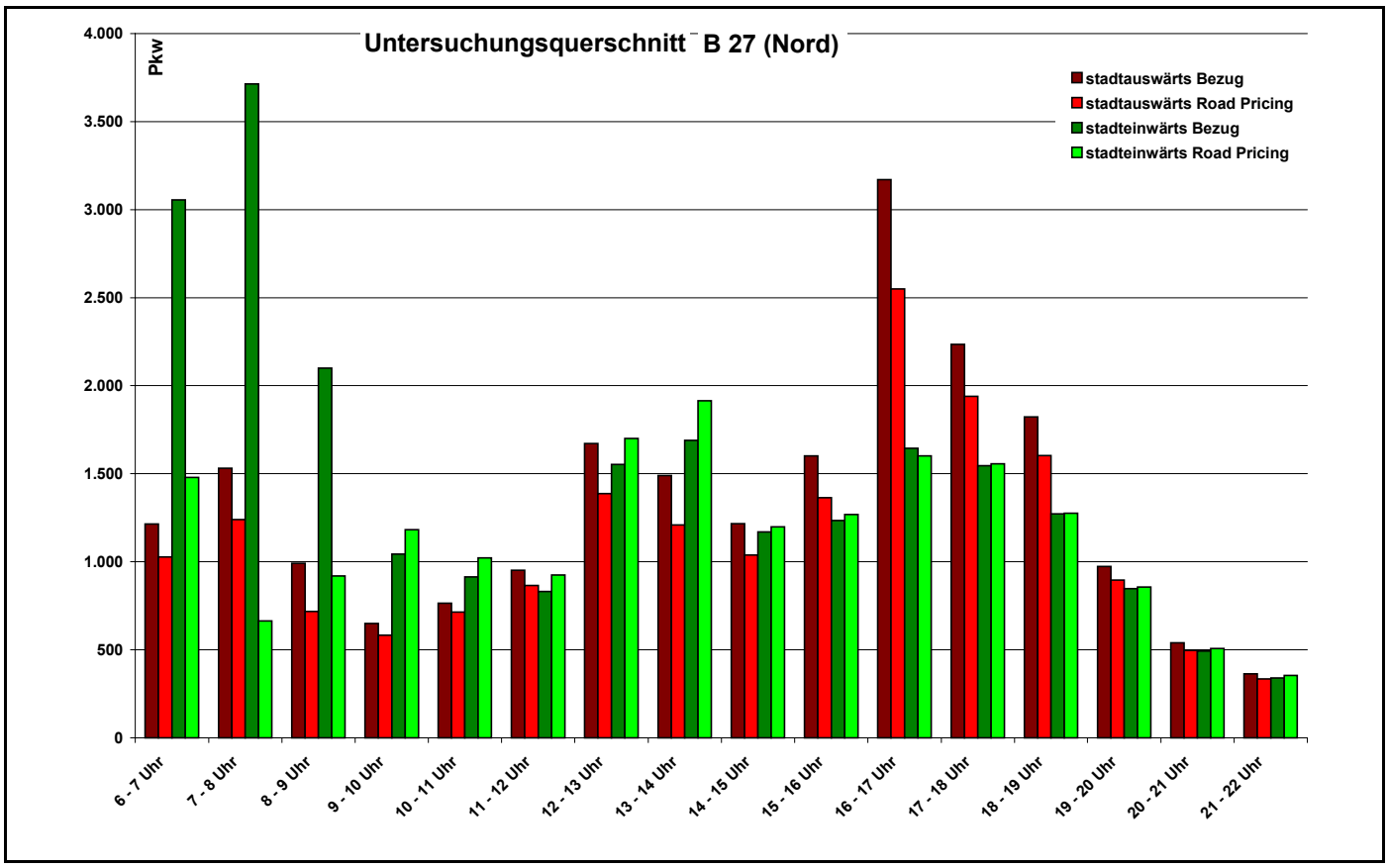


Abbildung A8 - 9: Vergleich der Tagesganglinien am Untersuchungsquerschnitt B 27 (Nord)

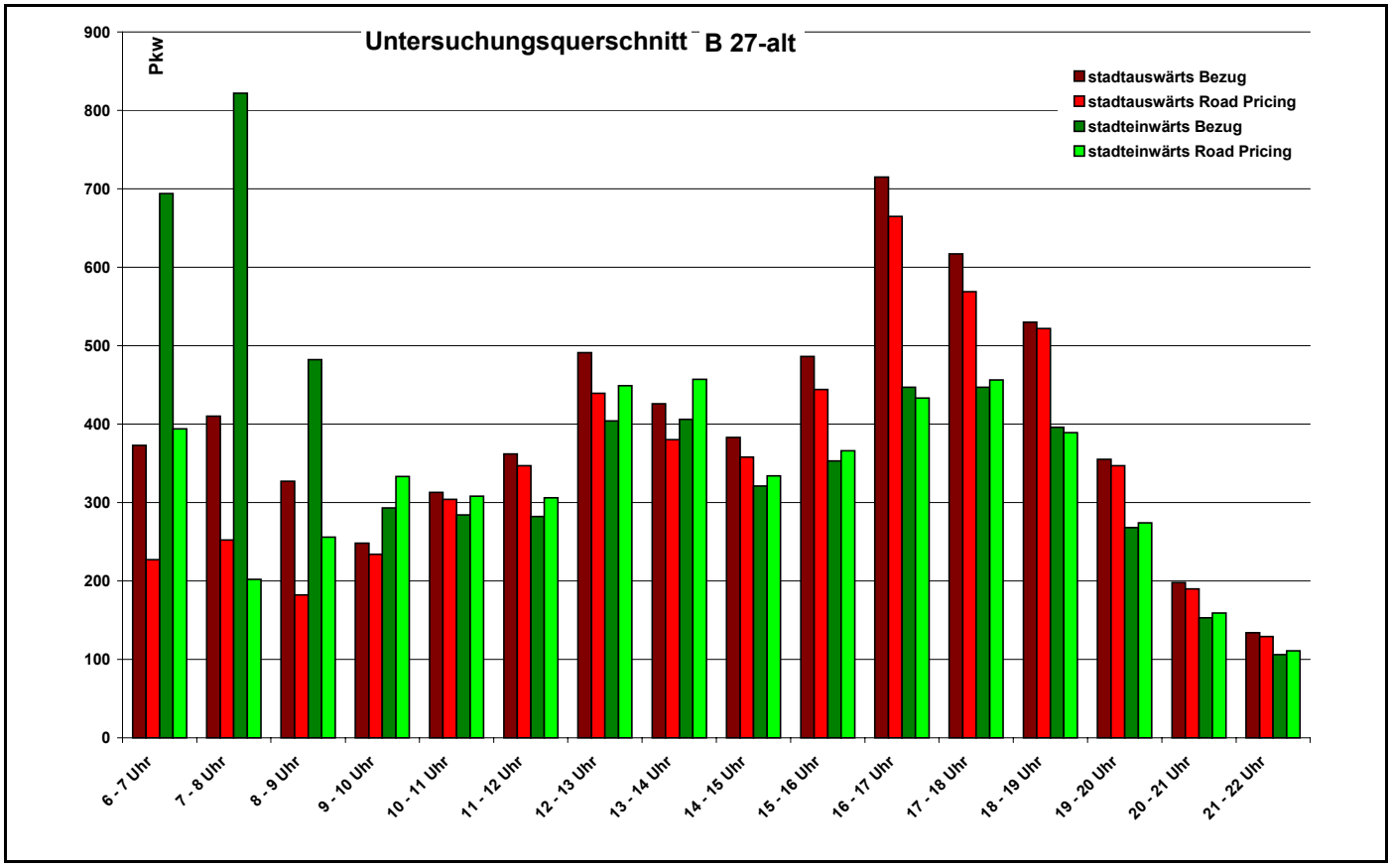


Abbildung A8 - 10: Vergleich der Tagesganglinien am Untersuchungsquerschnitt B 27 alt (Nord)

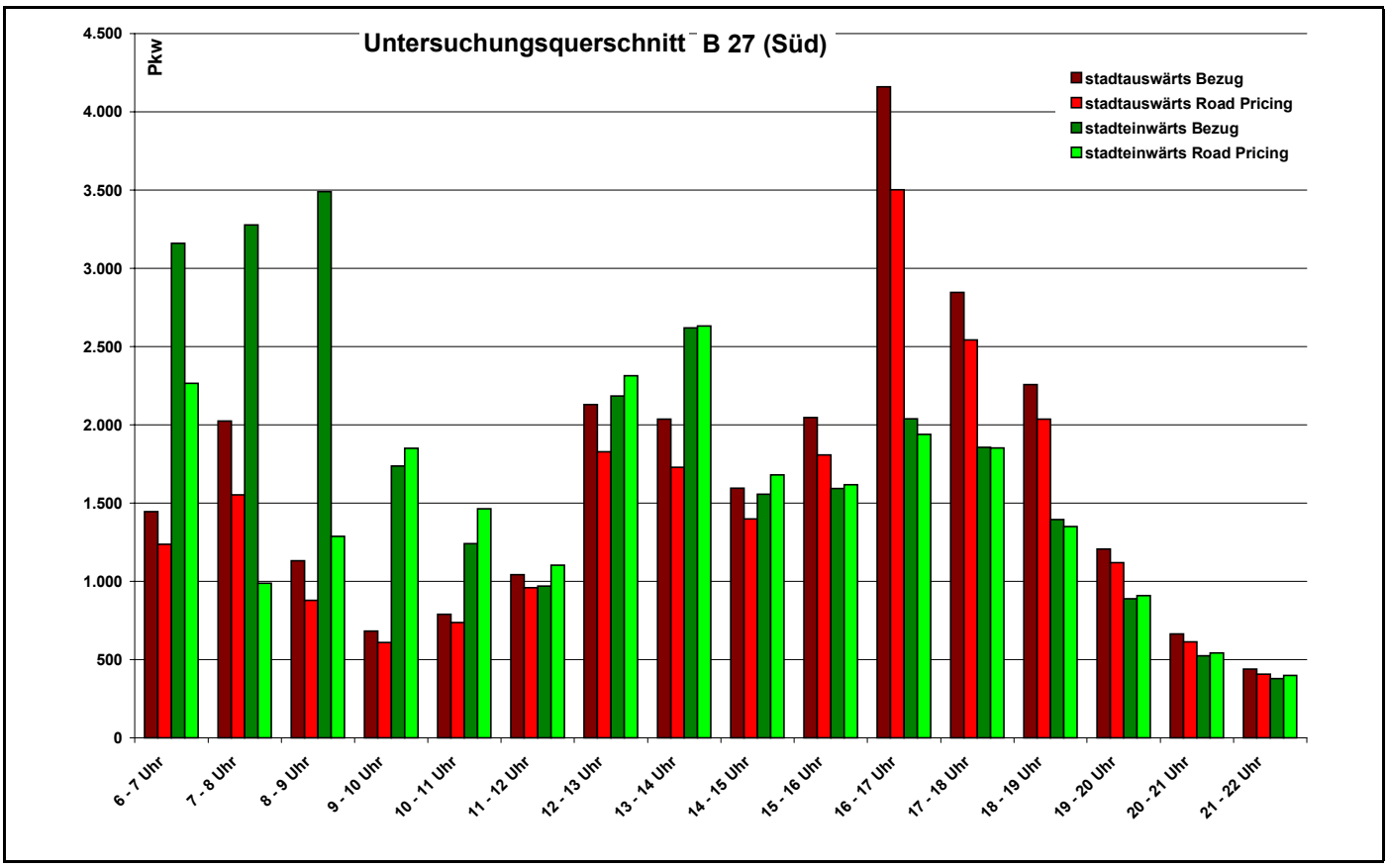


Abbildung A8 - 11: Vergleich der Tagesganglinien am Untersuchungsquerschnitt B 27 (Süd)

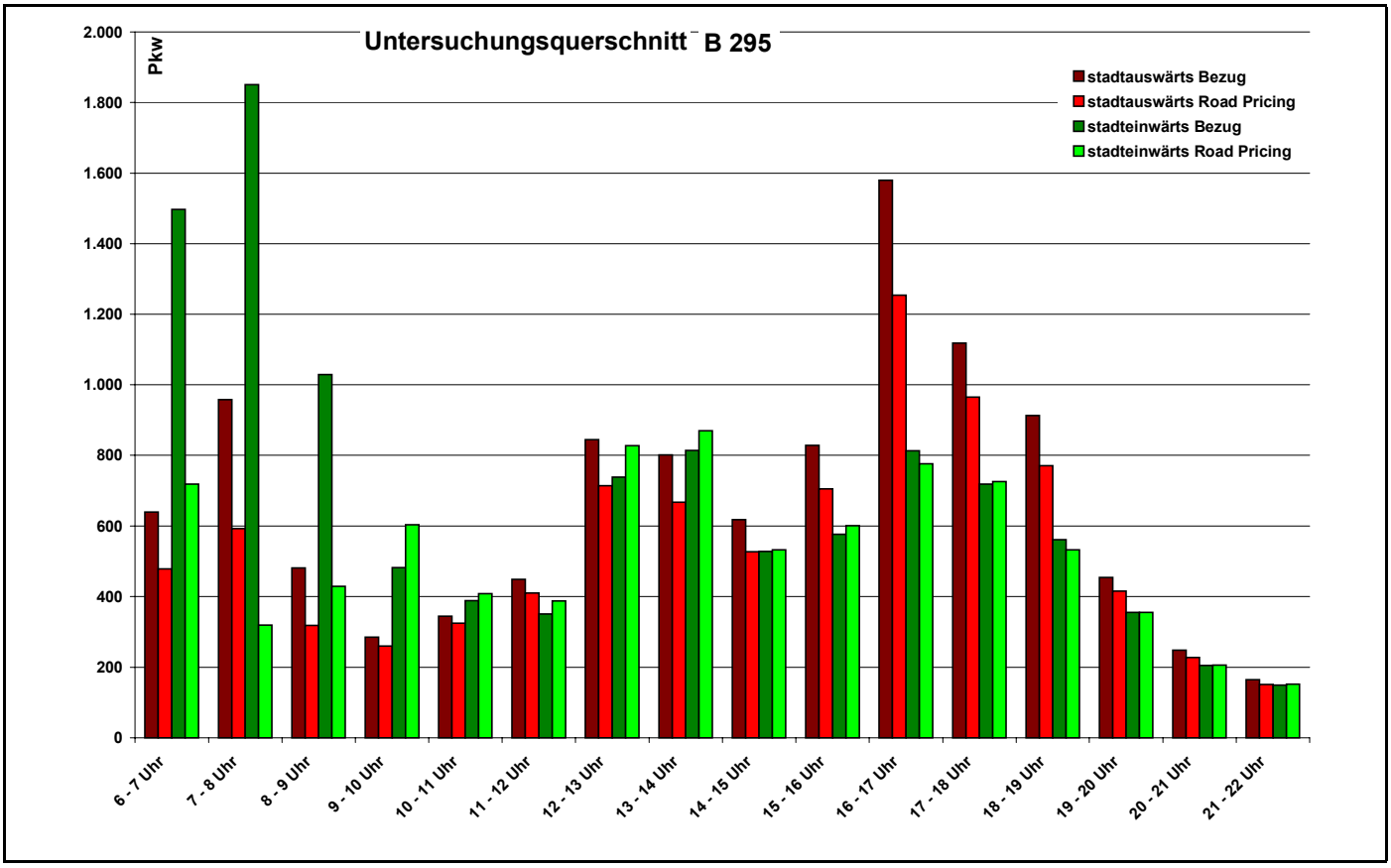


Abbildung A8 - 12: Vergleich der Tagesganglinien am Untersuchungsquerschnitt B 295 (West)

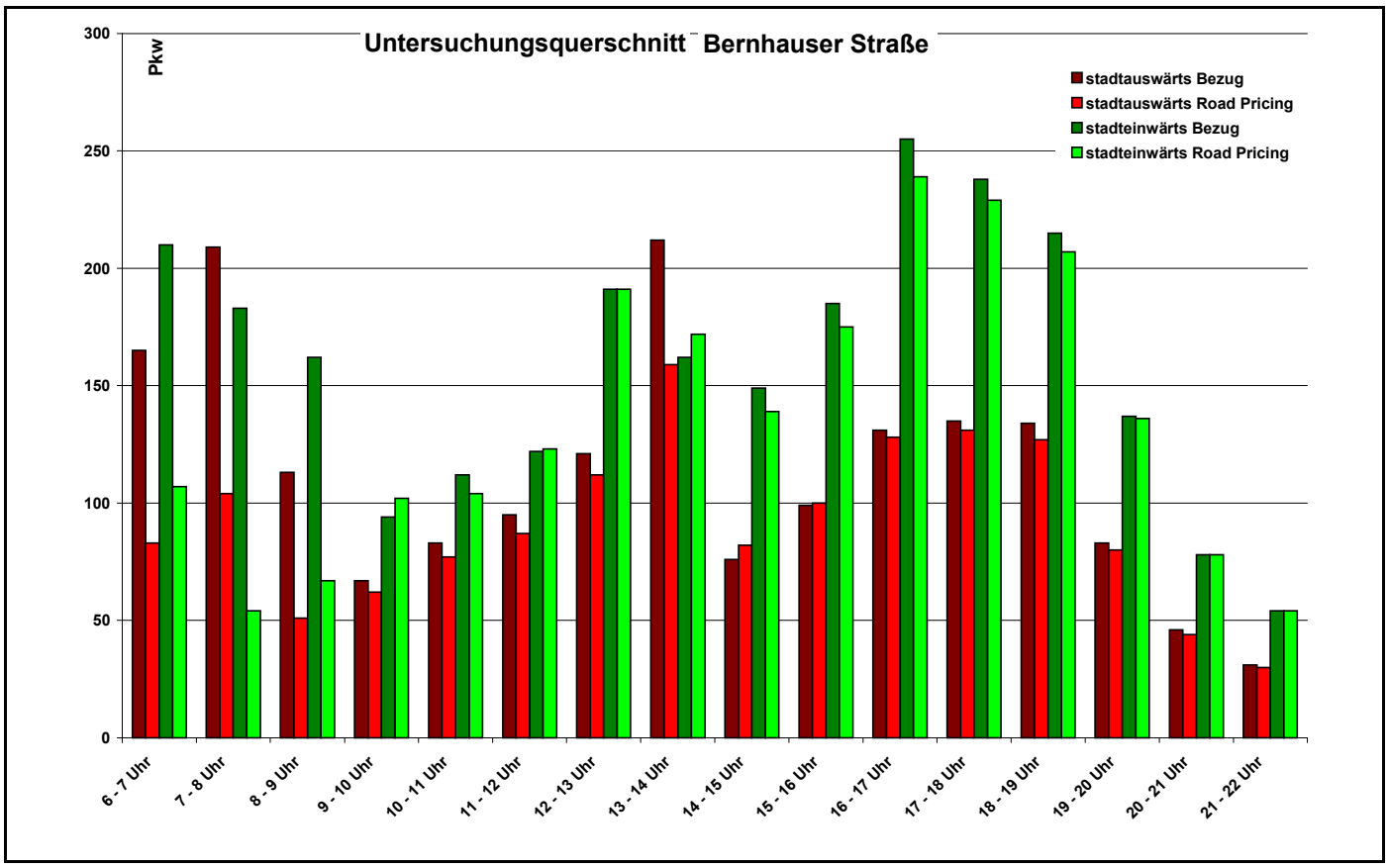


Abbildung A8 - 13: Vergleich der Tagesganglinien am Untersuchungsquerschnitt Bernhauser Straße

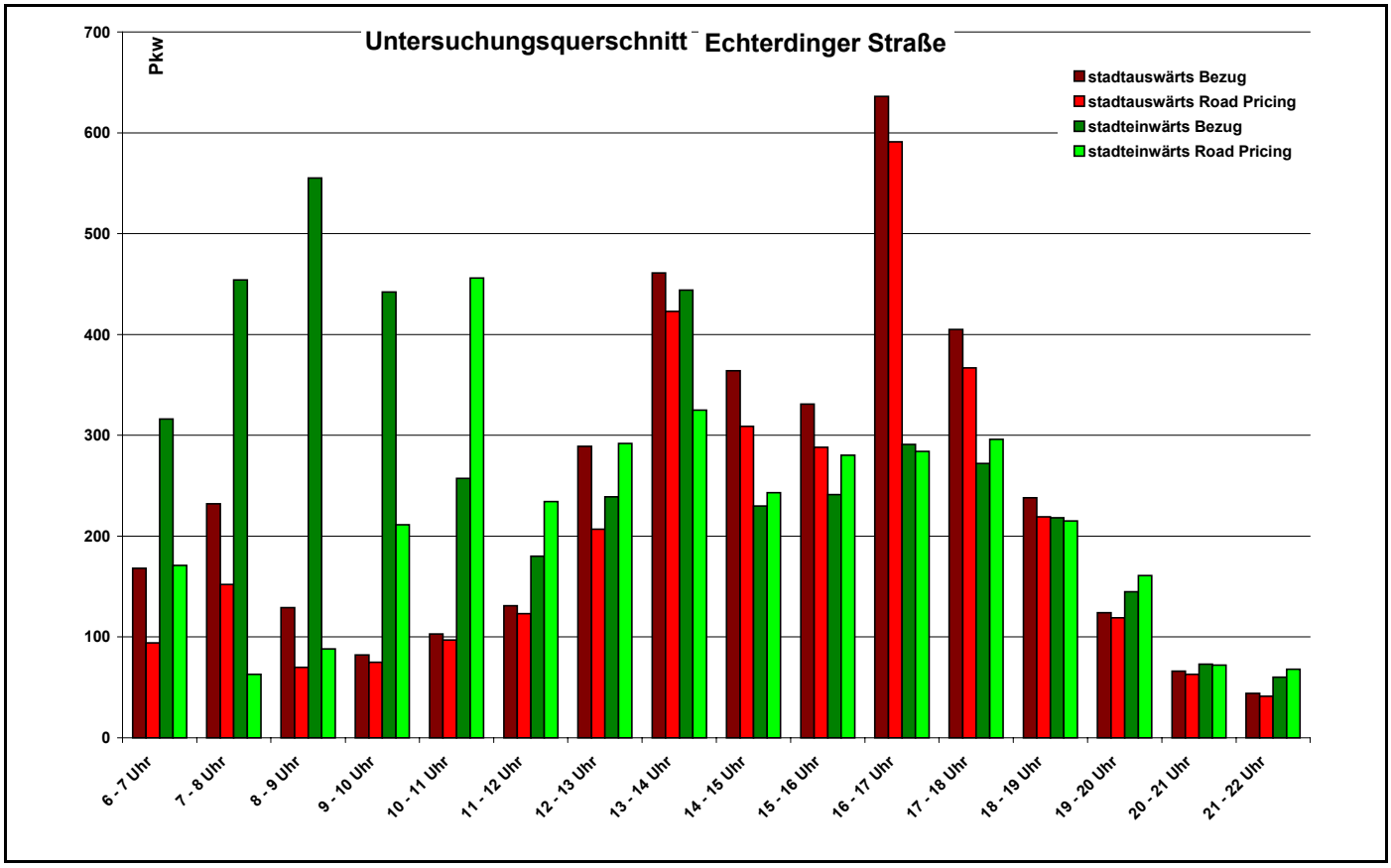


Abbildung A8 - 14: Vergleich der Tagesganglinien am Untersuchungsquerschnitt Echterdinger Straße

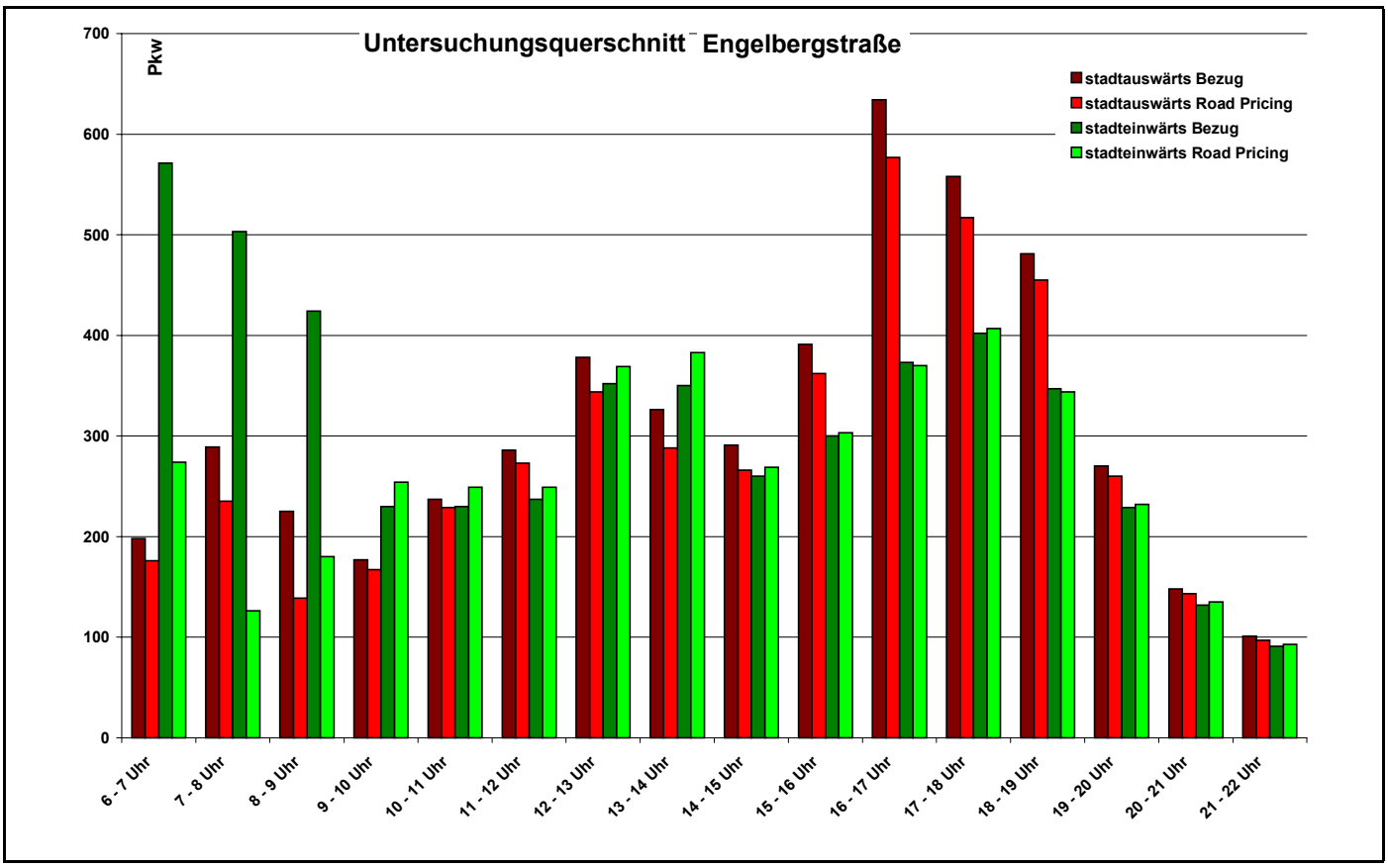


Abbildung A8 - 15: Vergleich der Tagesganglinien am Untersuchungsquerschnitt Engelbergstraße

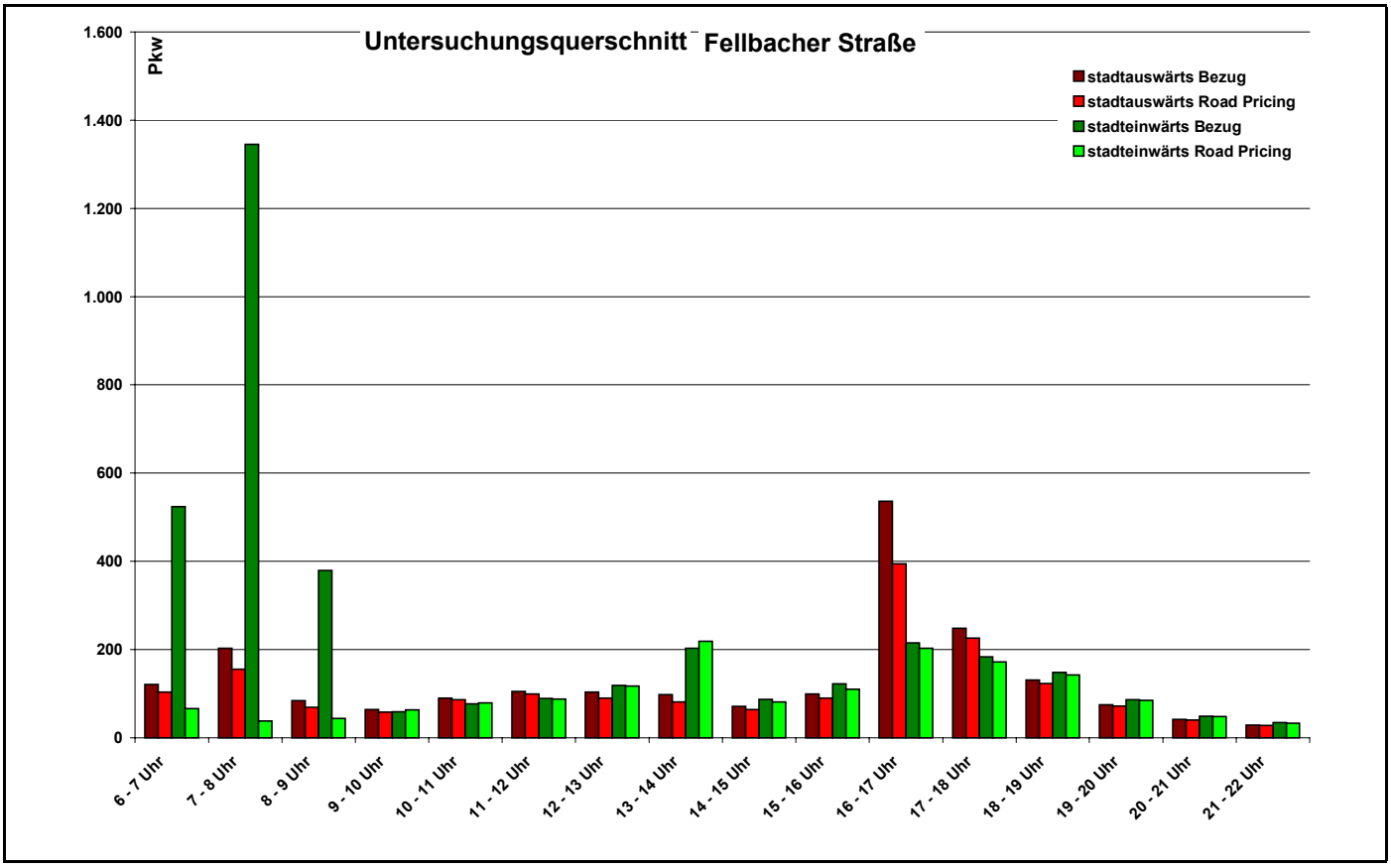


Abbildung A8 - 16: Vergleich der Tagesganglinien am Untersuchungsquerschnitt Fellbacher Straße

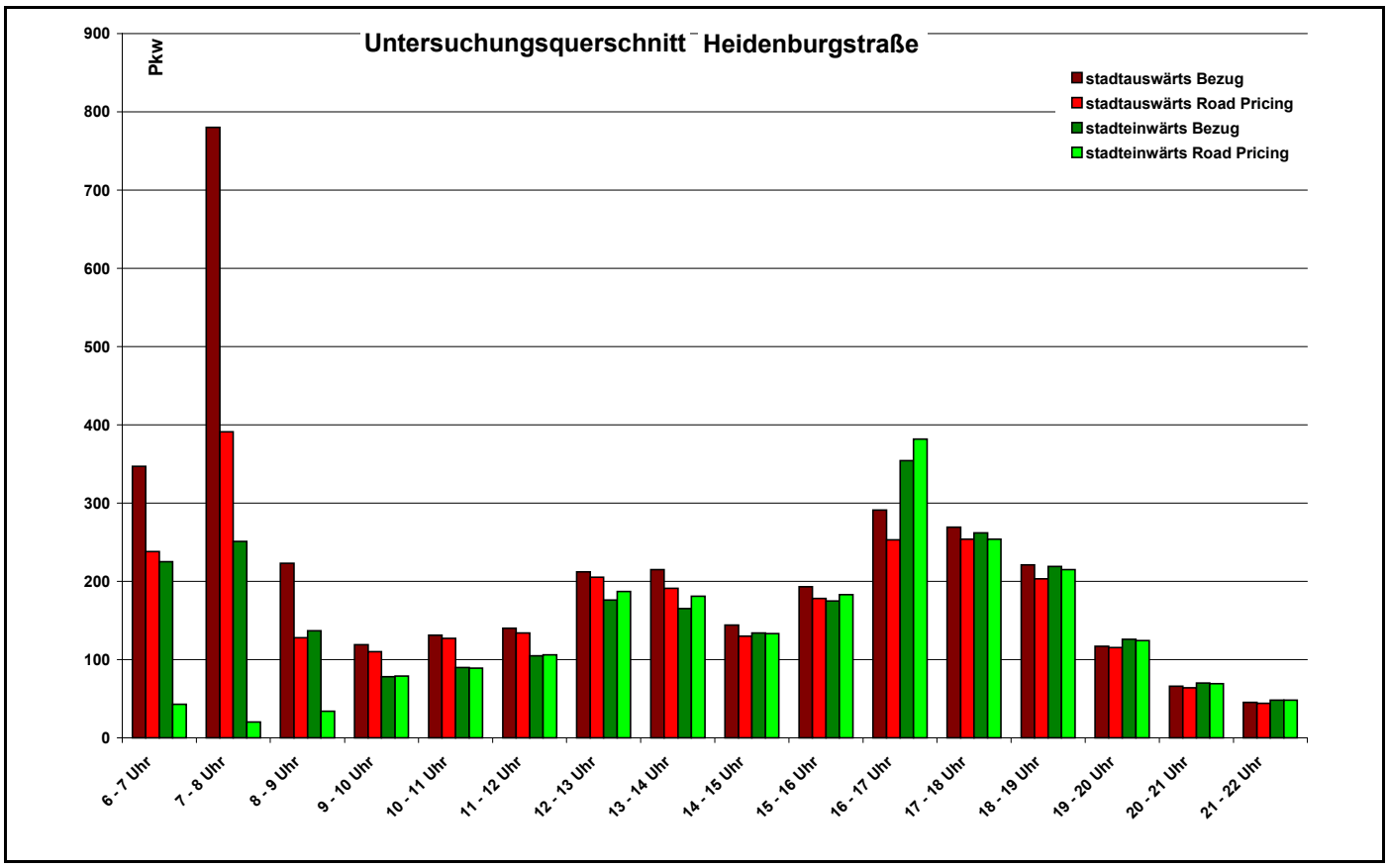


Abbildung A8 - 17: Vergleich der Tagesganglinien am Untersuchungsquerschnitt Heidenburgstraße

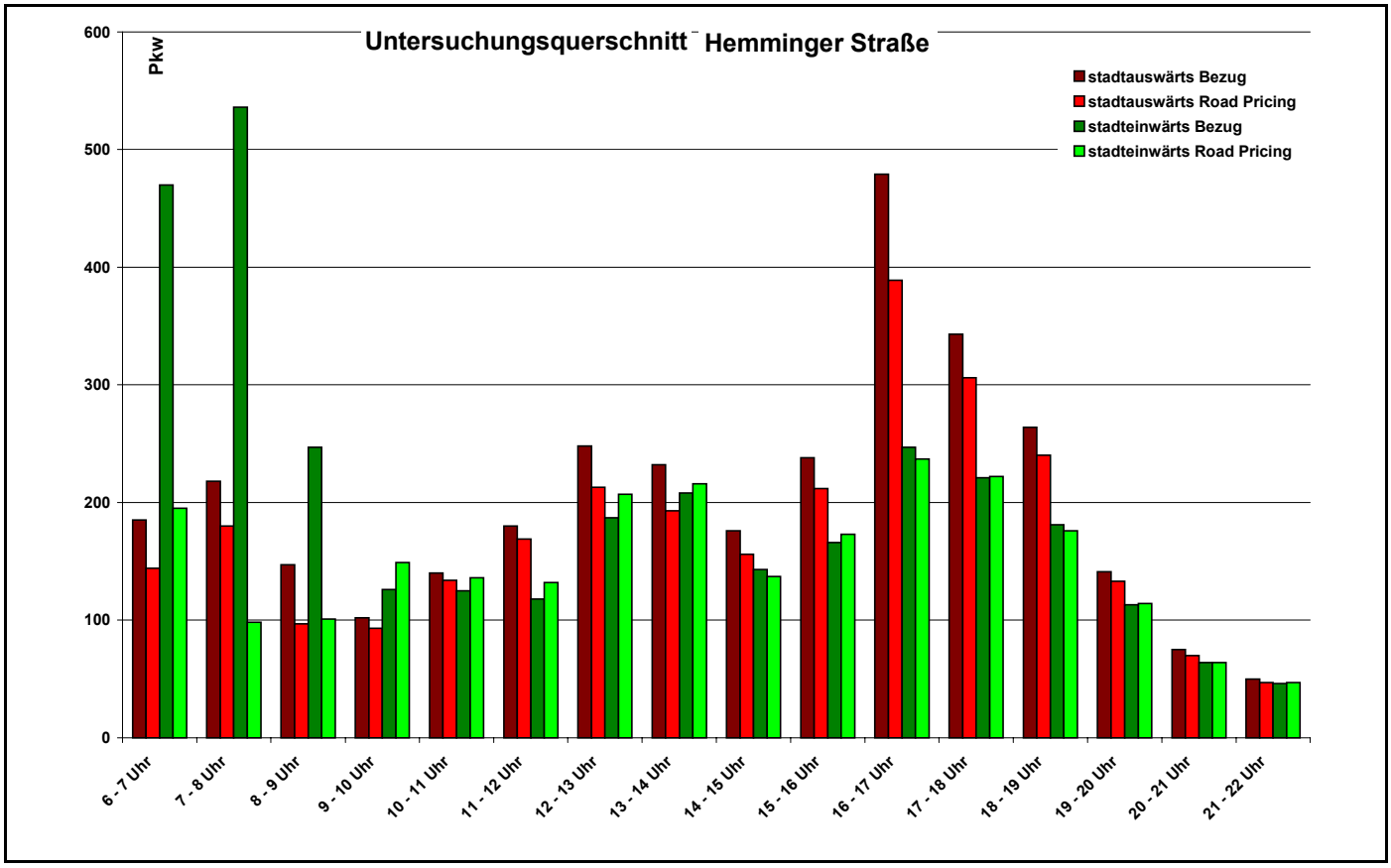


Abbildung A8 - 18: Vergleich der Tagesganglinien am Untersuchungsquerschnitt Hemminger Straße

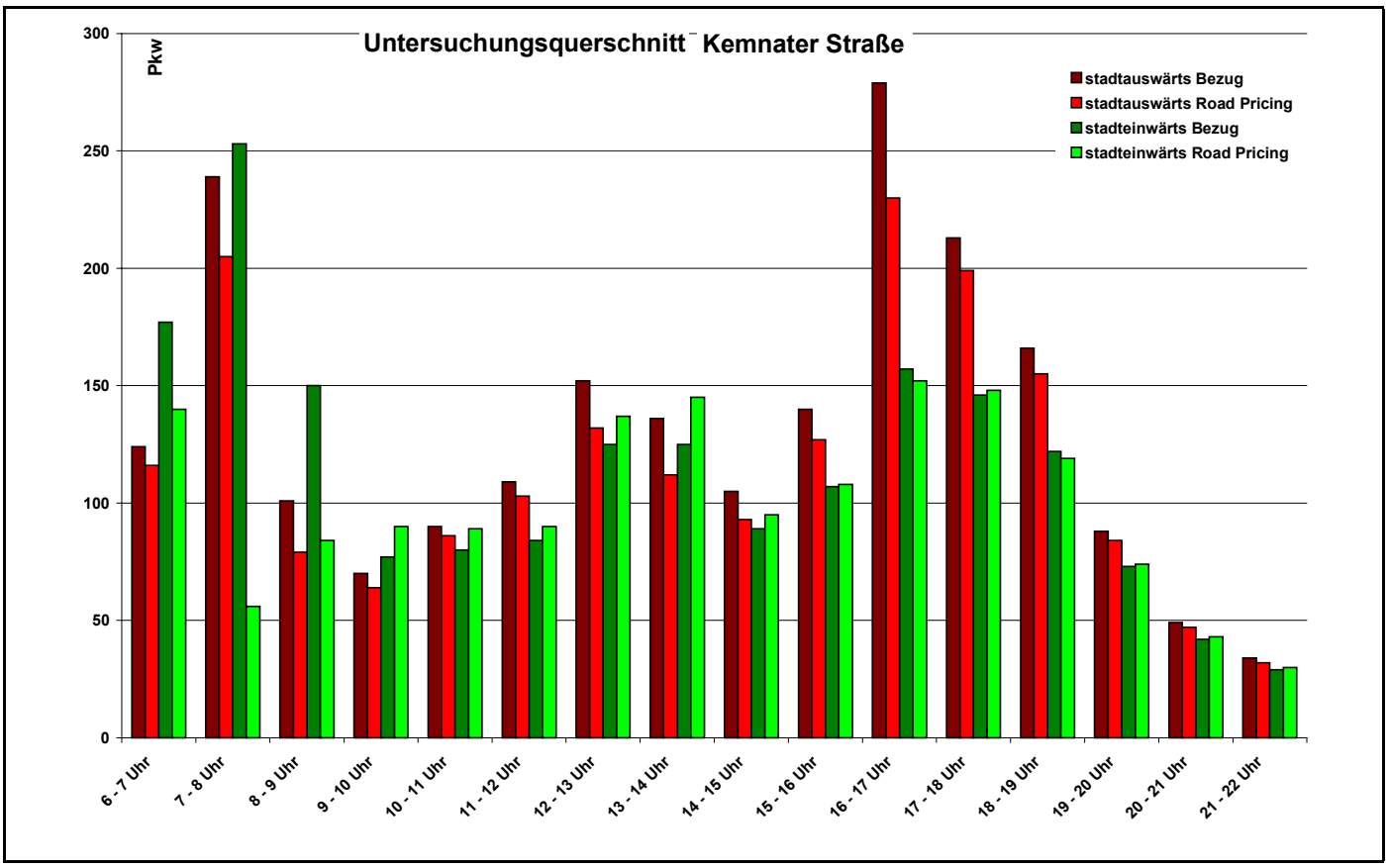


Abbildung A8 - 19: Vergleich der Tagesganglinien am Untersuchungsquerschnitt Kemnater Straße

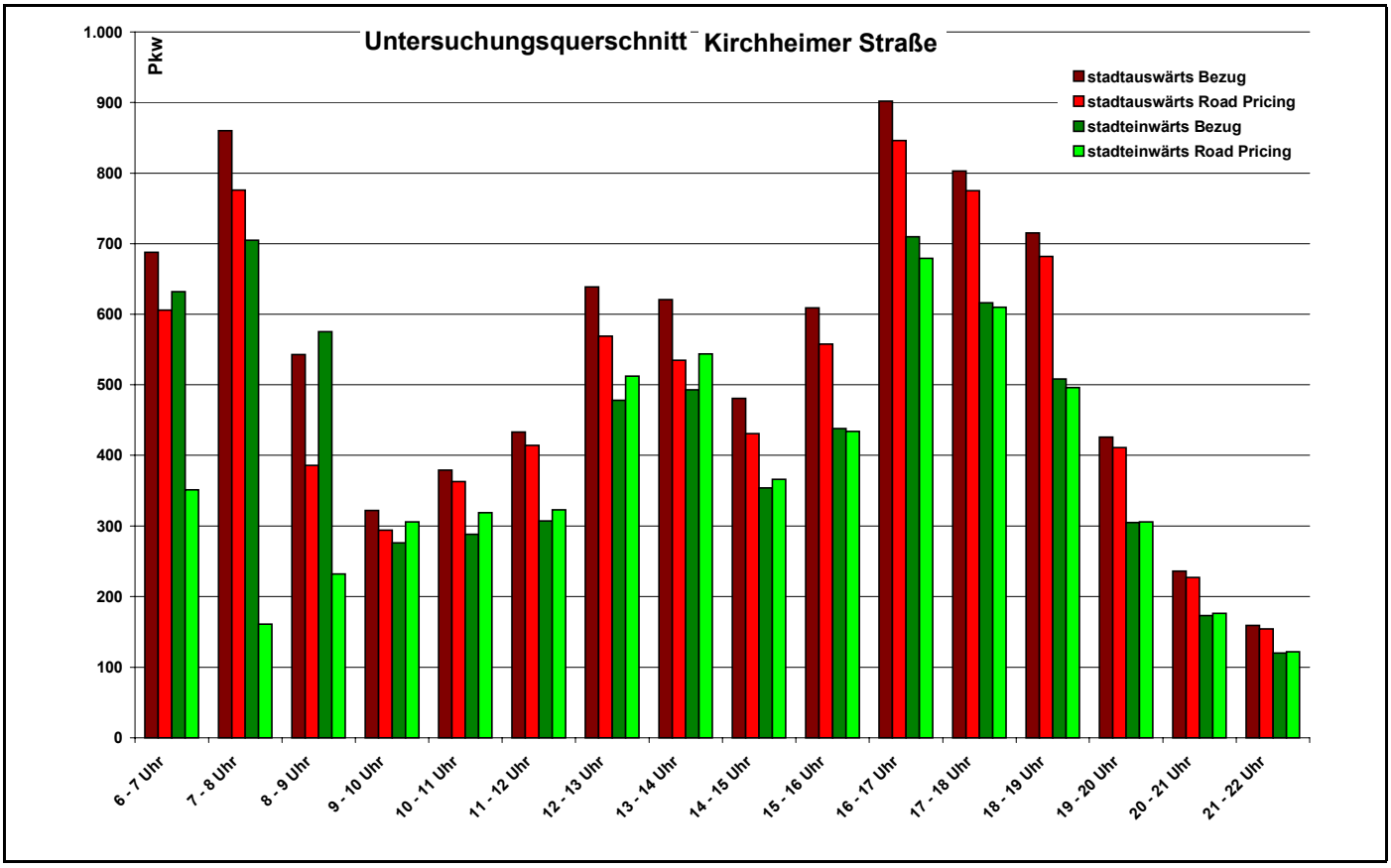


Abbildung A8 - 20: Vergleich der Tagesganglinien am Untersuchungsquerschnitt Kirchheimer Straße

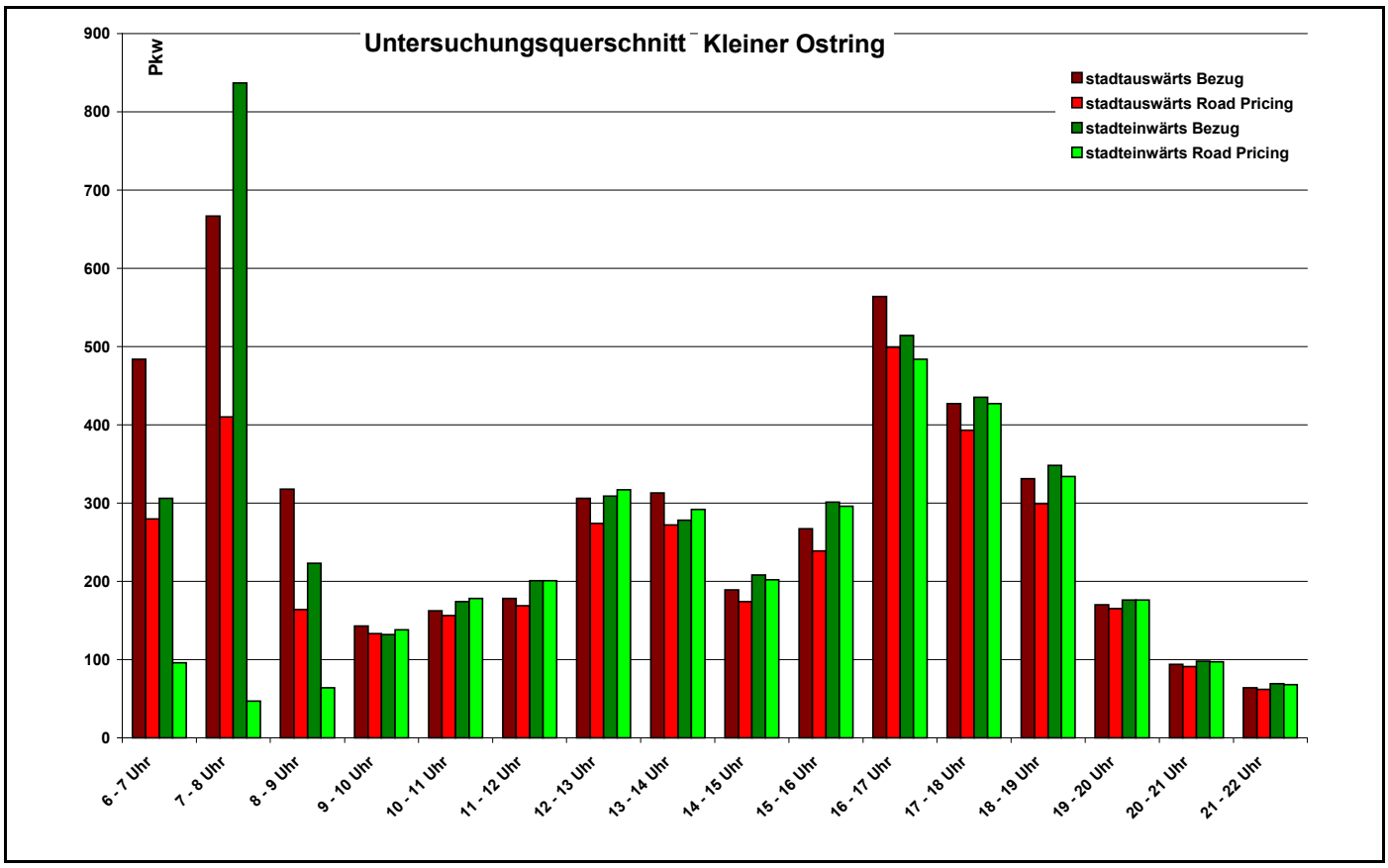


Abbildung A8 - 21: Vergleich der Tagesganglinien am Untersuchungsquerschnitt Kleiner Ostring

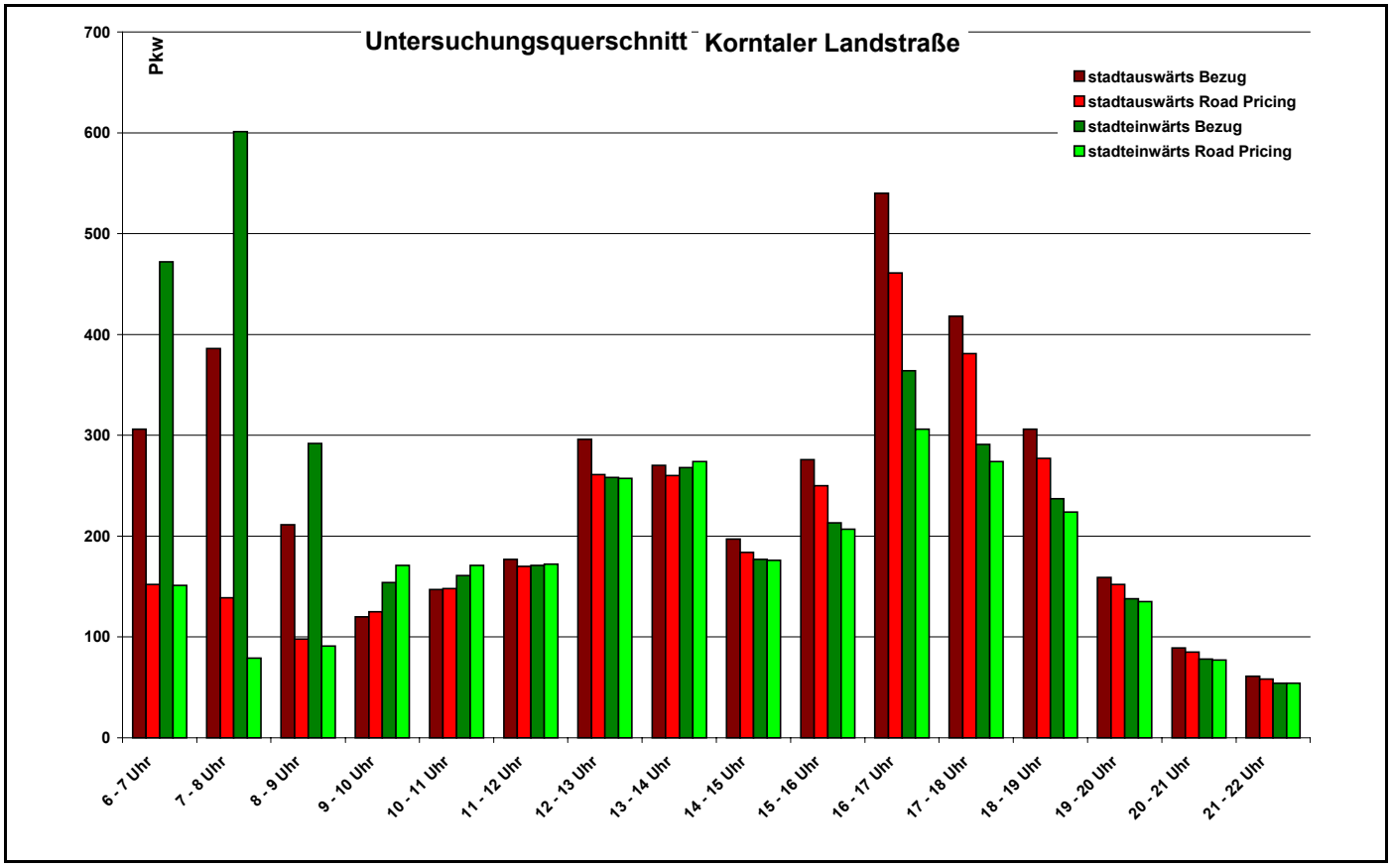


Abbildung A8 - 22: Vergleich der Tagesganglinien am Untersuchungsquerschnitt Korntaler Landstraße

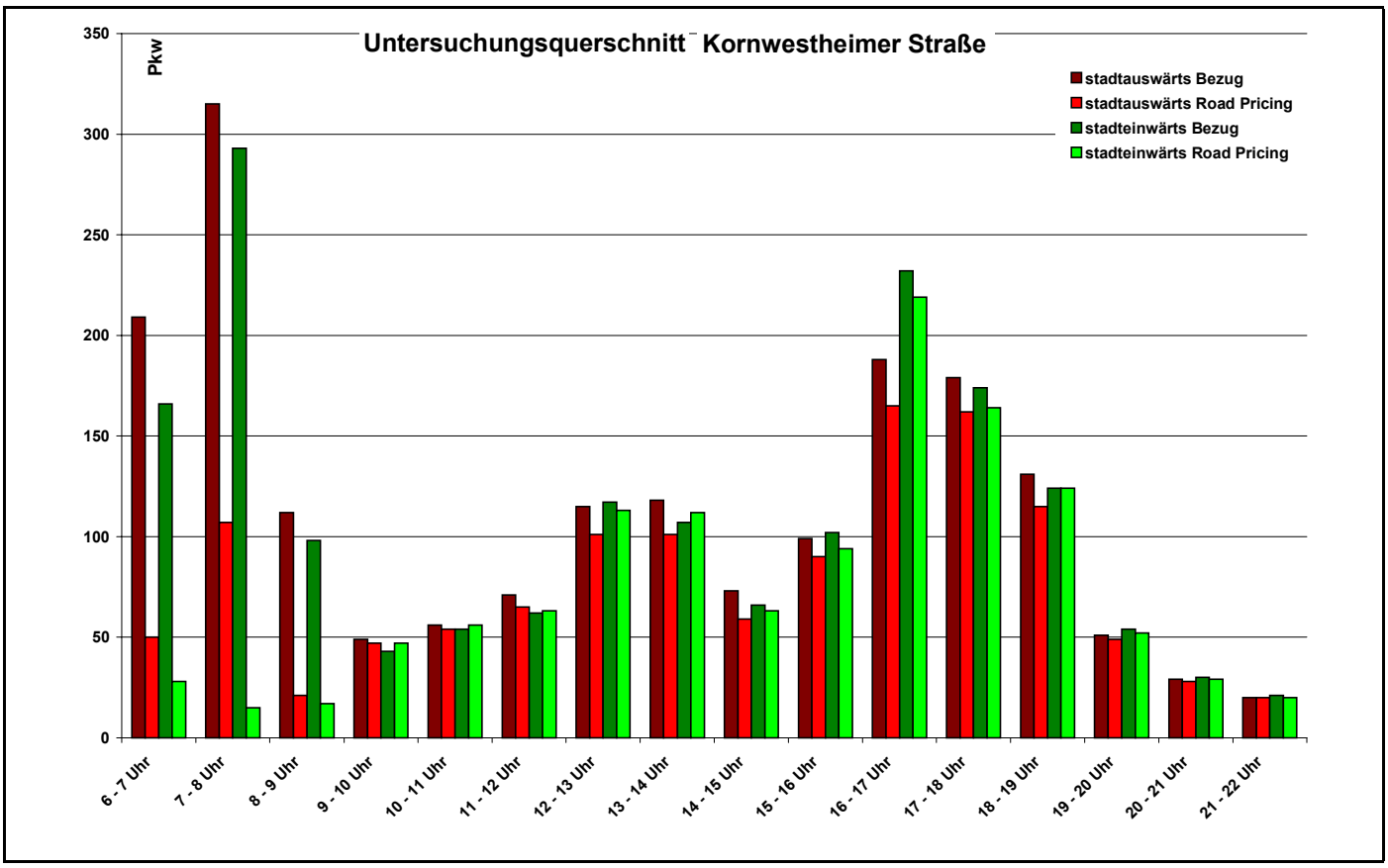


Abbildung A8 - 23: Vergleich der Tagesganglinien am Untersuchungsquerschnitt Kornwestheimer Straße

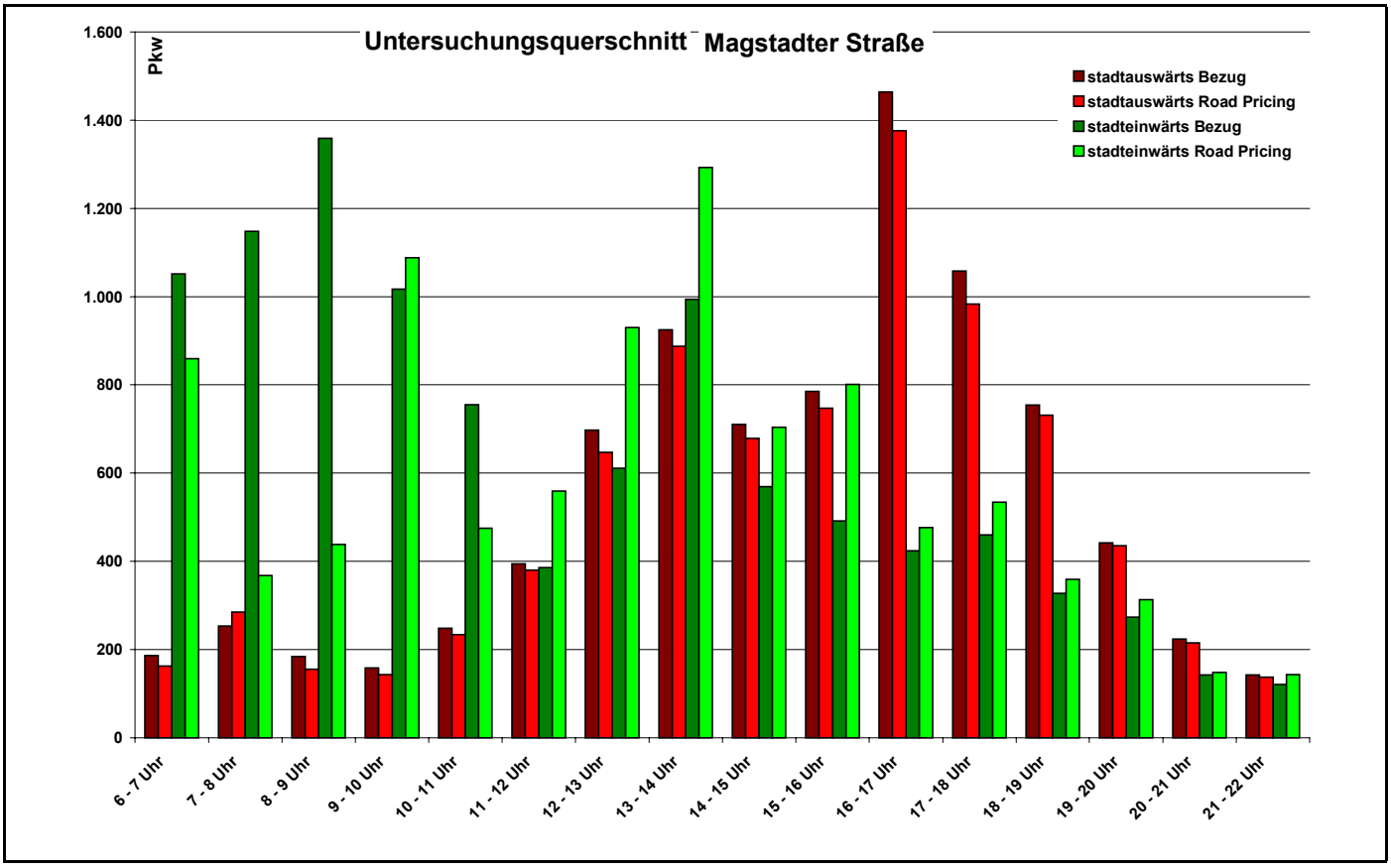


Abbildung A8 - 24: Vergleich der Tagesganglinien am Untersuchungsquerschnitt Magstadter Straße

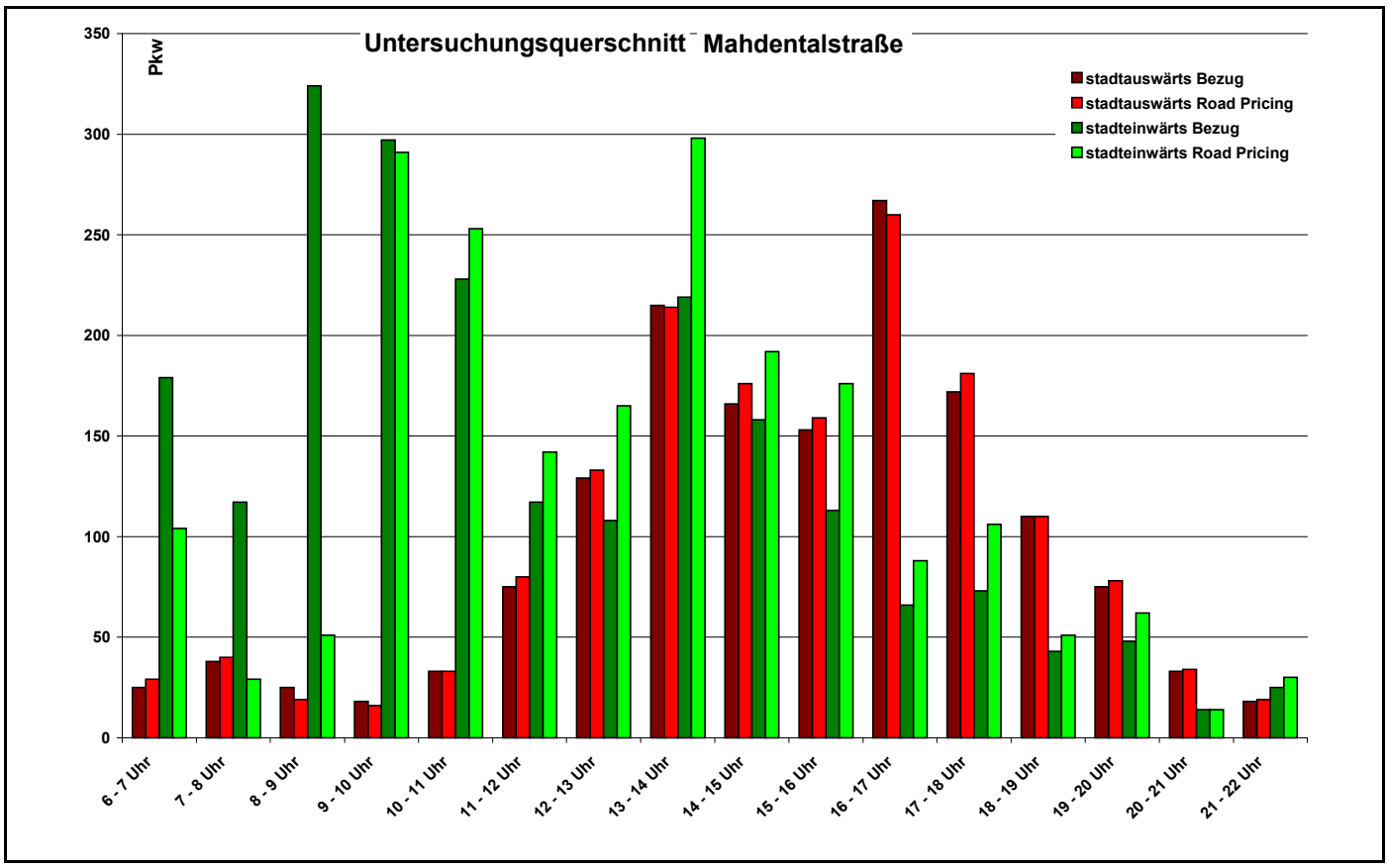


Abbildung A8 - 25: Vergleich der Tagesganglinien am Untersuchungsquerschnitt Mahdentalstraße

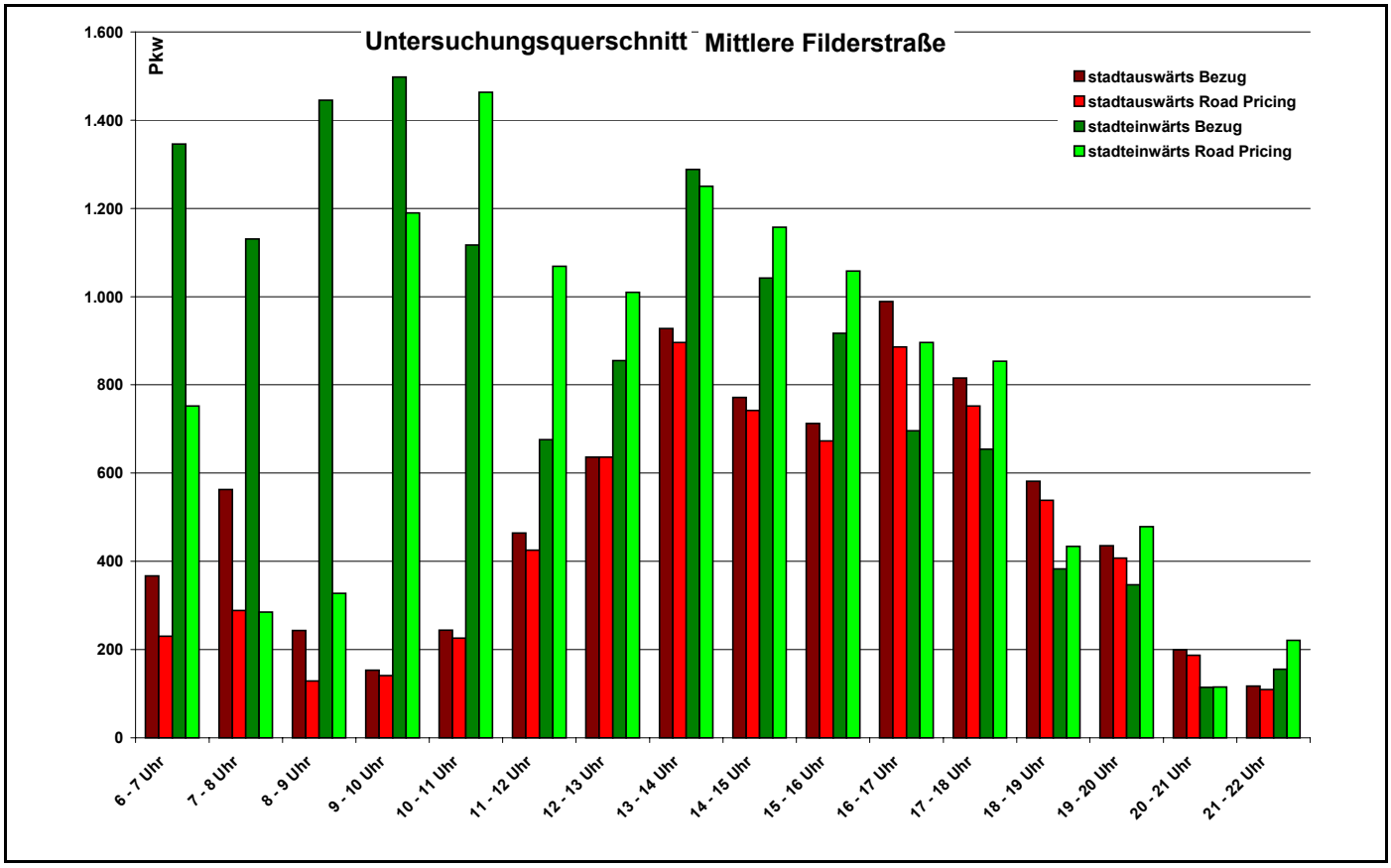


Abbildung A8 - 26: Vergleich der Tagesganglinien am Untersuchungsquerschnitt Mittlere Filderstraße

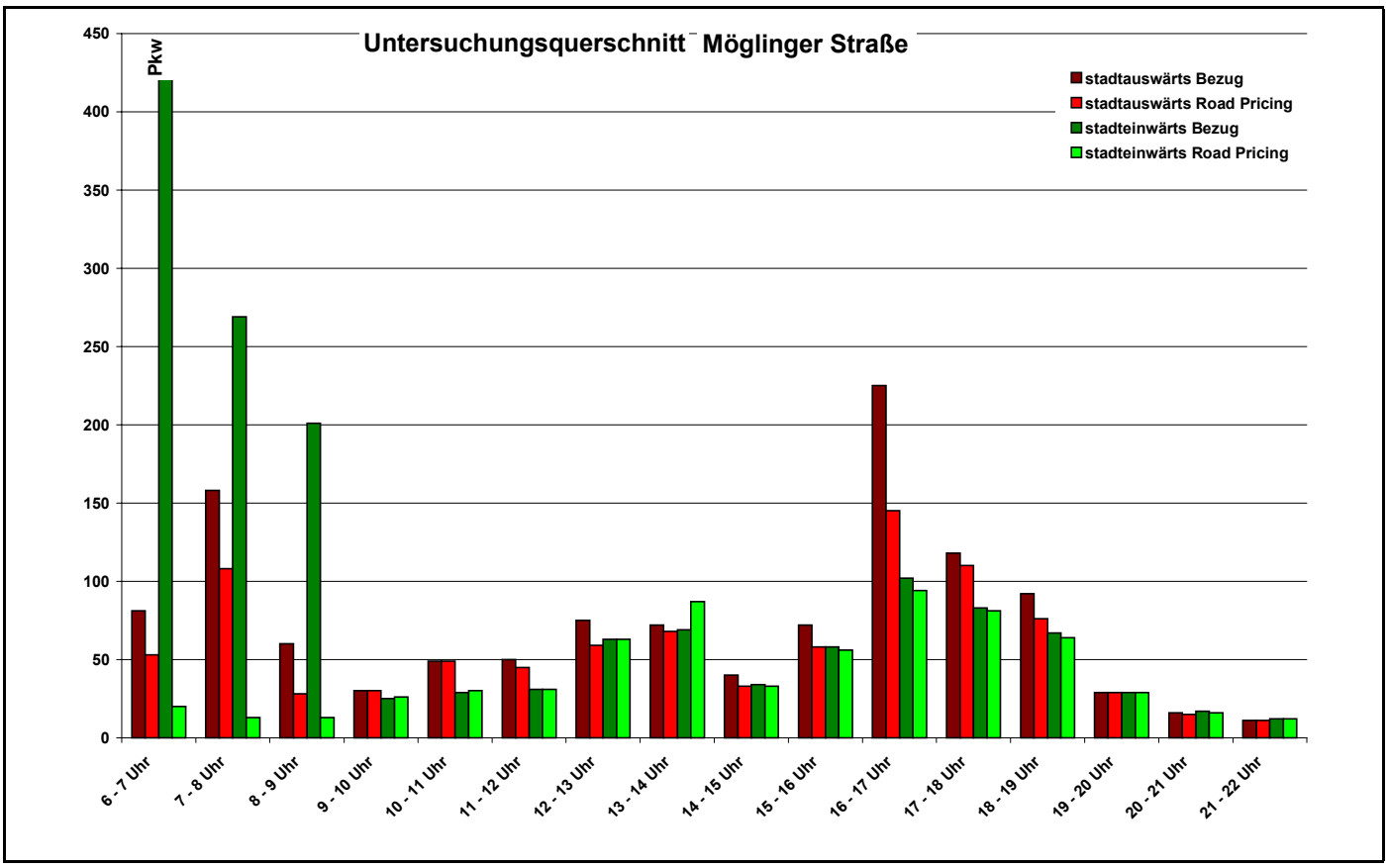


Abbildung A8 - 27: Vergleich der Tagesganglinien am Untersuchungsquerschnitt Möglinger Straße

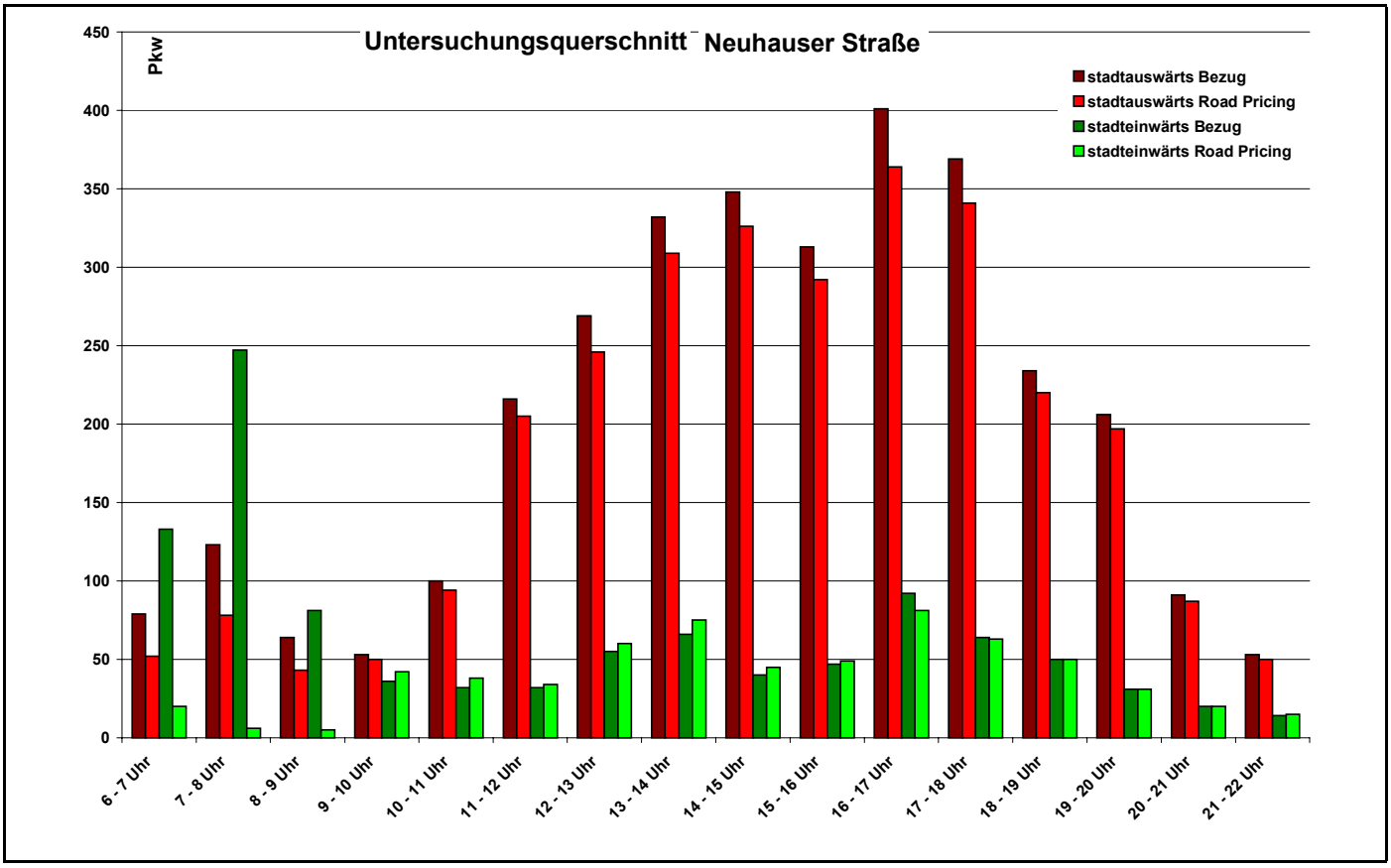


Abbildung A8 - 28: Vergleich der Tagesganglinien am Untersuchungsquerschnitt Neuhauser Straße

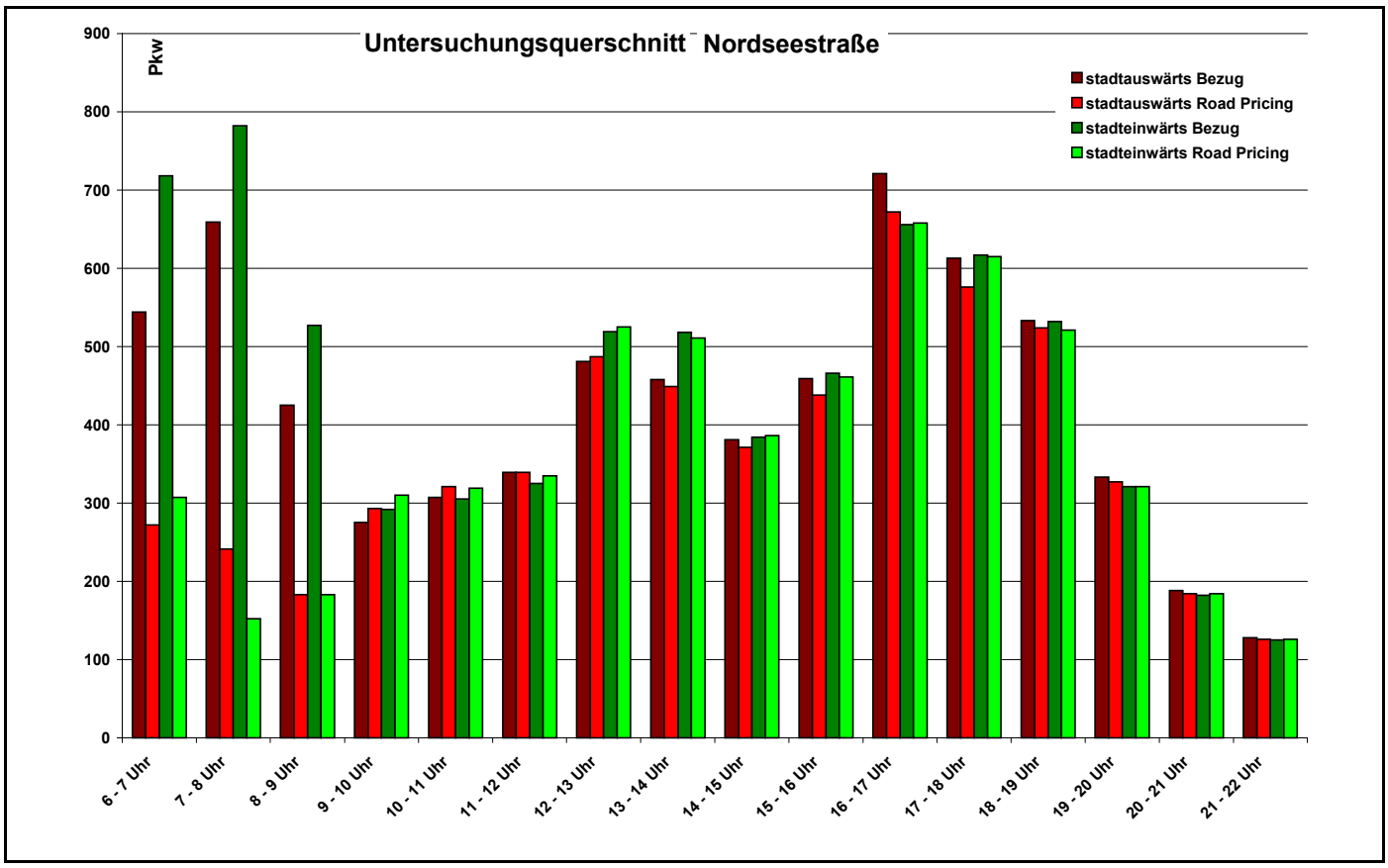


Abbildung A8 - 29: Vergleich der Tagesganglinien am Untersuchungsquerschnitt Nordseestraße

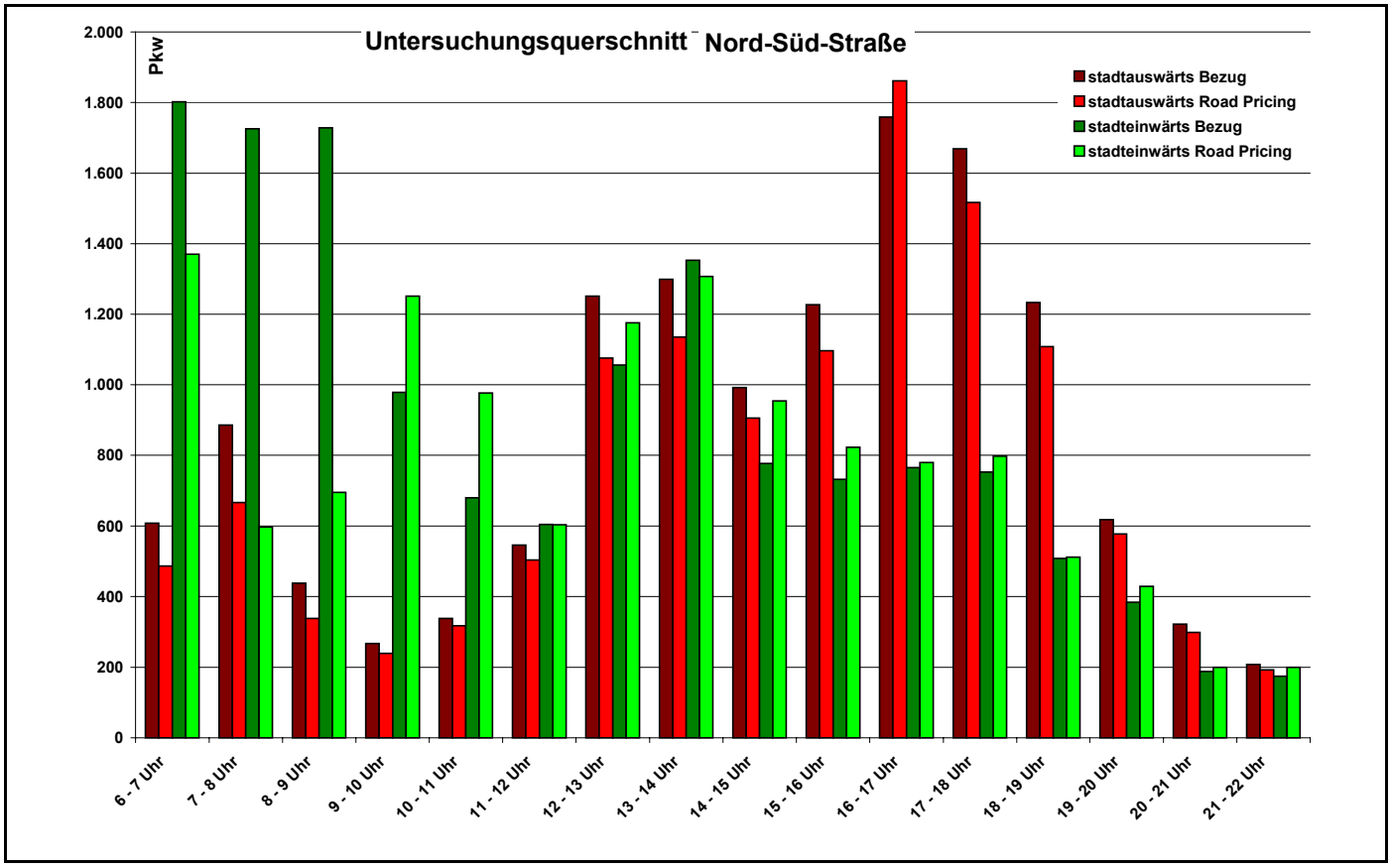


Abbildung A8 - 30: Vergleich der Tagesganglinien am Untersuchungsquerschnitt Nord-Süd-Straße

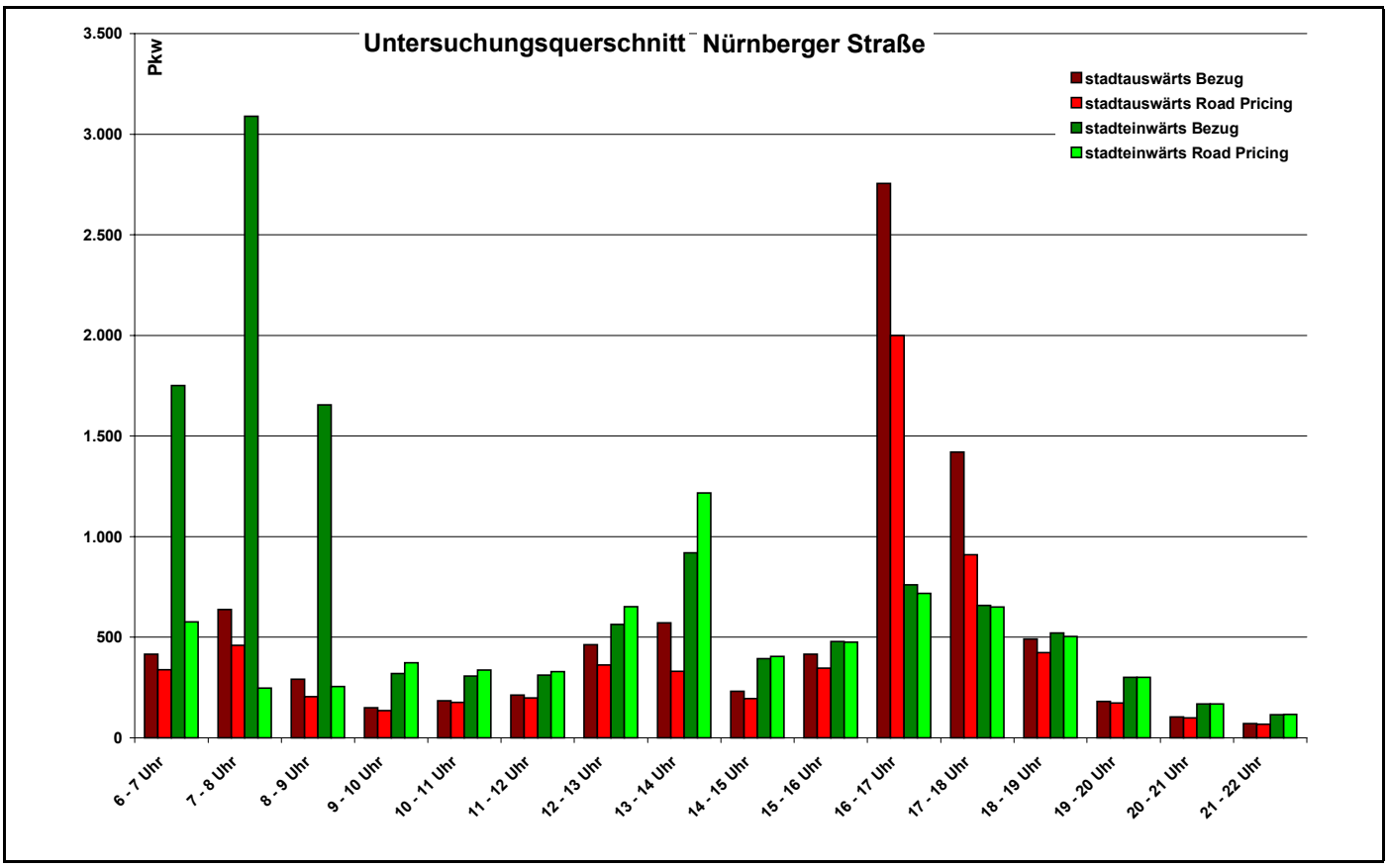


Abbildung A8 - 31: Vergleich der Tagesganglinien am Untersuchungsquerschnitt Nürnberger Straße

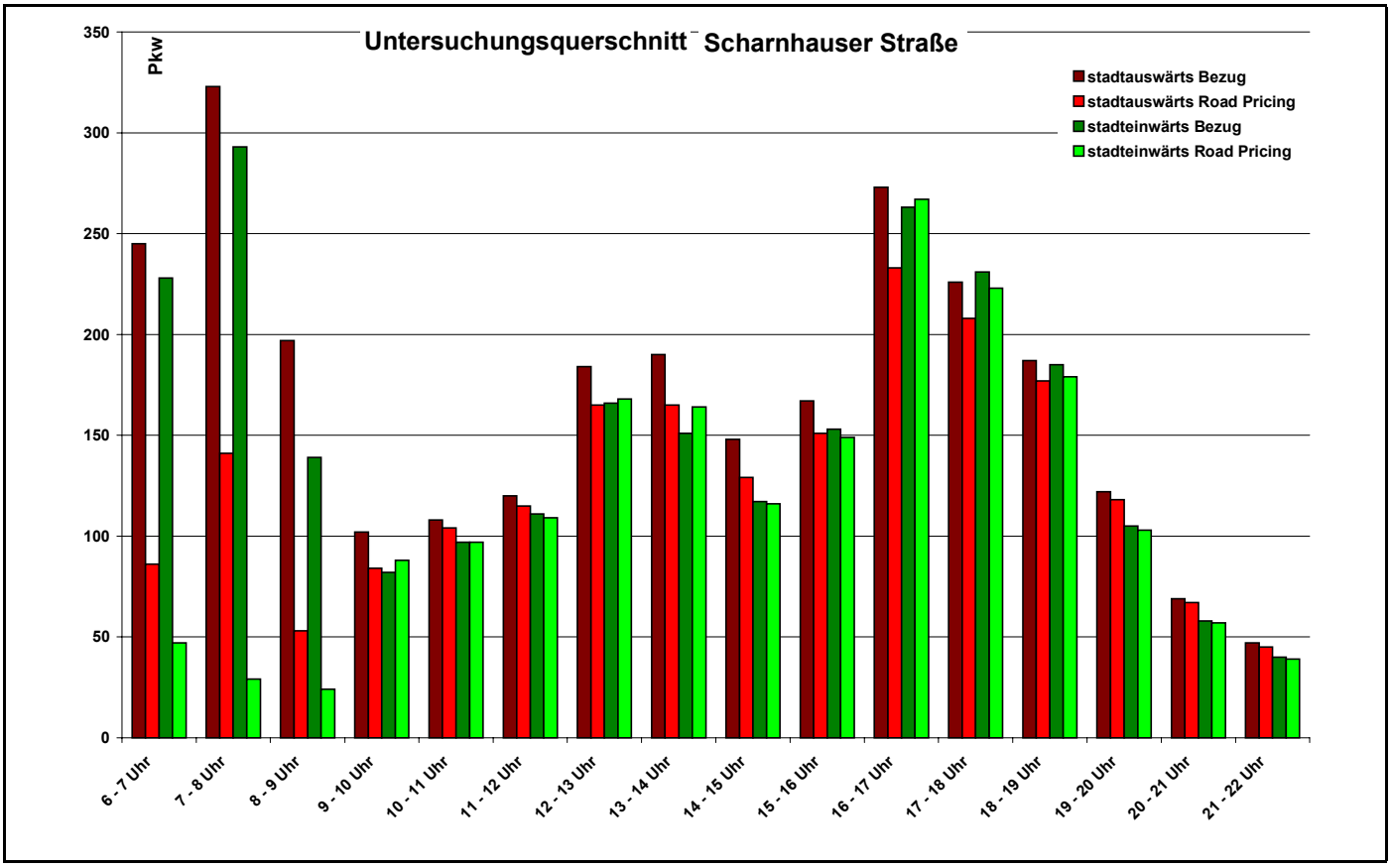


Abbildung A8 - 32: Vergleich der Tagesganglinien am Untersuchungsquerschnitt Scharnhauser Straße

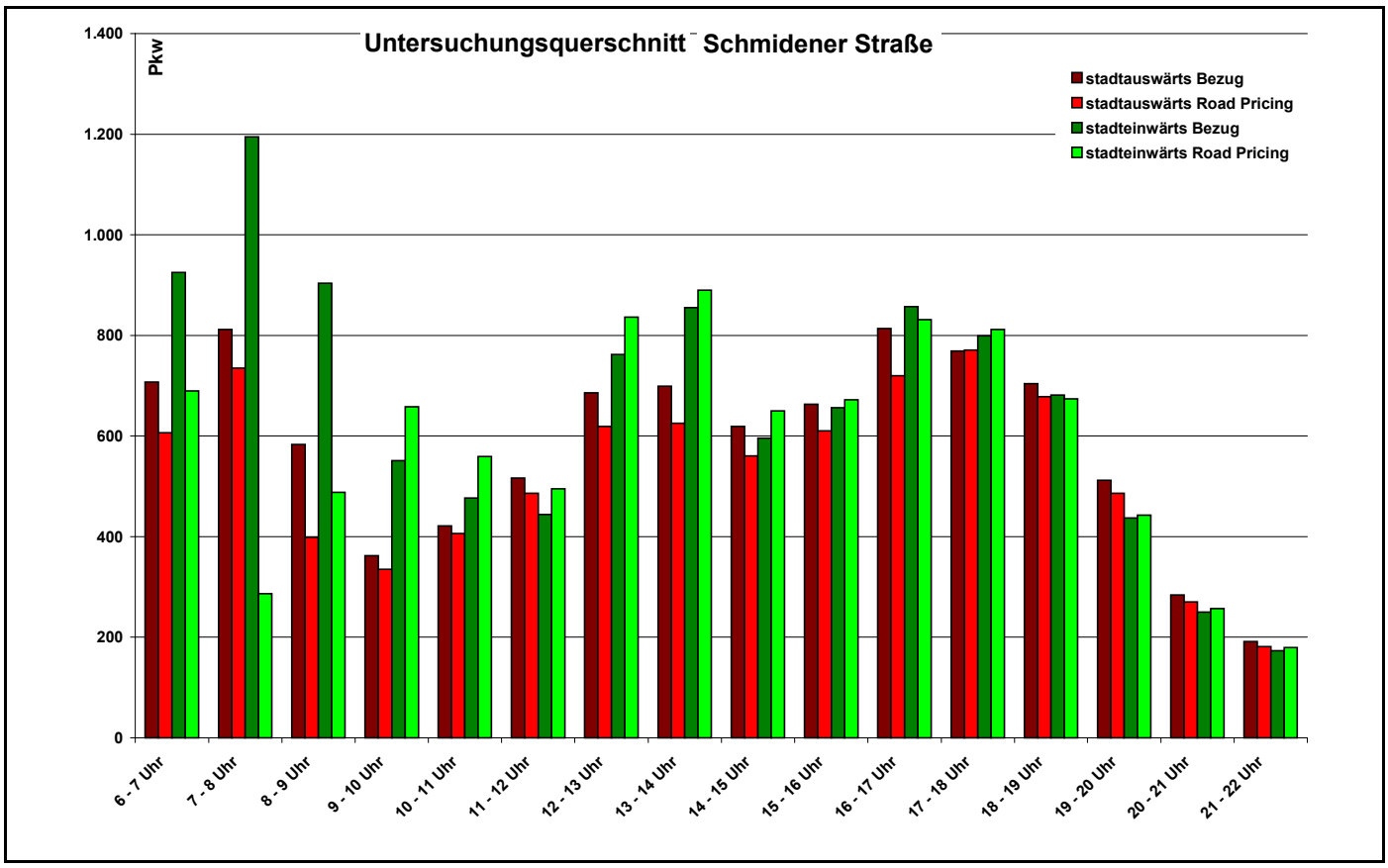


Abbildung A8 - 33: Vergleich der Tagesganglinien am Untersuchungsquerschnitt Schmiedener Straße

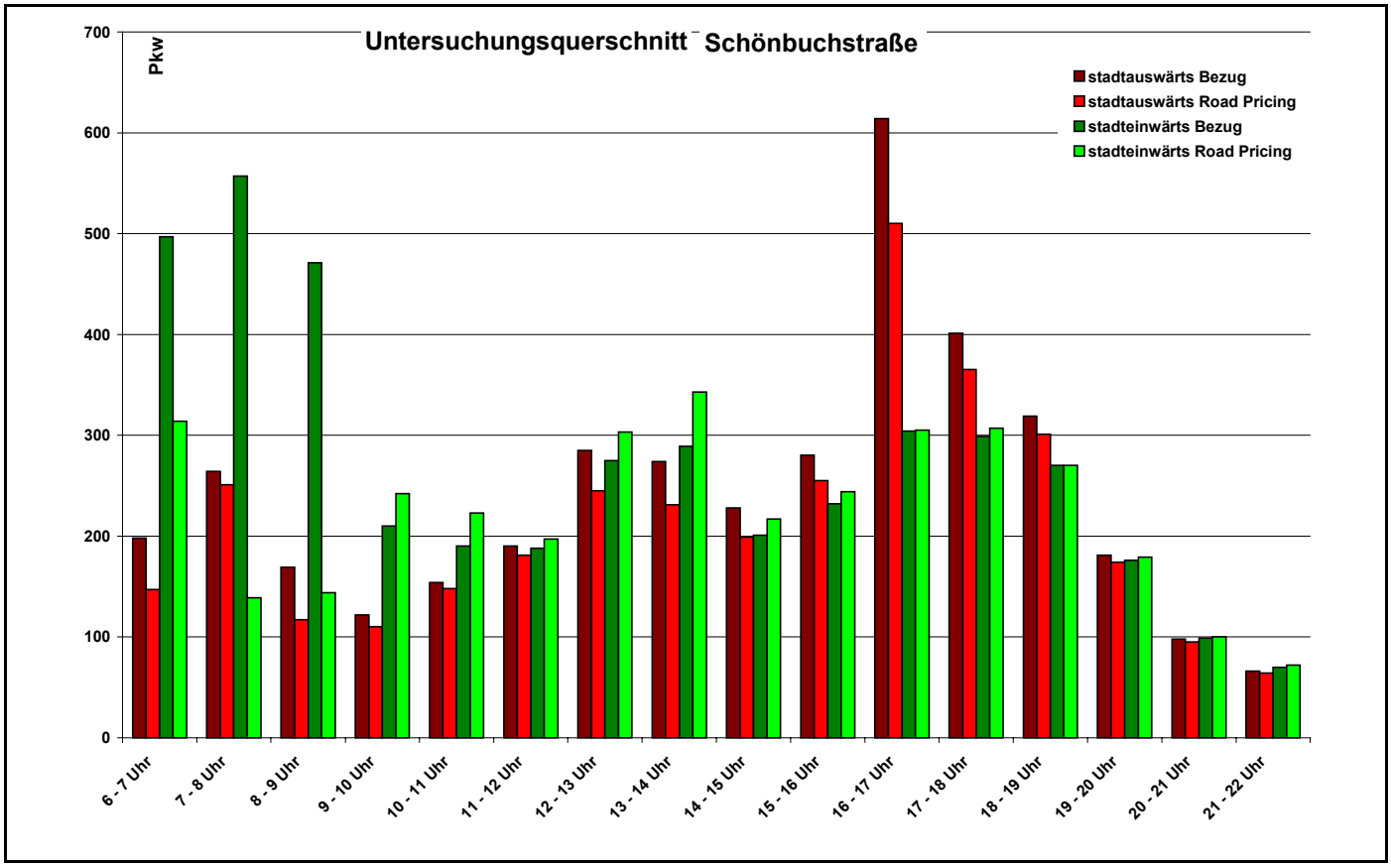


Abbildung A8 - 34: Vergleich der Tagesganglinien am Untersuchungsquerschnitt Schönbuchstraße

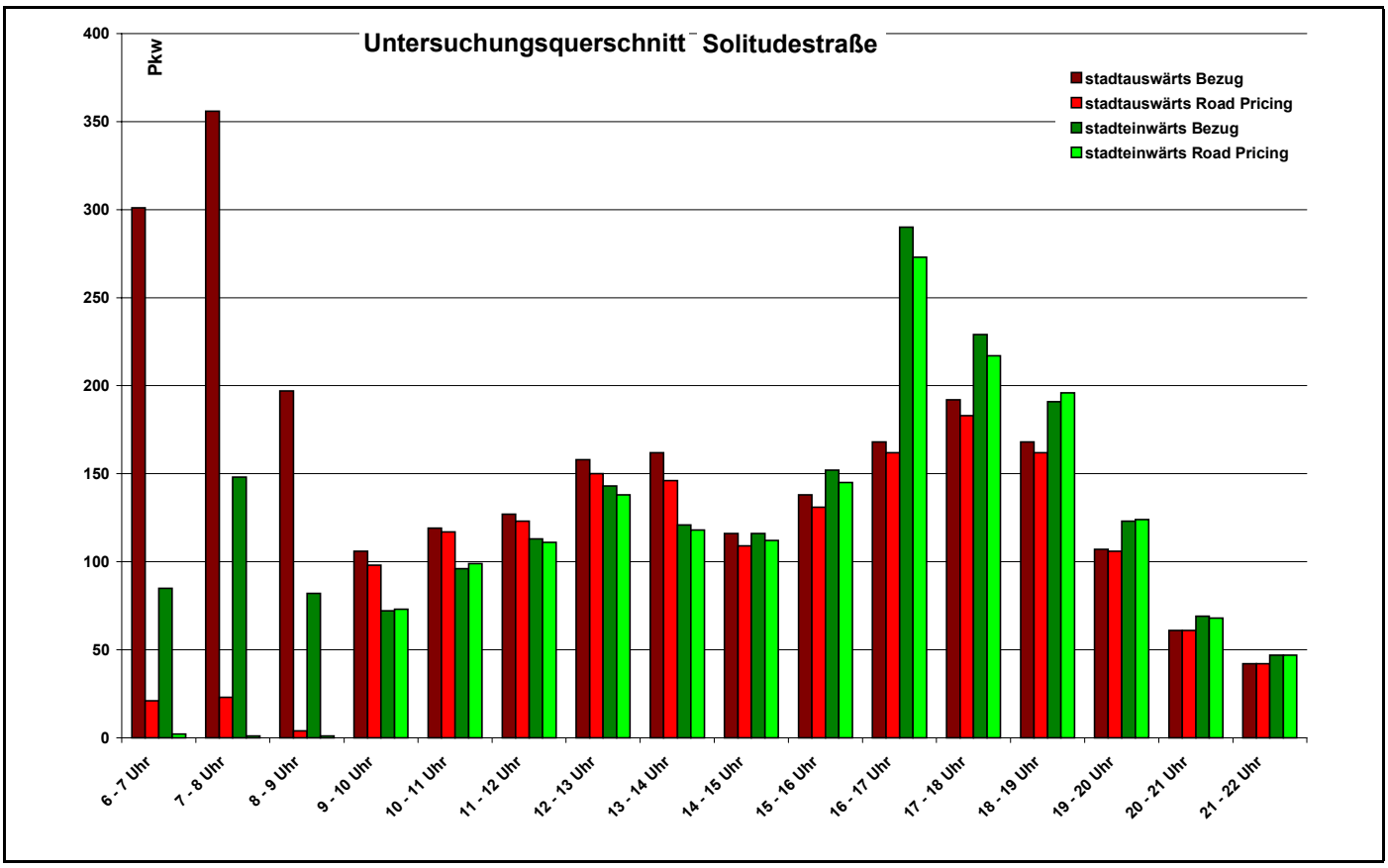


Abbildung A8 - 35: Vergleich der Tagesganglinien am Untersuchungsquerschnitt Solitudestraße

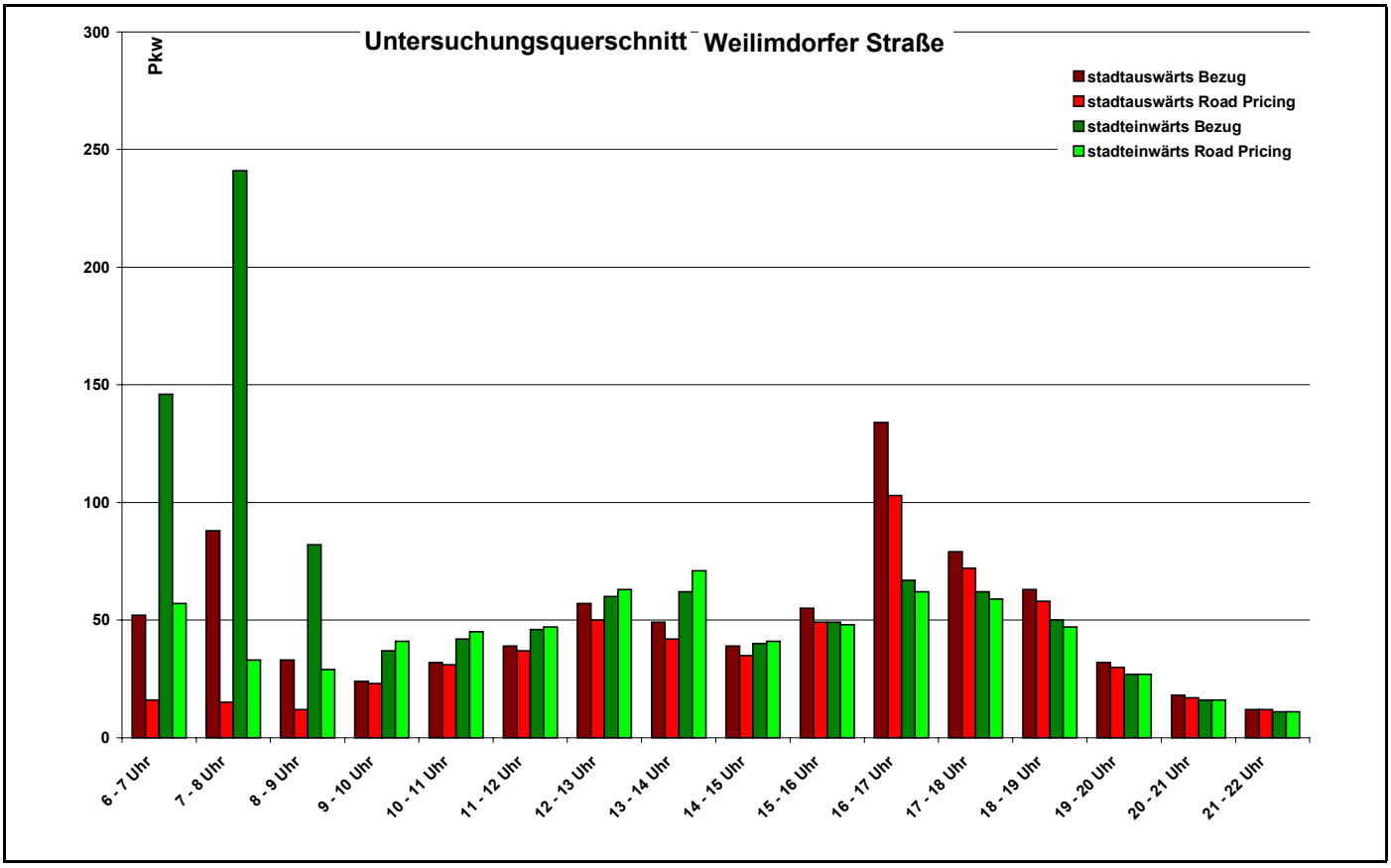


Abbildung A8 - 36: Vergleich der Tagesganglinien am Untersuchungsquerschnitt Weilimdorfer Straße

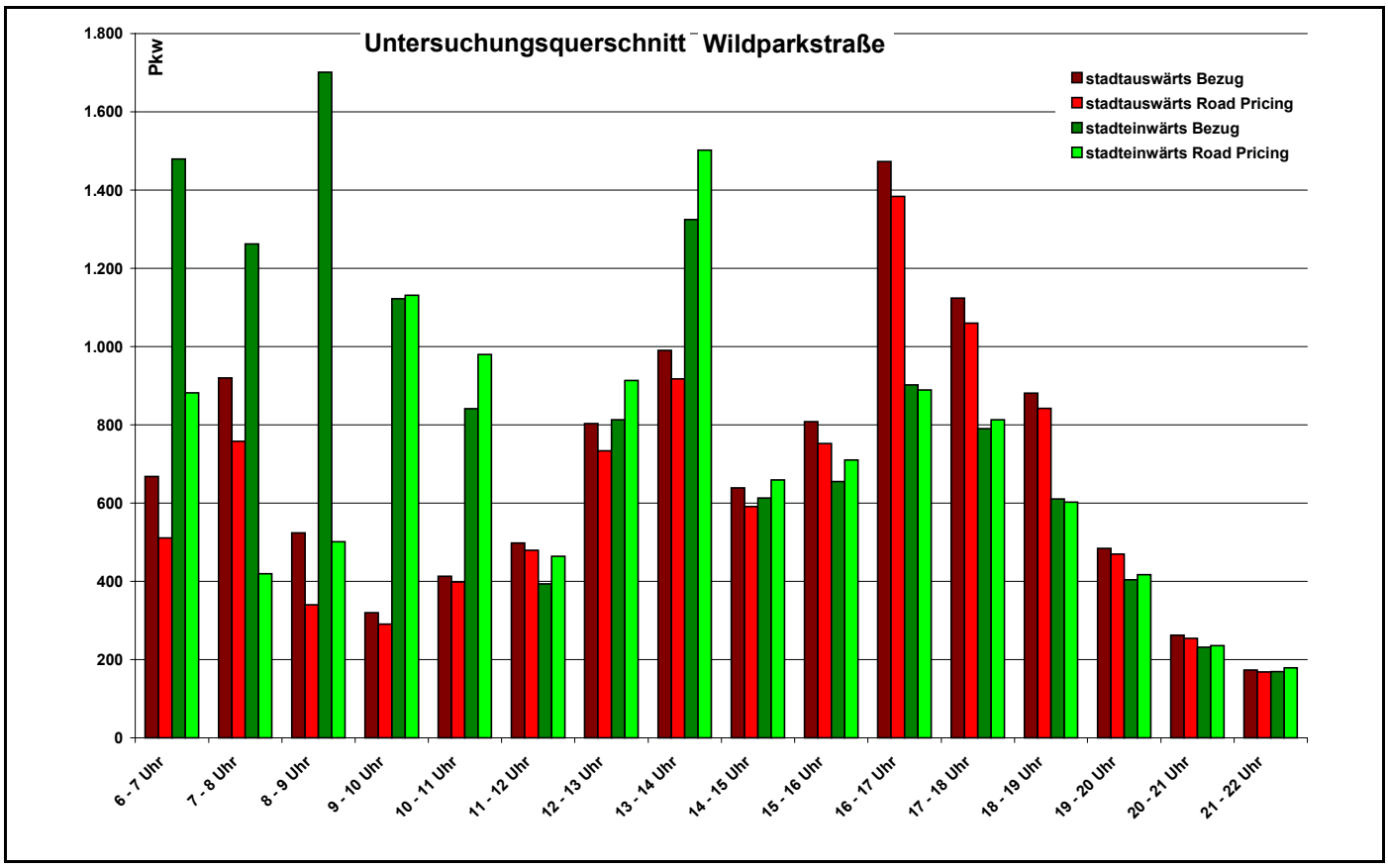


Abbildung A8 - 37: Vergleich der Tagesganglinien am Untersuchungsquerschnitt Wildparkstraße

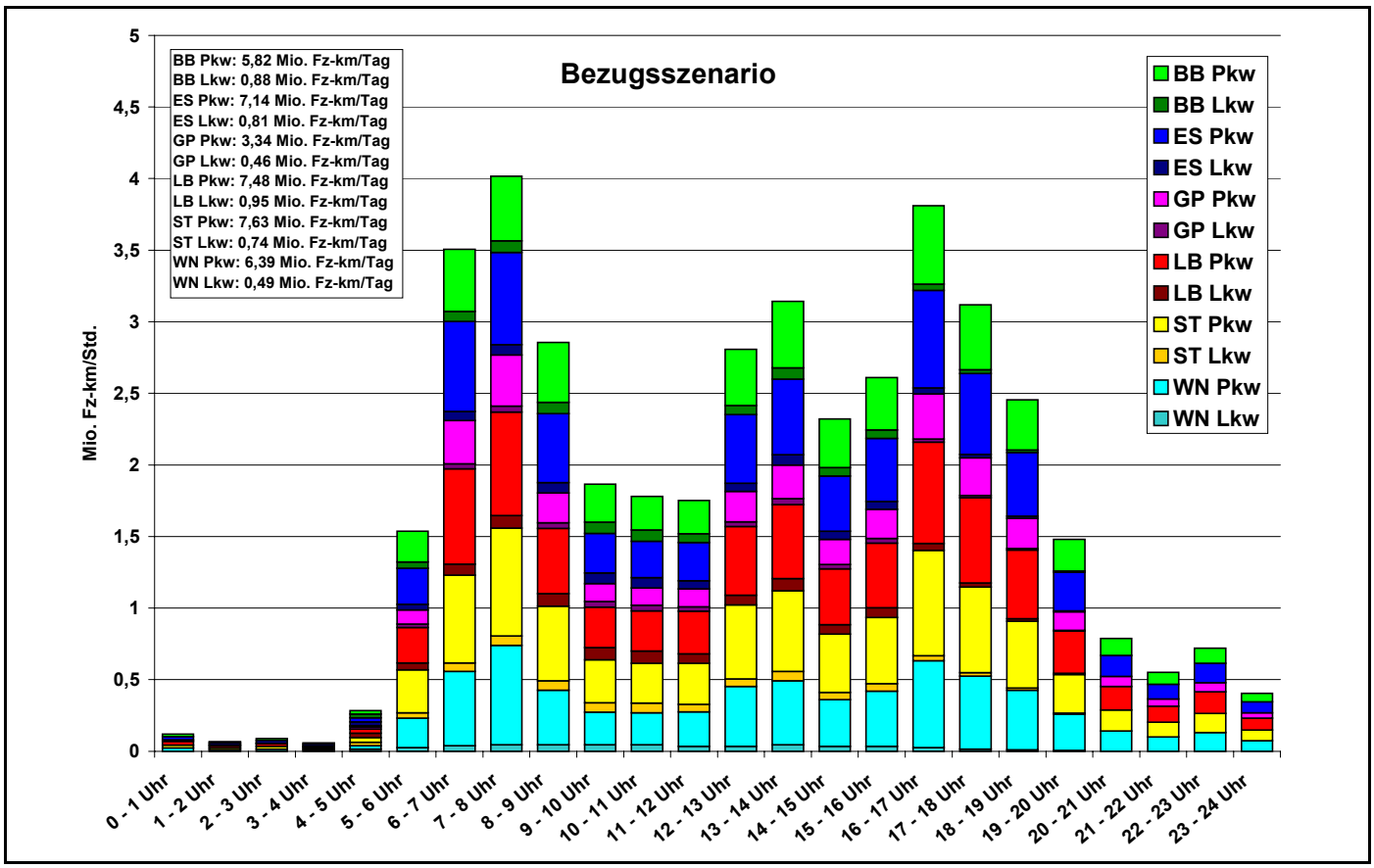


Abbildung A9 - 1: Fahrleistung in der Region Stuttgart, differenziert nach Zeitintervallen, Landkreisen, sowie Pkw und Lkw, Bezugsszenario

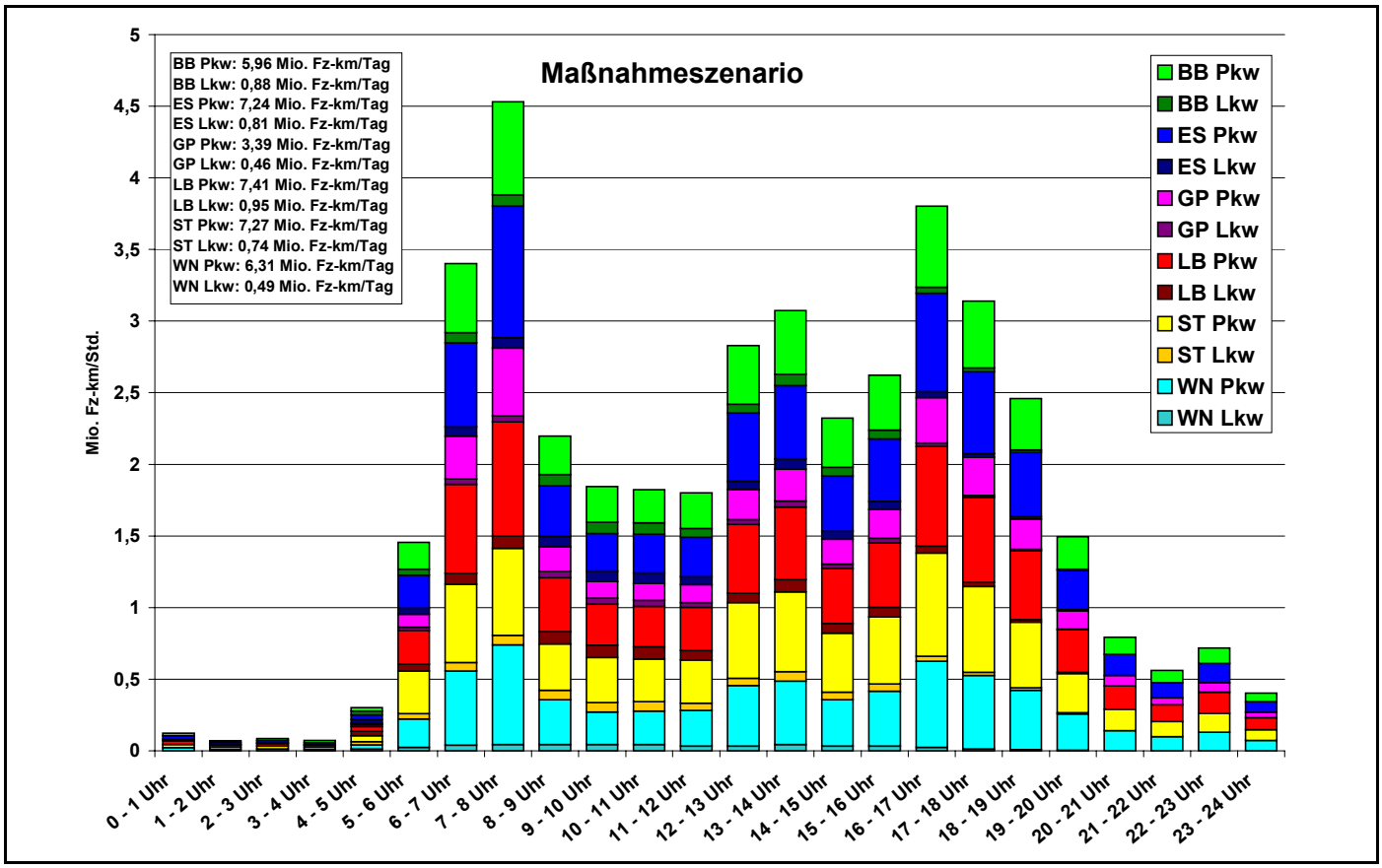


Abbildung A9 - 2: Fahrleistung in der Region Stuttgart, differenziert nach Zeitintervallen, Landkreisen, sowie Pkw und Lkw, Maßnahmeszenario

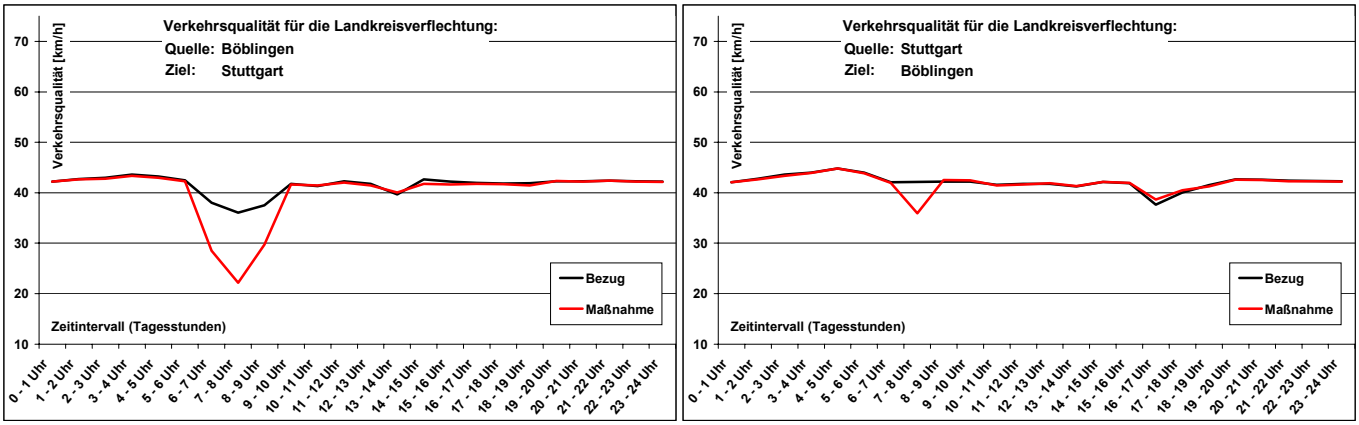


Abbildung A10 - 1: Verkehrsqualität zwischen dem Landkreis Böblingen und der LH Stuttgart

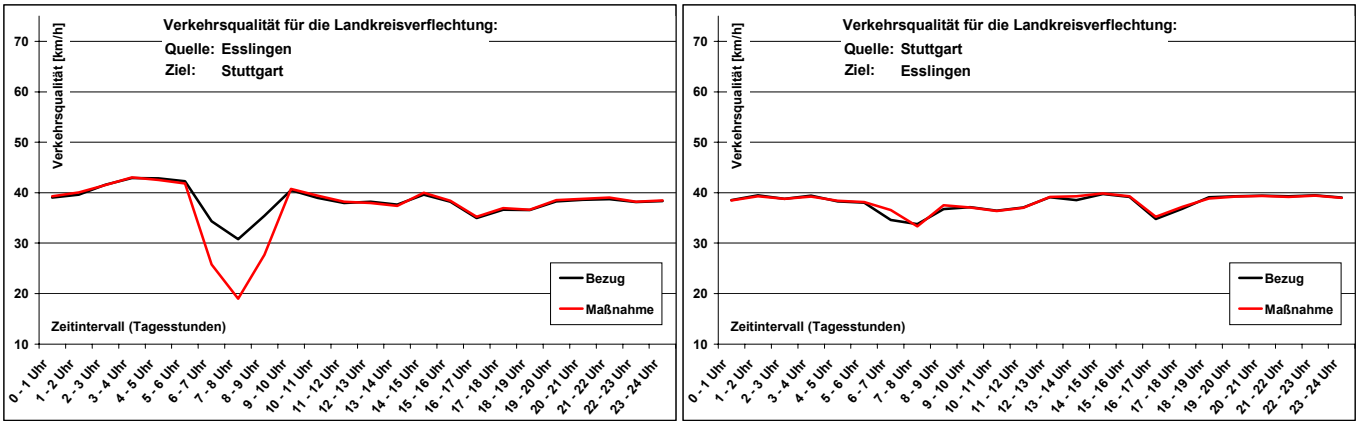


Abbildung A10 - 2: Verkehrsqualität zwischen dem Landkreis Esslingen und der LH Stuttgart

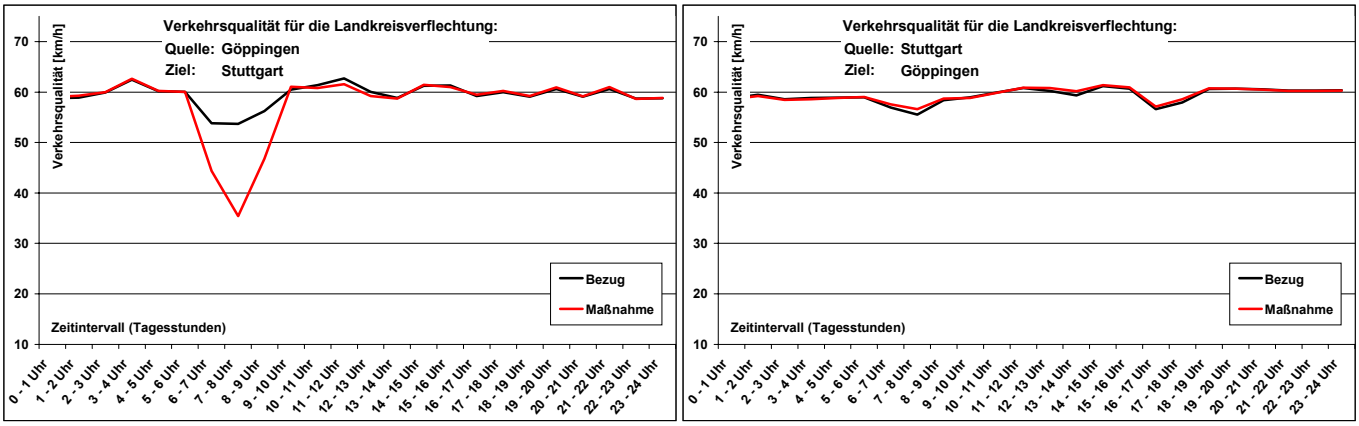


Abbildung A10 - 3: Verkehrsqualität zwischen dem Landkreis Göppingen und der LH Stuttgart

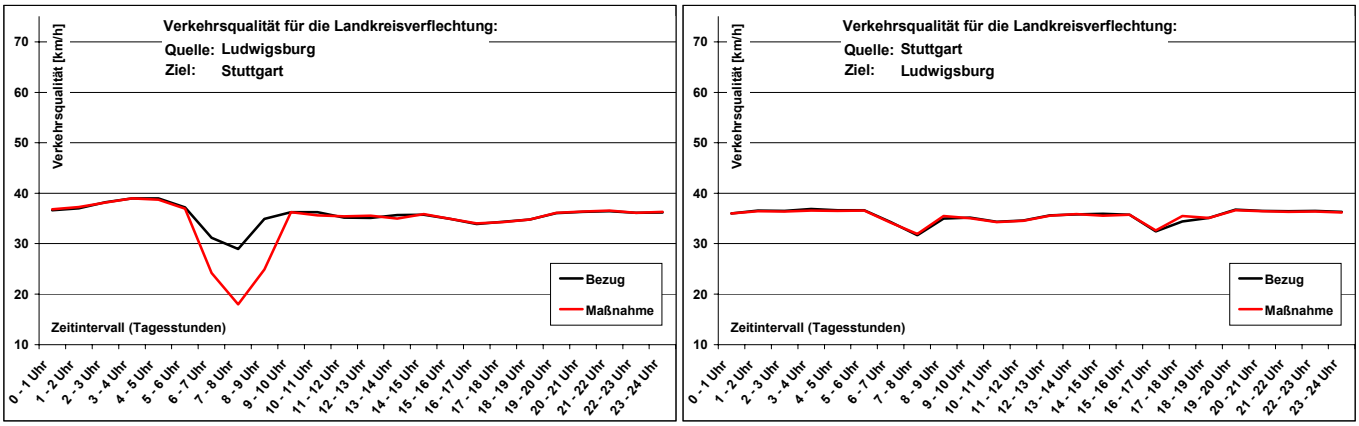


Abbildung A10 - 4: Verkehrsqualität zwischen dem Landkreis Ludwigsburg und der LH Stuttgart

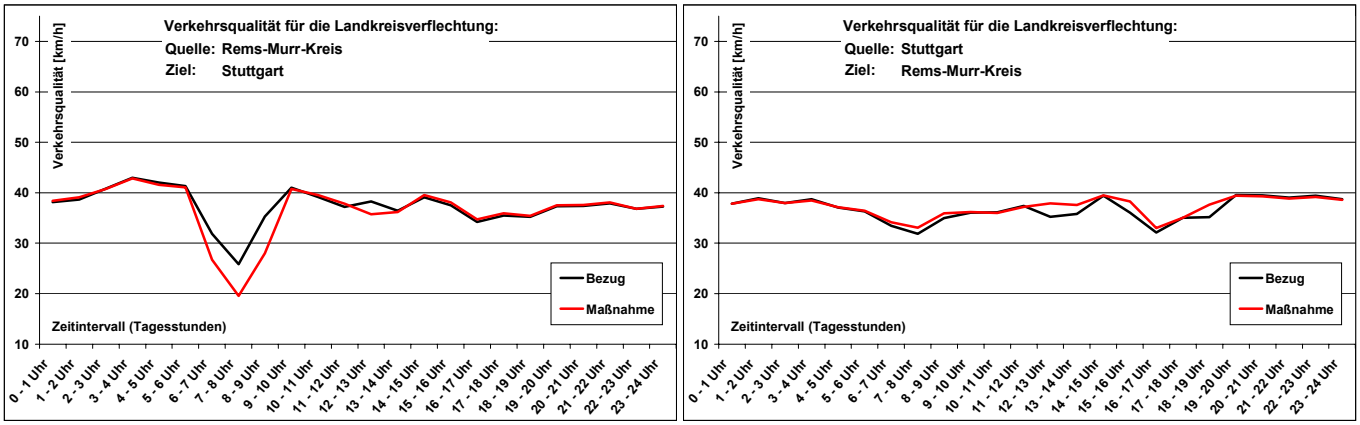


Abbildung A10 - 5: Verkehrsqualität zwischen dem Rems-Murr-Kreis und der LH Stuttgart

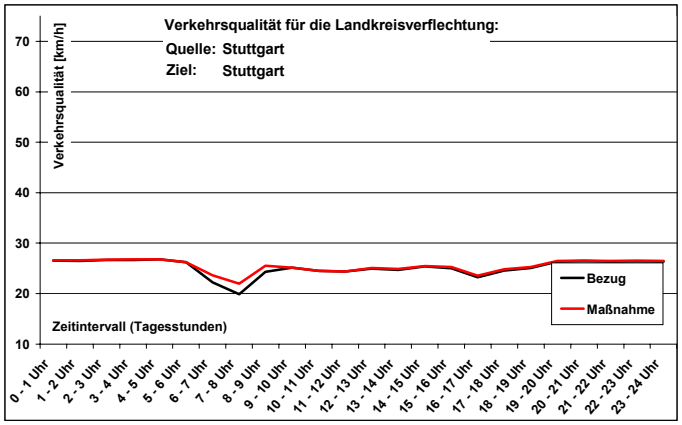


Abbildung A10 - 6: Verkehrsqualität innerhalb der LH Stuttgart

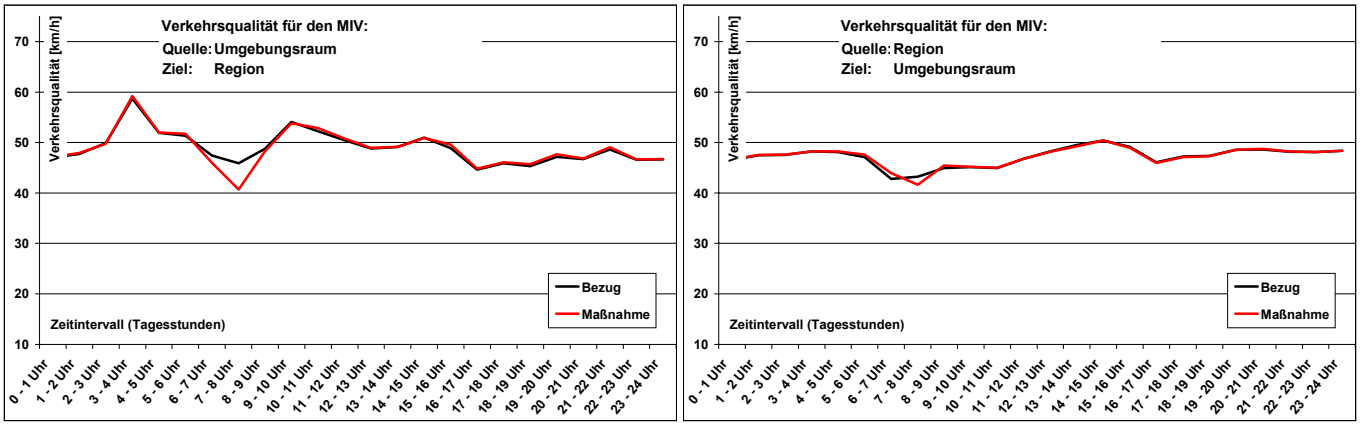


Abbildung A10 - 7: Verkehrsqualität zwischen dem Umgebungsraum und der Region Stuttgart

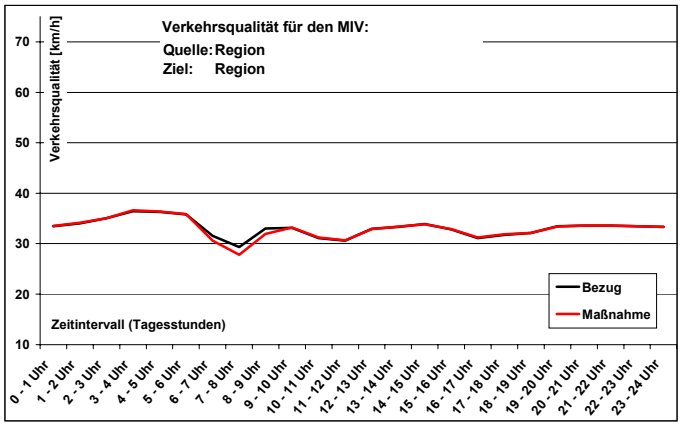


Abbildung A10 - 8: Verkehrsqualität innerhalb der Region Stuttgart

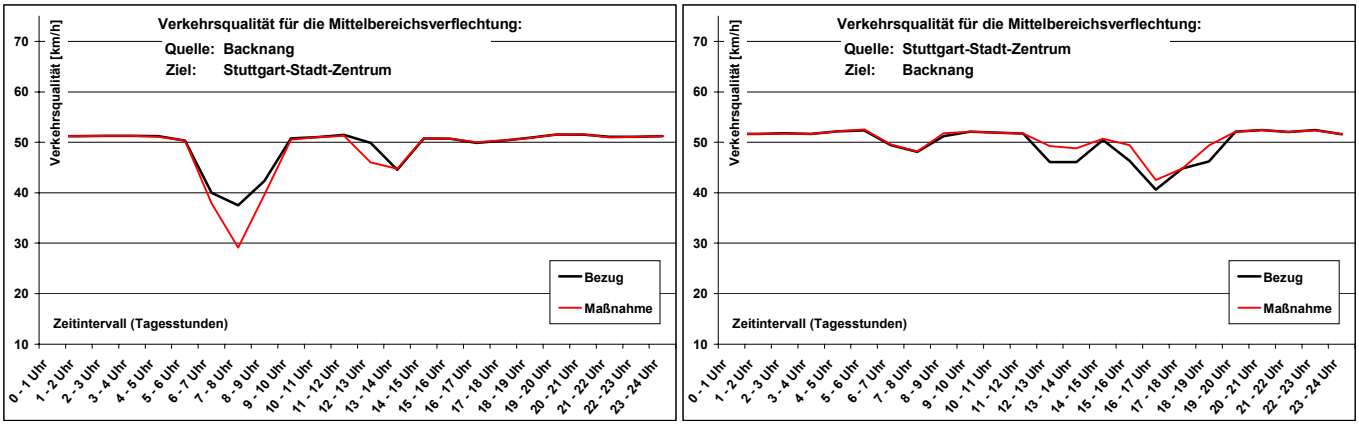


Abbildung A10 - 9: Verkehrsqualität zwischen den Mittelbereichen Backnang und Stuttgart-Stadt-Zentrum

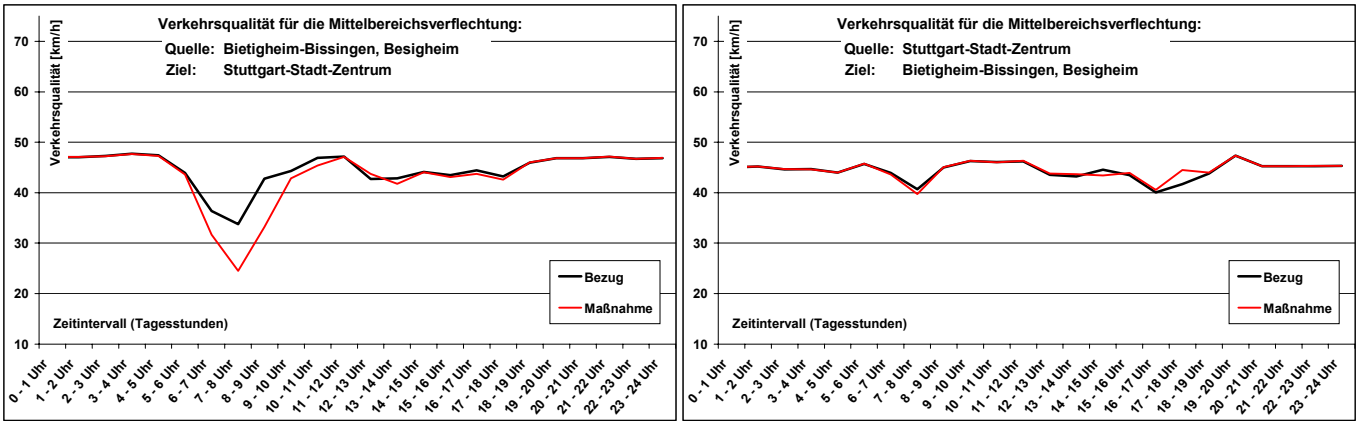


Abbildung A10 - 10: Verkehrsqualität zwischen den Mittelbereichen Bietigheim-Bissingen, Besigheim und Stuttgart-Stadt-Zentrum

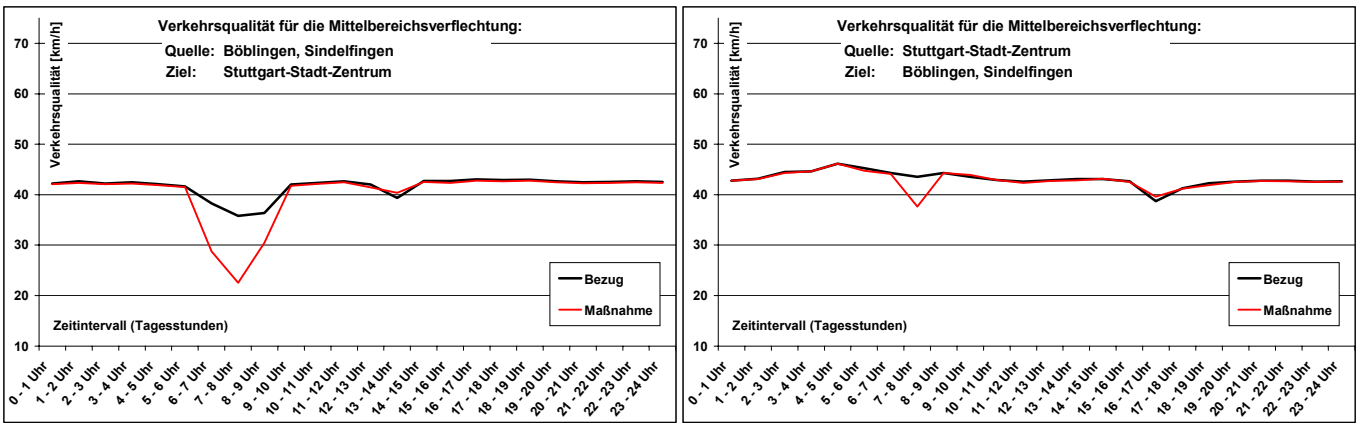


Abbildung A10 - 11: Verkehrsqualität zwischen den Mittelbereichen Böblingen und Stuttgart-Stadt-Zentrum

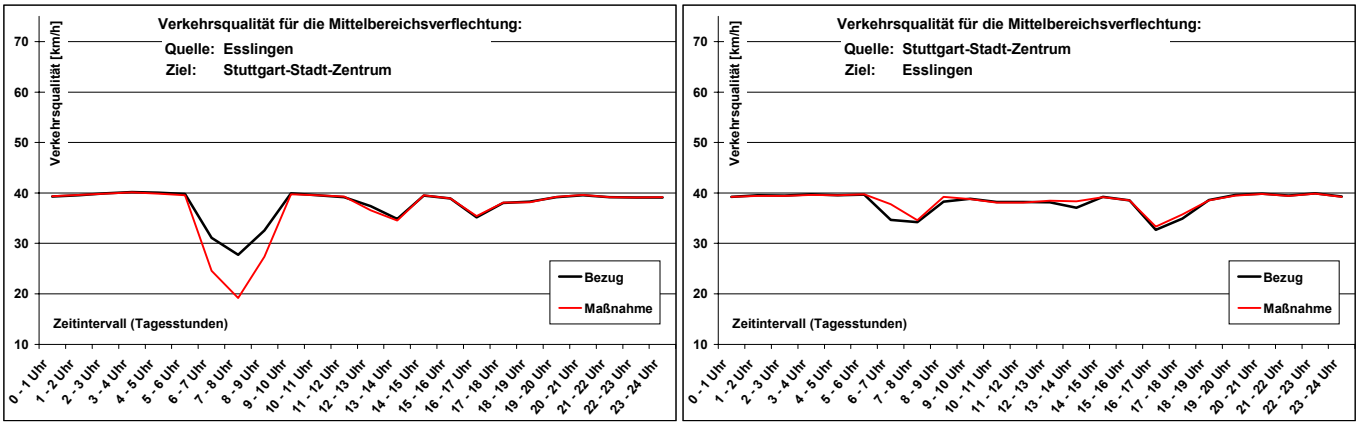


Abbildung A10 - 12: Verkehrsqualität zwischen den Mittelbereichen Esslingen und Stuttgart-Stadt-Zentrum

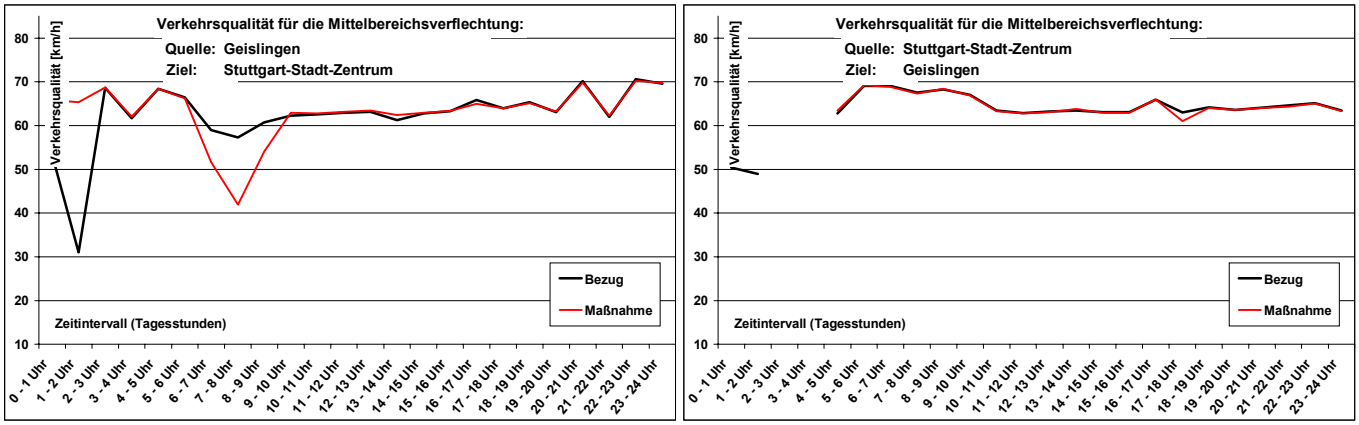


Abbildung A10 - 13: Verkehrsqualität zwischen den Mittelbereichen Geislingen und Stuttgart-Stadt-Zentrum

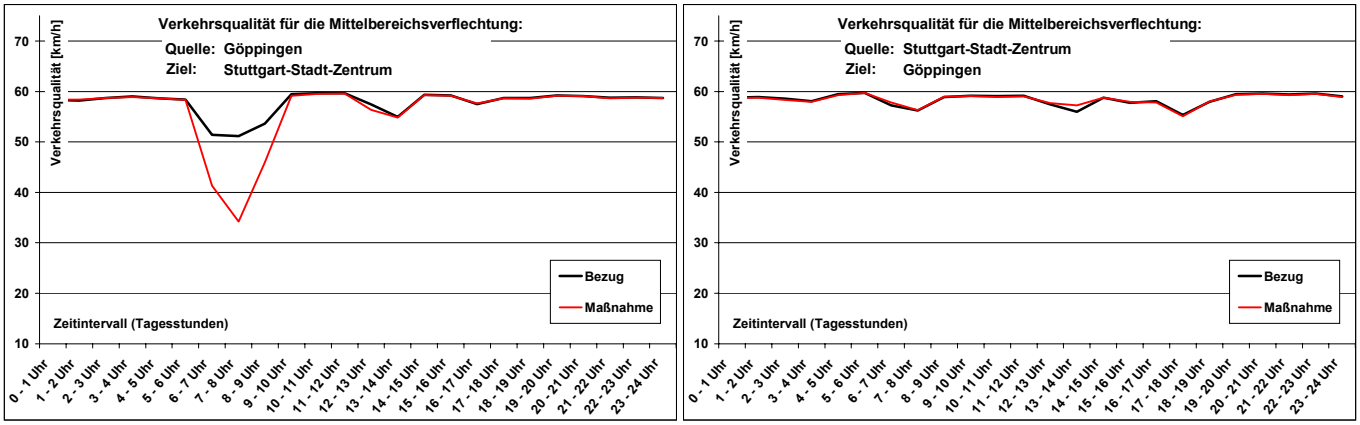


Abbildung A10 - 14: Verkehrsqualität zwischen den Mittelbereichen Göppingen und Stuttgart-Stadt-Zentrum

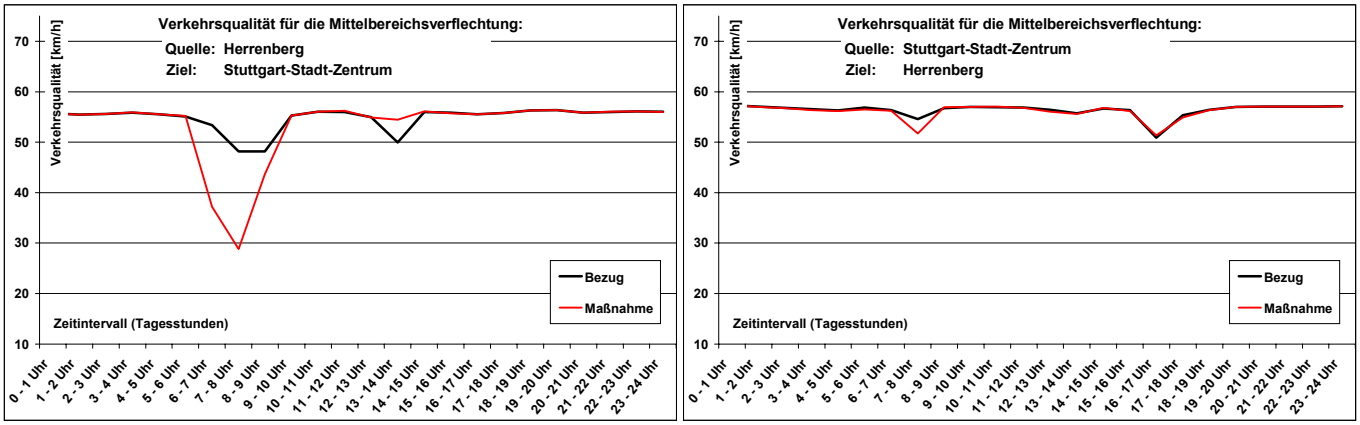


Abbildung A10 - 15: Verkehrsqualität zwischen den Mittelbereichen Herrenberg und Stuttgart-Stadt-Zentrum

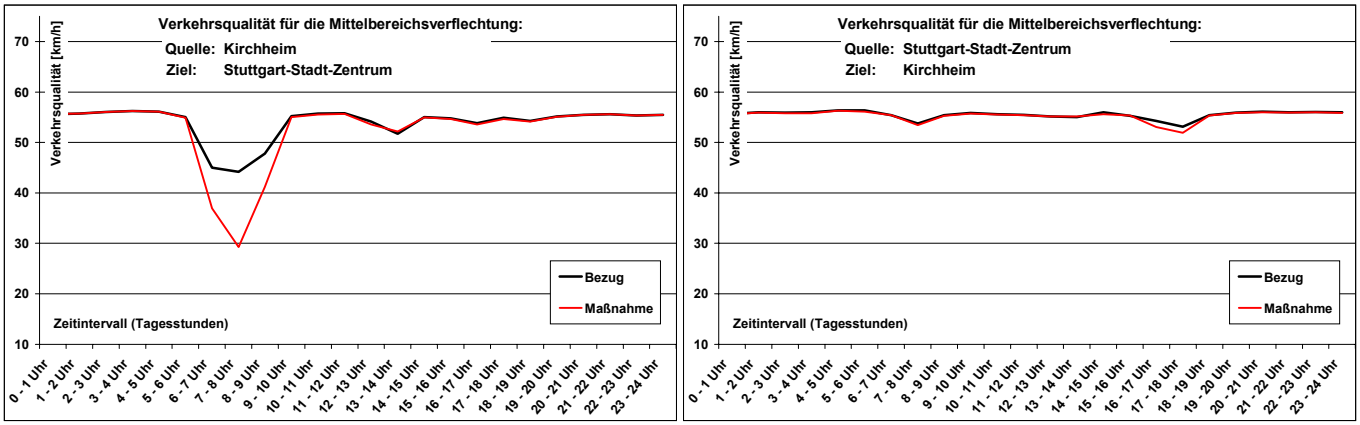


Abbildung A10 - 16: Verkehrsqualität zwischen den Mittelbereichen Kirchheim und Stuttgart-Stadt-Zentrum

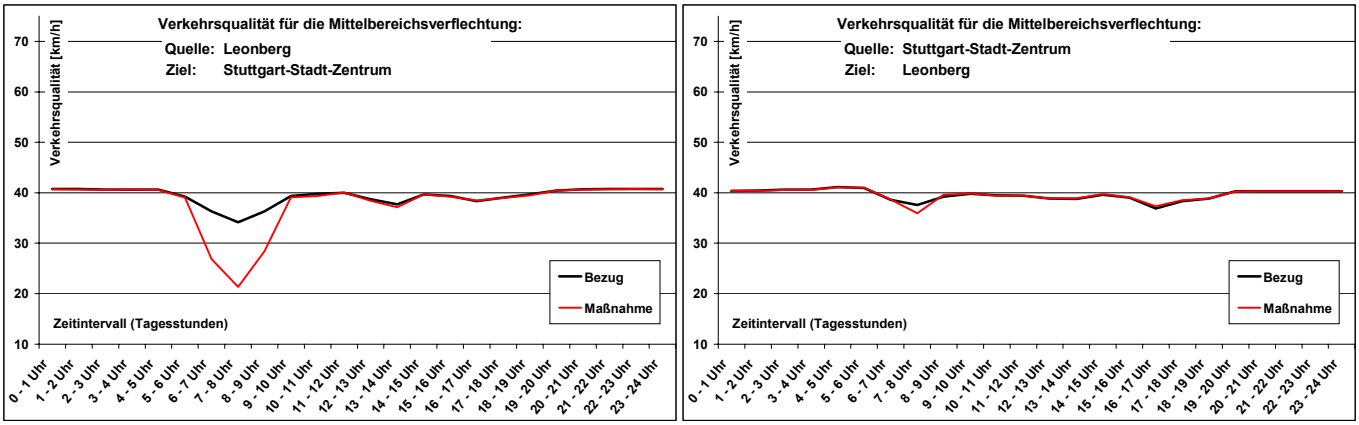


Abbildung A10 - 17: Verkehrsqualität zwischen den Mittelbereichen Leonberg und Stuttgart-Stadt-Zentrum

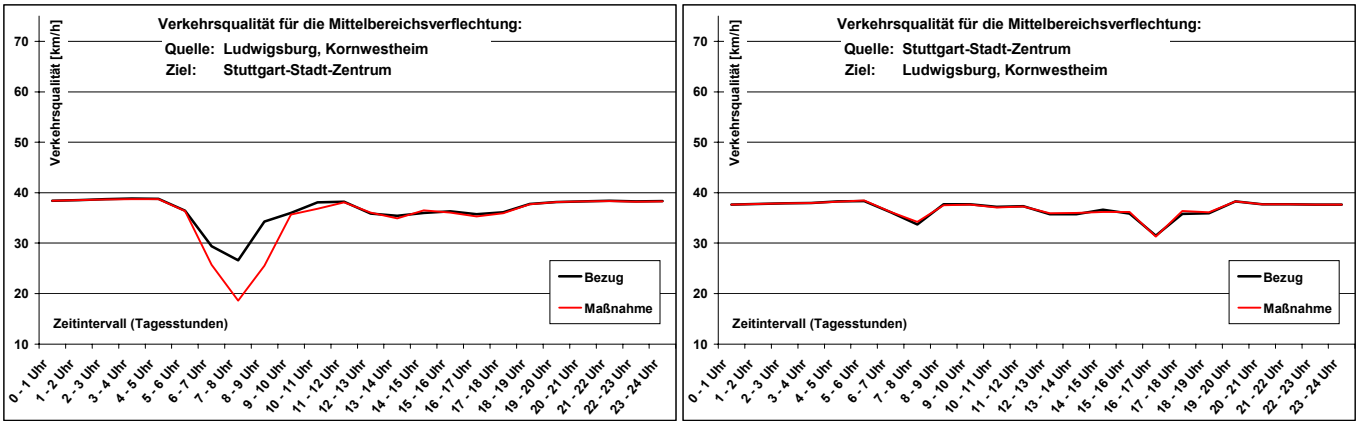


Abbildung A10 - 18: Verkehrsqualität zwischen den Mittelbereichen Ludwigsburg, Kornwestheim und Stuttgart-Stadt-Zentrum

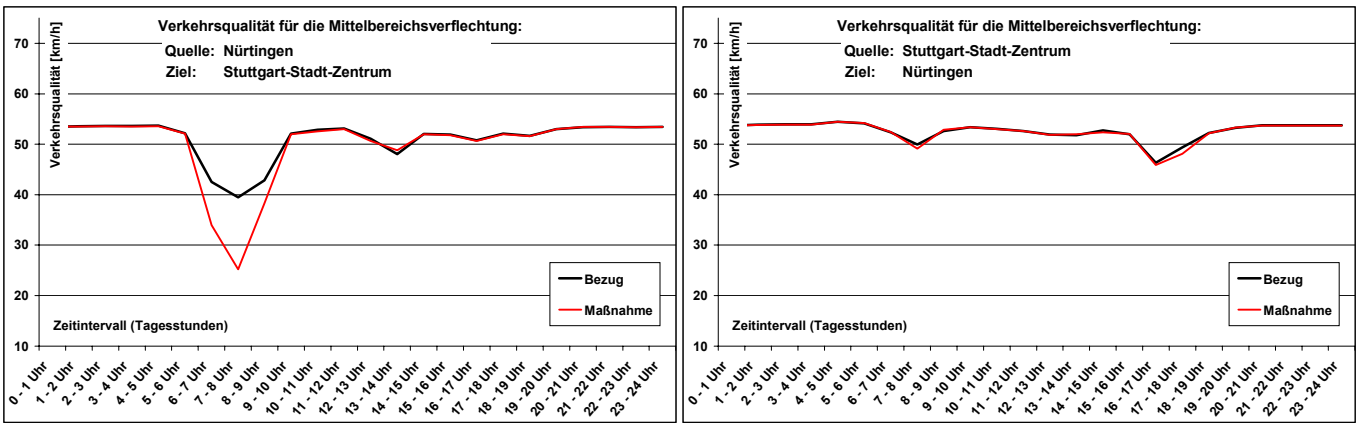


Abbildung A10 - 19: Verkehrsqualität zwischen den Mittelbereichen Nürtingen und Stuttgart-Stadt-Zentrum

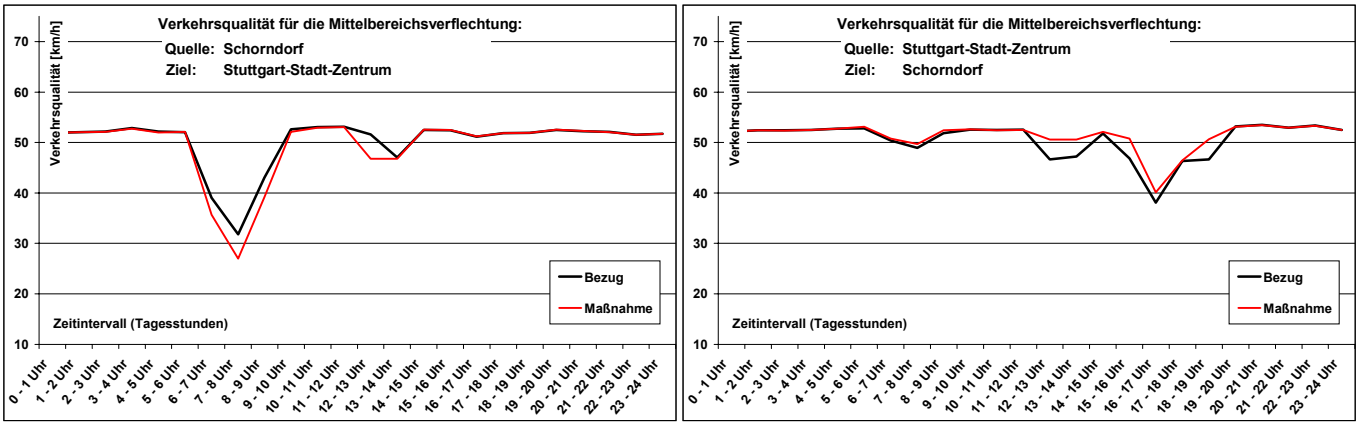


Abbildung A10 - 20: Verkehrsqualität zwischen den Mittelbereichen Schorndorf und Stuttgart-Stadt-Zentrum

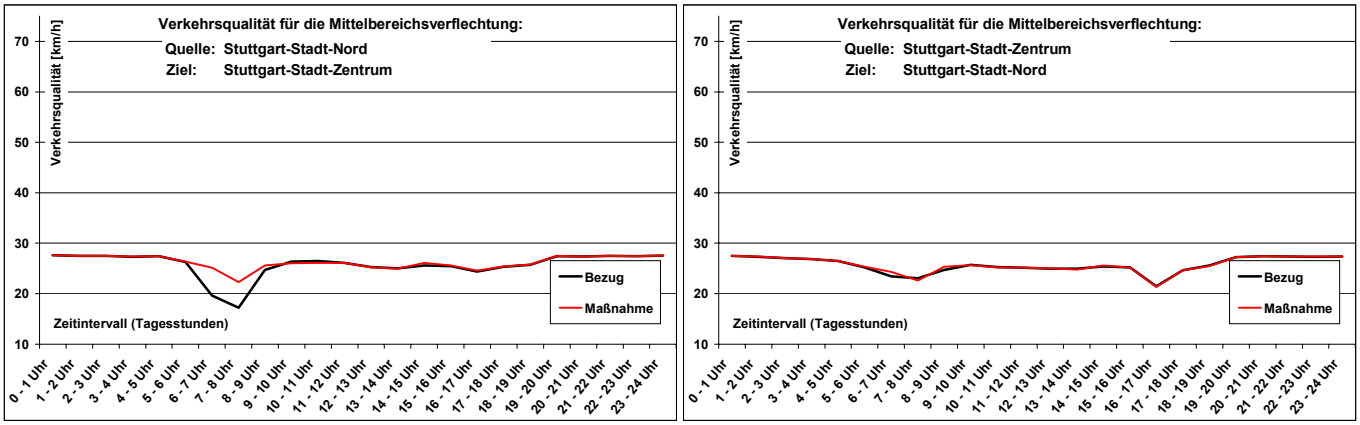


Abbildung A10 - 21: Verkehrsqualität zwischen den Mittelbereichen Stuttgart-Stadt-Nord und -Zentrum

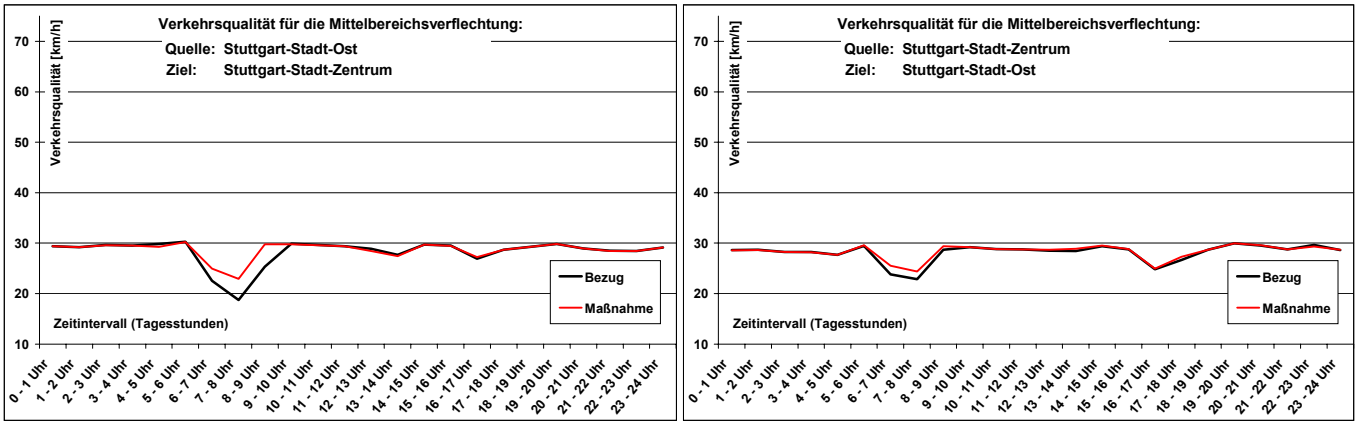


Abbildung A10 - 22: Verkehrsqualität zwischen den Mittelbereichen Stuttgart-Stadt-Ost und -Zentrum

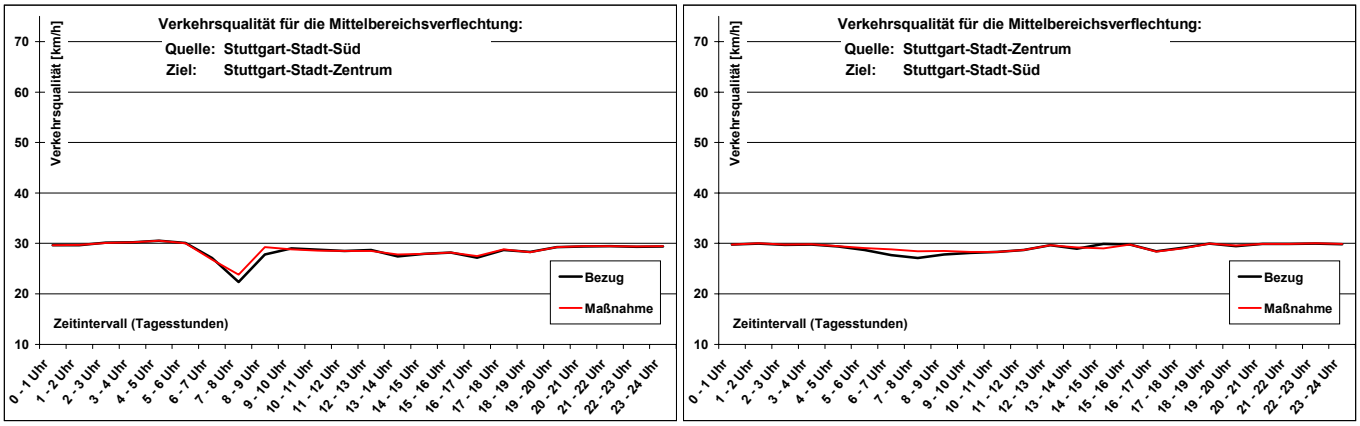


Abbildung A10 - 23: Verkehrsqualität zwischen den Mittelbereichen Stuttgart-Stadt-Süd und -Zentrum

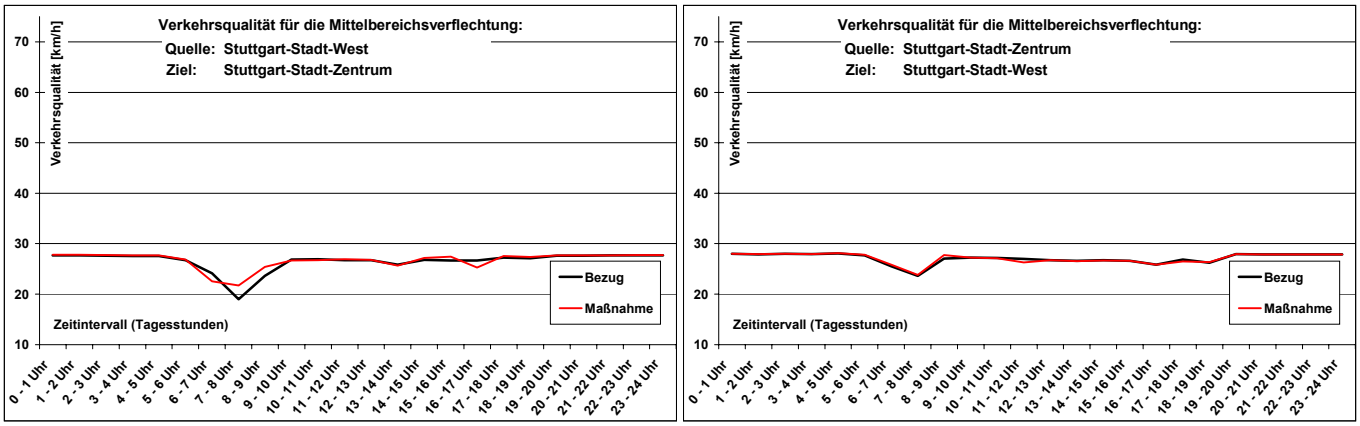


Abbildung A10 - 24: Verkehrsqualität zwischen den Mittelbereichen Stuttgart-Stadt-West und -Zentrum

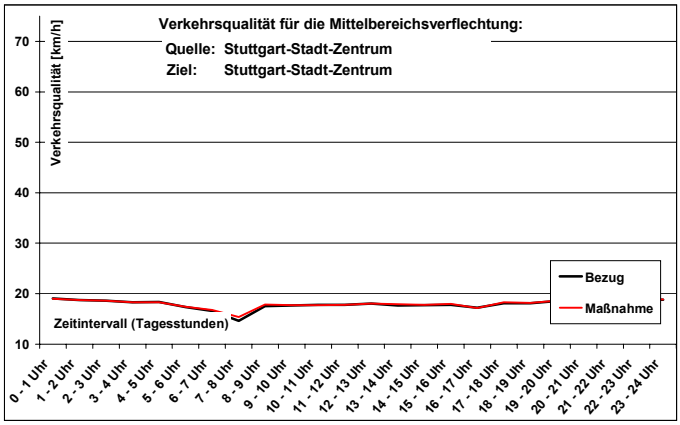
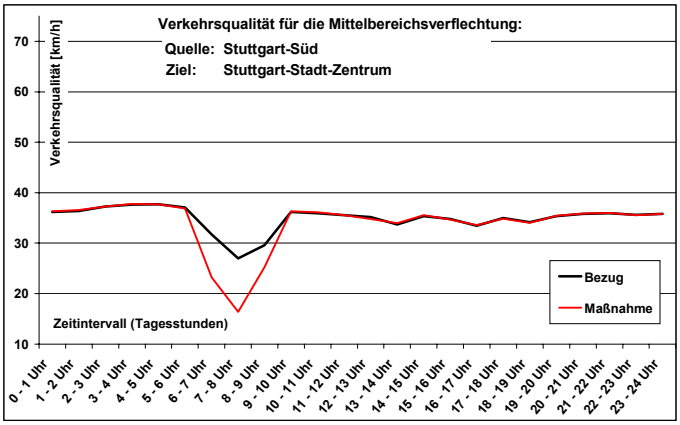


Abbildung A10 - 25: Verkehrsqualität innerhalb des Mittelbereichs Stuttgart-Stadt-Zentrum



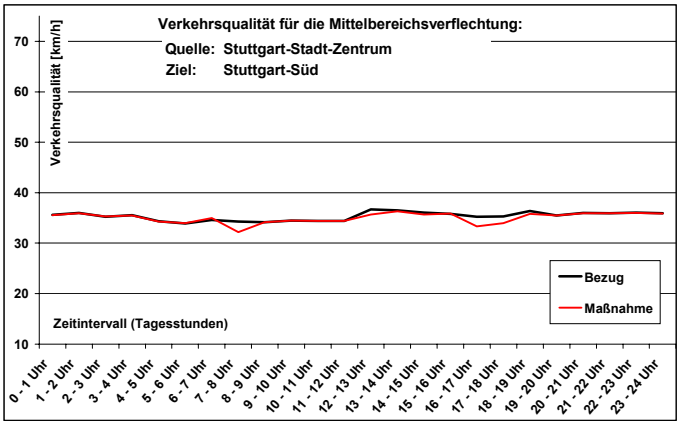
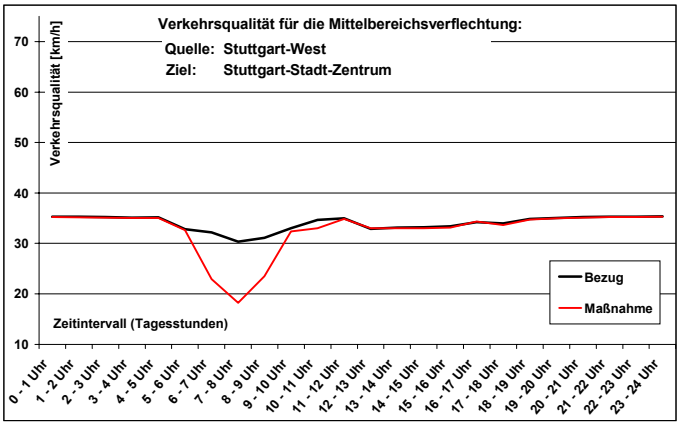


Abbildung A10 - 26: Verkehrsqualität zwischen den Mittelbereichen Stuttgart Süd und Stuttgart-Stadt-Zentrum



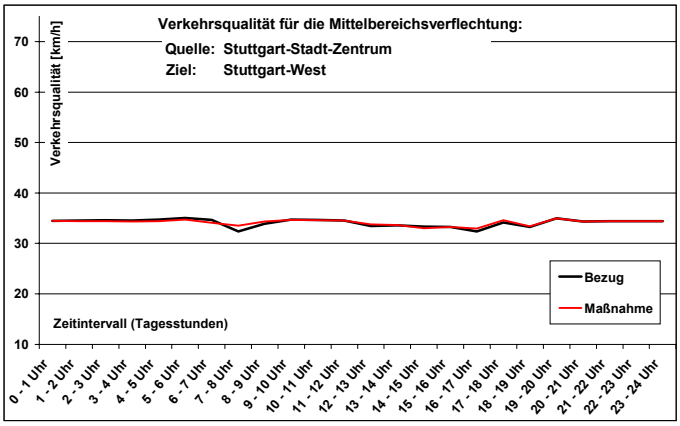
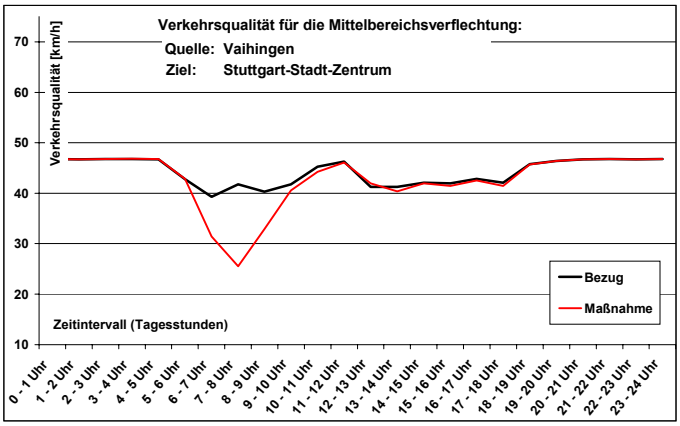


Abbildung A10 - 27: Verkehrsqualität zwischen den Mittelbereichen Stuttgart West und Stuttgart-Stadt-Zentrum



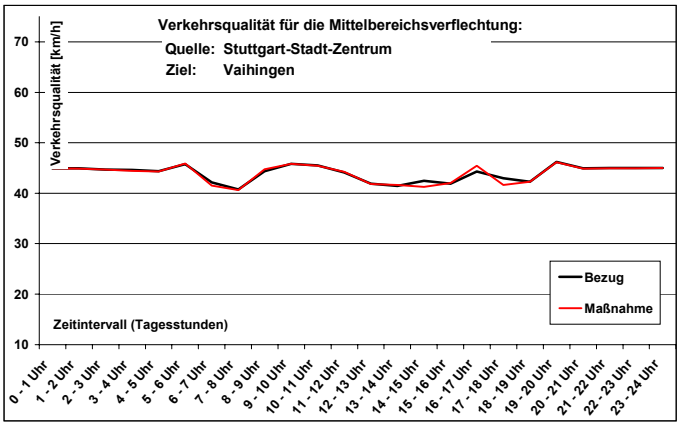


Abbildung A10 - 28: Verkehrsqualität zwischen den Mittelbereichen Vaihingen und Stuttgart-Stadt-Zentrum

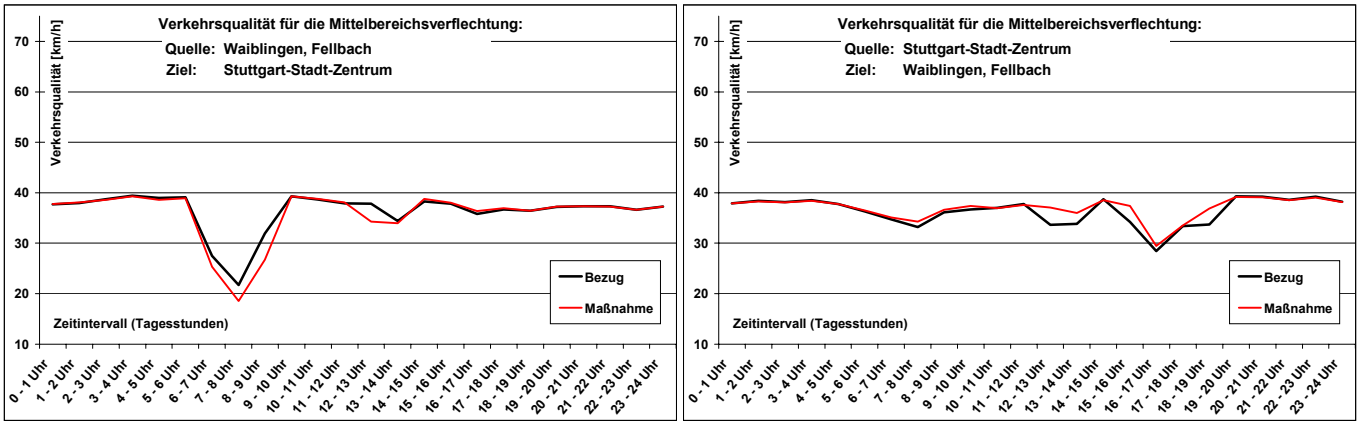


Abbildung A10 - 29: Verkehrsqualität zwischen den Mittelbereichen Waiblingen, Fellbach und Stuttgart-Stadt-Zentrum

		Bezug			Road Pricing-Maßnahme		
Quelle	**Ziel**	**6 - 7 Uhr**	**7 - 8 Uhr**	**8 - 9 Uhr**	**6 - 7 Uhr**	**7 - 8 Uhr**	**8 - 9 Uhr**
Backnang	Backnang	28,5	28,4	29,1	28,5	28,4	29,3
	Bietigheim-Bissingen, Besigheim	43,0	44,7	46,7	44,4	38,1	46,5
	Böblingen, Sindelfingen	57,7	62,4	63,6	61,8	49,2	63,8
	Esslingen	44,1	38,7	44,9	43,7	33,8	43,3
	Geislingen	47,7	46,7	46,5	46,5	44,0	46,8
	Göppingen	43,1	40,8	42,7	42,4	38,7	42,9
	Herrenberg	58,6	62,5	61,2	62,8	53,0	62,2
	Kirchheim	44,8	43,3	44,9	44,5	42,1	45,8
	Leonberg	52,0	57,1	57,2	56,2	47,1	57,5
	Ludwigsburg, Kornwestheim	37,0	39,2	39,6	37,8	35,0	39,9
	Nürtingen	48,4	48,0	48,2	49,4	47,9	48,6
	Schorndorf	36,7	34,7	36,1	36,4	34,7	36,4
	Stuttgart-Stadt-Nord	43,5	40,3	44,0	36,2	28,2	36,6
	Stuttgart-Stadt-Ost	43,1	34,5	44,7	38,0	29,5	38,5
	Stuttgart-Stadt-Süd	51,5	61,4	48,5	42,0	33,1	41,5
	Stuttgart-Stadt-West	44,9	51,4	46,4	39,1	31,0	42,1
	Stuttgart-Stadt-Zentrum	40,0	37,6	42,4	37,9	29,2	39,6
	Stuttgart-Süd	52,5	62,1	49,9	56,9	54,9	50,9
	Stuttgart-West	49,2	54,8	56,5	53,4	46,5	55,7
	Vaihingen	44,5	48,7	50,6	48,0	44,1	50,9
	Waiblingen, Fellbach	37,9	35,5	37,2	38,9	34,6	38,0
Bietigheim-Bissingen, Besigheim	Backnang	44,3	44,3	47,0	44,7	43,4	47,0
	Bietigheim-Bissingen, Besigheim	23,3	22,8	23,9	23,2	22,1	23,7
	Böblingen, Sindelfingen	50,9	51,2	57,7	53,7	43,6	57,9
	Esslingen	40,3	46,0	48,7	52,1	45,7	56,1
	Geislingen	0,0	35,9	0,0	0,0	36,0	0,0
	Göppingen	56,1	65,5	58,6	59,9	59,1	59,5
	Herrenberg	57,8	57,6	63,3	60,8	52,3	63,8
	Kirchheim	62,1	64,8	68,0	65,3	62,1	68,6
	Leonberg	43,3	43,1	45,5	44,1	40,0	46,3
	Ludwigsburg, Kornwestheim	29,0	28,8	32,4	29,9	27,2	32,4
	Nürtingen	60,6	61,7	66,8	63,9	60,0	67,6
	Schorndorf	47,9	44,9	48,0	47,6	45,2	49,3
	Stuttgart-Stadt-Nord	33,3	33,5	39,9	28,2	21,2	30,3
	Stuttgart-Stadt-Ost	33,3	31,2	44,2	32,1	24,7	34,6
	Stuttgart-Stadt-Süd	47,7	51,3	54,3	41,7	35,8	43,3
	Stuttgart-Stadt-West	35,8	36,5	45,6	31,2	25,2	33,6
	Stuttgart-Stadt-Zentrum	36,4	33,8	42,8	31,7	24,5	33,2
	Stuttgart-Süd	52,4	54,1	58,1	55,6	50,7	58,7
	Stuttgart-West	36,0	36,2	41,7	36,8	34,7	41,7
	Vaihingen	32,9	31,6	33,5	32,7	30,5	33,6
	Waiblingen, Fellbach	39,7	38,5	40,6	40,0	36,5	41,7

		Bezug			Road Pricing-Maßnahme		
Quelle	**Ziel**	**6 - 7 Uhr**	**7 - 8 Uhr**	**8 - 9 Uhr**	**6 - 7 Uhr**	**7 - 8 Uhr**	**8 - 9 Uhr**
Böblingen, Sindelfingen	Backnang	60,6	60,8	57,3	60,6	59,9	61,9
	Bietigheim-Bissingen, Besigheim	54,8	54,2	52,9	54,1	49,9	55,5
	Böblingen, Sindelfingen	26,4	26,6	25,9	25,0	20,4	26,2
	Esslingen	48,1	47,6	45,6	48,5	38,8	52,3
	Geislingen	69,0	68,2	67,6	69,4	66,7	71,2
	Göppingen	63,5	62,2	62,0	63,6	60,8	65,8
	Herrenberg	37,9	37,6	38,7	37,6	37,0	39,2
	Kirchheim	56,5	54,9	54,7	57,0	53,9	59,2
	Leonberg	36,6	35,2	35,6	35,7	33,4	36,5
	Ludwigsburg, Kornwestheim	53,6	52,9	51,9	53,0	50,5	55,1
	Nürtingen	45,0	43,6	43,6	44,2	40,7	45,4
	Schorndorf	52,1	50,3	49,6	52,8	52,6	54,8
	Stuttgart-Stadt-Nord	45,0	43,8	41,6	34,0	27,1	34,9
	Stuttgart-Stadt-Ost	39,6	37,7	39,4	31,3	25,5	35,3
	Stuttgart-Stadt-Süd	36,6	33,7	34,5	25,8	19,5	26,6
	Stuttgart-Stadt-West	45,8	44,2	42,2	35,5	29,3	33,8
	Stuttgart-Stadt-Zentrum	38,3	35,8	36,4	28,7	22,5	30,5
	Stuttgart-Süd	34,9	33,9	33,8	35,1	30,2	36,1
	Stuttgart-West	42,5	41,6	41,3	40,6	40,4	42,7
	Vaihingen	49,2	48,0	45,8	47,6	47,4	47,0
	Waiblingen, Fellbach	43,0	41,2	41,2	38,1	44,4	42,6
Esslingen	Backnang	45,5	42,8	46,8	44,0	44,0	45,8
	Bietigheim-Bissingen, Besigheim	45,7	51,4	45,4	54,4	51,4	52,4
	Böblingen, Sindelfingen	48,1	48,5	51,8	49,1	39,4	53,6
	Esslingen	23,9	23,1	24,4	24,6	19,2	25,3
	Geislingen	55,8	55,0	55,8	56,1	53,3	56,4
	Göppingen	44,3	43,2	44,7	44,6	41,8	45,0
	Herrenberg	58,4	56,9	61,5	59,3	49,0	63,1
	Kirchheim	32,6	31,5	33,4	33,0	31,5	33,6
	Leonberg	52,2	51,4	55,2	52,9	45,3	57,5
	Ludwigsburg, Kornwestheim	40,5	40,9	40,9	41,2	44,5	41,0
	Nürtingen	36,1	34,7	37,9	36,9	31,1	38,3
	Schorndorf	36,6	35,2	37,2	35,8	33,7	37,0
	Stuttgart-Stadt-Nord	32,0	29,7	34,4	26,8	20,2	27,9
	Stuttgart-Stadt-Ost	26,4	25,1	30,8	20,9	14,5	21,6
	Stuttgart-Stadt-Süd	37,7	36,4	40,6	27,6	20,4	29,6
	Stuttgart-Stadt-West	33,5	31,9	36,0	28,3	22,7	30,3
	Stuttgart-Stadt-Zentrum	31,1	27,7	32,6	24,6	19,2	27,4
	Stuttgart-Süd	32,4	31,9	34,4	33,5	30,3	36,2
	Stuttgart-West	47,2	50,1	45,9	49,7	49,8	50,8
	Vaihingen	47,6	55,6	46,3	56,9	57,9	57,5
	Waiblingen, Fellbach	33,6	31,3	34,6	32,2	33,4	33,2

		Bezug			Road Pricing-Maßnahme		
Quelle	**Ziel**	**6 - 7 Uhr**	**7 - 8 Uhr**	**8 - 9 Uhr**	**6 - 7 Uhr**	**7 - 8 Uhr**	**8 - 9 Uhr**
Geislingen	Backnang	48,0	49,5	48,6	47,4	46,0	48,7
	Bietigheim-Bissingen, Besigheim	55,1	68,0	0,0	62,9	60,9	0,0
	Böblingen, Sindelfingen	68,8	71,8	71,9	71,0	58,9	73,0
	Esslingen	54,8	56,7	56,2	55,6	47,7	59,8
	Geislingen	27,8	27,1	27,7	27,5	26,7	27,8
	Göppingen	36,2	35,1	36,9	35,8	33,5	37,3
	Herrenberg	67,3	0,0	66,4	71,3	61,4	67,2
	Kirchheim	52,7	51,6	52,9	52,9	48,1	52,9
	Leonberg	70,6	71,3	72,3	72,2	62,0	73,6
	Ludwigsburg, Kornwestheim	59,4	69,4	61,6	61,5	61,6	57,6
	Nürtingen	57,1	55,5	58,8	57,9	55,4	59,0
	Schorndorf	45,2	44,5	46,0	44,7	43,8	46,1
	Stuttgart-Stadt-Nord	53,8	54,2	55,8	50,2	42,0	52,0
	Stuttgart-Stadt-Ost	55,8	54,7	58,8	50,0	40,5	52,2
	Stuttgart-Stadt-Süd	63,7	65,6	65,6	55,0	44,4	56,2
	Stuttgart-Stadt-West	64,2	63,8	60,2	50,3	45,5	52,6
	Stuttgart-Stadt-Zentrum	58,9	57,2	60,7	51,7	42,0	54,0
	Stuttgart-Süd	62,9	64,6	66,7	65,8	59,4	67,7
	Stuttgart-West	69,3	68,5	72,2	70,6	66,7	72,3
	Vaihingen	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Waiblingen, Fellbach	51,1	52,1	51,8	50,7	46,8	51,9
Göppingen	Backnang	44,1	43,1	44,7	43,9	42,9	44,8
	Bietigheim-Bissingen, Besigheim	56,9	67,7	52,4	57,6	53,0	54,1
	Böblingen, Sindelfingen	61,8	64,4	65,7	64,5	50,5	67,0
	Esslingen	45,4	44,1	47,5	46,3	31,4	50,1
	Geislingen	35,3	34,8	36,1	35,9	34,4	36,7
	Göppingen	28,4	27,1	28,6	28,4	25,8	28,9
	Herrenberg	67,3	64,6	69,6	69,7	56,3	70,7
	Kirchheim	39,5	37,8	40,7	40,1	35,4	40,9
	Leonberg	64,2	65,3	66,9	66,3	54,3	68,6
	Ludwigsburg, Kornwestheim	50,1	58,0	53,8	52,9	48,4	49,3
	Nürtingen	48,6	48,1	51,4	50,1	42,9	51,6
	Schorndorf	38,1	37,1	38,8	38,0	36,3	38,9
	Stuttgart-Stadt-Nord	46,7	47,0	51,0	41,4	34,6	44,6
	Stuttgart-Stadt-Ost	45,8	45,4	51,4	40,2	33,8	43,7
	Stuttgart-Stadt-Süd	57,9	59,2	60,7	48,8	37,3	50,4
	Stuttgart-Stadt-West	47,2	55,0	50,1	41,1	35,8	45,5
	Stuttgart-Stadt-Zentrum	51,4	51,2	53,6	41,3	34,2	46,0
	Stuttgart-Süd	53,3	54,9	58,1	56,9	48,2	59,5
	Stuttgart-West	63,7	65,2	65,2	65,2	59,0	61,4
	Vaihingen	54,1	67,3	48,7	63,8	61,6	53,3
	Waiblingen, Fellbach	43,8	40,9	44,4	43,5	41,7	44,7

		Bezug			Road Pricing-Maßnahme		
Quelle	**Ziel**	**6 - 7 Uhr**	**7 - 8 Uhr**	**8 - 9 Uhr**	**6 - 7 Uhr**	**7 - 8 Uhr**	**8 - 9 Uhr**
Herrenberg	Backnang	49,6	33,0	55,8	58,3	53,1	59,1
	Bietigheim-Bissingen, Besigheim	64,0	59,4	56,2	55,3	48,3	64,9
	Böblingen, Sindelfingen	45,3	43,8	43,7	37,3	28,9	46,4
	Esslingen	60,9	58,7	53,0	52,8	40,8	64,9
	Geislingen	69,7	55,3	60,4	64,0	57,1	57,6
	Göppingen	70,4	66,6	62,6	61,6	53,7	71,7
	Herrenberg	27,0	26,4	26,4	27,1	26,0	26,8
	Kirchheim	67,8	64,1	58,6	57,4	48,8	68,7
	Leonberg	50,3	46,6	47,5	44,3	43,6	50,8
	Ludwigsburg, Kornwestheim	64,2	60,5	56,1	54,8	48,6	66,2
	Nürtingen	62,9	56,4	51,2	50,1	42,0	61,7
	Schorndorf	56,2	51,8	54,4	54,4	48,9	59,9
	Stuttgart-Stadt-Nord	57,8	51,5	49,5	40,0	31,8	46,1
	Stuttgart-Stadt-Ost	53,4	48,3	49,3	38,6	30,3	46,9
	Stuttgart-Stadt-Süd	54,0	49,4	48,1	36,5	27,1	42,5
	Stuttgart-Stadt-West	59,0	53,6	51,4	42,5	34,3	46,3
	Stuttgart-Stadt-Zentrum	53,4	48,2	48,2	37,2	28,8	43,7
	Stuttgart-Süd	55,4	52,1	42,9	41,9	34,4	56,3
	Stuttgart-West	56,4	52,7	50,4	46,7	43,1	58,1
	Vaihingen	60,7	55,6	51,7	50,7	50,2	56,9
	Waiblingen, Fellbach	51,7	49,7	48,7	41,6	45,1	50,2
Kirchheim	Backnang	46,8	47,0	47,9	46,7	46,9	48,4
	Bietigheim-Bissingen, Besigheim	65,1	66,9	67,2	67,1	61,3	68,2
	Böblingen, Sindelfingen	54,9	57,0	59,2	57,9	46,6	60,7
	Esslingen	34,5	33,2	35,5	35,6	28,9	37,8
	Geislingen	48,5	47,9	50,0	48,7	46,8	50,1
	Göppingen	38,7	37,7	40,1	38,8	36,9	40,4
	Herrenberg	63,5	64,3	66,1	66,0	54,6	67,3
	Kirchheim	25,3	24,6	26,1	25,5	24,0	26,3
	Leonberg	58,7	59,2	61,4	60,8	52,0	63,1
	Ludwigsburg, Kornwestheim	57,3	62,4	58,4	60,6	59,7	58,5
	Nürtingen	33,0	31,8	34,4	33,2	31,6	34,7
	Schorndorf	36,9	36,6	39,0	37,8	37,1	39,3
	Stuttgart-Stadt-Nord	41,1	41,0	43,4	37,0	32,6	38,9
	Stuttgart-Stadt-Ost	39,3	38,2	42,3	33,8	26,5	36,3
	Stuttgart-Stadt-Süd	50,2	50,1	52,3	39,4	30,0	40,4
	Stuttgart-Stadt-West	54,5	56,9	49,5	39,4	37,9	41,4
	Stuttgart-Stadt-Zentrum	45,0	44,2	47,8	36,9	29,3	41,2
	Stuttgart-Süd	42,1	43,5	47,3	46,3	41,6	48,8
	Stuttgart-West	58,8	59,0	62,3	60,6	58,0	63,4
	Vaihingen	64,1	64,3	65,3	66,6	63,8	65,1
	Waiblingen, Fellbach	40,2	40,3	41,2	40,1	39,8	41,4

		Bezug			Road Pricing-Maßnahme		
Quelle	**Ziel**	**6 - 7 Uhr**	**7 - 8 Uhr**	**8 - 9 Uhr**	**6 - 7 Uhr**	**7 - 8 Uhr**	**8 - 9 Uhr**
Leonberg	Backnang	56,3	56,1	57,3	56,3	56,3	57,6
	Bietigheim-Bissingen, Besigheim	45,0	44,7	46,0	45,1	42,0	46,1
	Böblingen, Sindelfingen	36,0	35,6	36,2	36,0	32,6	36,1
	Esslingen	52,8	55,3	53,8	55,6	47,1	58,1
	Geislingen	71,6	71,8	72,0	72,0	71,0	72,6
	Göppingen	66,6	66,9	67,7	67,2	66,0	68,1
	Herrenberg	46,0	46,0	46,9	45,7	42,6	48,0
	Kirchheim	61,3	62,2	62,6	62,2	60,8	63,0
	Leonberg	27,1	26,3	26,9	27,0	25,3	26,8
	Ludwigsburg, Kornwestheim	42,1	42,5	43,2	42,2	40,9	43,8
	Nürtingen	58,9	59,5	60,5	59,8	57,7	61,1
	Schorndorf	49,5	47,5	48,6	51,9	53,1	53,9
	Stuttgart-Stadt-Nord	37,4	37,5	38,7	29,4	22,6	29,5
	Stuttgart-Stadt-Ost	37,0	37,6	39,4	30,6	24,9	33,3
	Stuttgart-Stadt-Süd	38,1	38,2	38,6	28,4	22,0	28,9
	Stuttgart-Stadt-West	35,6	35,3	36,4	26,0	21,8	26,8
	Stuttgart-Stadt-Zentrum	36,3	34,1	36,3	26,9	21,3	28,4
	Stuttgart-Süd	45,2	46,8	46,4	46,5	44,5	46,8
	Stuttgart-West	29,3	28,4	29,4	28,7	28,2	28,8
	Vaihingen	39,8	40,1	39,6	40,1	39,9	39,6
	Waiblingen, Fellbach	41,8	40,1	41,6	45,3	42,6	46,4
Ludwigs-burg, Kornwest-heim	Backnang	37,5	36,8	37,8	37,4	37,1	37,9
	Bietigheim-Bissingen, Besigheim	28,4	27,4	29,8	28,6	26,4	29,8
	Böblingen, Sindelfingen	52,7	51,7	57,0	54,7	43,8	57,3
	Esslingen	38,6	40,4	42,7	40,2	33,8	41,5
	Geislingen	56,1	60,2	53,8	57,2	56,8	52,6
	Göppingen	50,7	51,0	51,7	50,1	49,2	50,0
	Herrenberg	60,8	60,3	64,0	63,0	54,0	64,7
	Kirchheim	54,8	58,4	56,1	57,4	60,6	56,2
	Leonberg	41,5	40,8	42,7	42,5	37,8	43,6
	Ludwigsburg, Kornwestheim	24,7	23,5	27,4	25,4	23,3	27,2
	Nürtingen	60,6	60,4	60,8	63,7	62,2	63,6
	Schorndorf	45,8	40,3	44,2	45,8	42,8	46,1
	Stuttgart-Stadt-Nord	29,2	26,1	31,6	21,0	15,1	21,2
	Stuttgart-Stadt-Ost	30,7	27,0	36,8	26,9	19,8	27,8
	Stuttgart-Stadt-Süd	47,7	52,3	48,4	37,2	33,4	35,1
	Stuttgart-Stadt-West	32,4	29,5	36,7	24,4	18,9	25,2
	Stuttgart-Stadt-Zentrum	29,4	26,6	34,3	25,7	18,6	25,5
	Stuttgart-Süd	54,5	55,4	55,5	57,1	52,5	58,6
	Stuttgart-West	33,1	32,0	37,0	34,0	32,6	36,9
	Vaihingen	35,0	33,6	37,2	34,5	33,7	37,5
	Waiblingen, Fellbach	34,7	31,9	34,1	35,2	31,7	34,6

		Bezug			Road Pricing-Maßnahme		
Quelle	**Ziel**	**6 - 7 Uhr**	**7 - 8 Uhr**	**8 - 9 Uhr**	**6 - 7 Uhr**	**7 - 8 Uhr**	**8 - 9 Uhr**
Nürtingen	Backnang	49,3	48,5	50,1	48,8	50,6	50,3
	Bietigheim-Bissingen, Besigheim	63,4	62,9	62,5	63,8	57,1	66,8
	Böblingen, Sindelfingen	46,7	47,4	46,8	47,8	39,7	50,6
	Esslingen	34,2	33,9	35,9	35,0	26,6	39,3
	Geislingen	55,2	54,9	57,8	56,1	50,2	59,8
	Göppingen	46,6	46,7	49,4	47,7	44,1	51,1
	Herrenberg	56,2	54,9	52,9	57,0	46,8	58,4
	Kirchheim	31,0	30,3	33,0	31,7	28,1	34,9
	Leonberg	56,1	55,5	54,9	56,0	46,8	60,5
	Ludwigsburg, Kornwestheim	60,3	62,2	58,9	63,1	58,3	66,0
	Nürtingen	24,0	23,3	24,7	24,4	22,0	25,0
	Schorndorf	41,5	40,8	43,2	42,0	39,7	44,1
	Stuttgart-Stadt-Nord	41,3	40,5	41,2	36,4	29,5	39,4
	Stuttgart-Stadt-Ost	38,1	37,2	39,3	31,8	24,2	35,3
	Stuttgart-Stadt-Süd	46,3	44,0	44,1	33,8	24,8	36,2
	Stuttgart-Stadt-West	54,4	55,2	47,6	41,5	36,7	41,7
	Stuttgart-Stadt-Zentrum	42,5	39,5	42,9	34,0	25,2	38,3
	Stuttgart-Süd	34,2	35,7	34,3	35,3	31,5	37,7
	Stuttgart-West	56,5	55,6	56,4	56,3	52,8	61,4
	Vaihingen	63,0	63,1	61,2	63,7	59,8	64,2
	Waiblingen, Fellbach	42,3	41,5	43,0	42,0	38,1	43,8
Schorndorf	Backnang	38,3	36,4	37,8	38,0	35,9	37,8
	Bietigheim-Bissingen, Besigheim	44,6	43,8	45,9	46,9	41,5	46,0
	Böblingen, Sindelfingen	51,1	55,2	50,6	54,2	44,4	55,0
	Esslingen	37,7	35,6	38,9	36,3	30,2	38,8
	Geislingen	44,4	43,8	44,9	45,0	41,7	45,3
	Göppingen	37,1	35,5	37,9	36,8	33,3	38,1
	Herrenberg	55,4	57,2	54,5	59,1	49,6	58,4
	Kirchheim	37,4	36,6	38,9	37,3	35,8	38,9
	Leonberg	49,5	54,4	47,9	52,7	45,8	52,3
	Ludwigsburg, Kornwestheim	43,5	39,2	43,8	44,8	40,0	43,7
	Nürtingen	42,1	41,3	44,5	42,6	36,7	44,8
	Schorndorf	26,7	25,4	26,9	26,8	24,4	27,2
	Stuttgart-Stadt-Nord	45,1	34,7	45,3	34,6	26,9	36,8
	Stuttgart-Stadt-Ost	42,2	31,8	46,2	35,6	27,0	37,7
	Stuttgart-Stadt-Süd	45,0	49,5	44,4	38,5	30,5	41,2
	Stuttgart-Stadt-West	42,9	37,5	43,6	35,4	27,7	39,6
	Stuttgart-Stadt-Zentrum	39,0	31,8	43,0	35,7	27,0	39,1
	Stuttgart-Süd	44,2	45,9	46,2	47,0	39,7	47,4
	Stuttgart-West	43,9	47,7	44,2	42,7	43,7	45,8
	Vaihingen	47,6	45,1	48,2	47,8	44,1	48,8
	Waiblingen, Fellbach	38,7	33,7	39,0	38,6	36,4	39,2

		Bezug			Road Pricing-Maßnahme		
Quelle	**Ziel**	**6 - 7 Uhr**	**7 - 8 Uhr**	**8 - 9 Uhr**	**6 - 7 Uhr**	**7 - 8 Uhr**	**8 - 9 Uhr**
Stuttgart-Stadt-Nord	Backnang	44,8	42,7	45,8	44,4	43,1	46,3
	Bietigheim-Bissingen, Besigheim	40,7	35,8	40,2	40,0	35,5	41,1
	Böblingen, Sindelfingen	45,8	41,9	45,9	45,4	38,4	46,8
	Esslingen	34,1	31,2	38,8	38,8	35,0	39,1
	Geislingen	59,8	57,8	61,1	62,2	60,6	62,1
	Göppingen	52,4	49,2	55,6	55,1	53,0	56,3
	Herrenberg	54,1	49,3	54,5	53,0	48,6	55,9
	Kirchheim	47,6	45,7	49,9	50,0	49,5	49,5
	Leonberg	43,4	38,4	40,4	42,1	35,9	42,0
	Ludwigsburg, Kornwestheim	31,4	27,9	31,8	31,2	29,2	32,5
	Nürtingen	48,4	45,4	50,0	49,8	46,1	51,2
	Schorndorf	47,3	45,7	48,4	48,1	47,1	49,6
	Stuttgart-Stadt-Nord	17,3	14,2	18,5	17,8	15,9	18,9
	Stuttgart-Stadt-Ost	22,0	19,8	26,7	24,5	22,6	27,2
	Stuttgart-Stadt-Süd	33,7	34,1	33,4	33,0	30,8	34,5
	Stuttgart-Stadt-West	20,9	17,3	22,6	21,2	19,3	24,8
	Stuttgart-Stadt-Zentrum	19,7	17,2	24,7	25,1	22,3	25,6
	Stuttgart-Süd	37,8	36,4	37,7	37,9	34,3	38,4
	Stuttgart-West	30,9	27,0	30,7	29,8	28,1	31,3
	Vaihingen	40,6	36,6	41,8	40,1	38,9	42,8
	Waiblingen, Fellbach	28,9	27,3	29,8	29,5	28,0	30,6
Stuttgart-Stadt-Ost	Backnang	48,9	47,9	50,5	49,2	48,3	51,4
	Bietigheim-Bissingen, Besigheim	42,9	36,9	43,7	44,6	37,8	46,4
	Böblingen, Sindelfingen	46,4	46,8	46,2	45,8	38,6	48,4
	Esslingen	28,4	26,4	30,8	29,8	27,1	31,1
	Geislingen	62,4	61,1	63,3	63,3	64,1	63,7
	Göppingen	53,7	51,6	55,9	54,7	55,3	56,2
	Herrenberg	56,5	54,5	56,3	56,2	49,3	58,3
	Kirchheim	45,4	44,4	46,8	46,3	48,7	46,1
	Leonberg	44,6	42,4	43,7	43,7	38,6	46,3
	Ludwigsburg, Kornwestheim	36,7	33,0	37,5	37,5	35,6	40,0
	Nürtingen	42,9	41,7	45,4	44,0	42,5	45,9
	Schorndorf	49,8	48,8	50,8	50,4	50,0	51,9
	Stuttgart-Stadt-Nord	25,7	22,8	27,3	27,0	26,2	29,8
	Stuttgart-Stadt-Ost	15,7	14,4	21,4	18,1	16,6	22,3
	Stuttgart-Stadt-Süd	30,0	26,2	29,9	30,0	29,5	31,3
	Stuttgart-Stadt-West	27,6	22,7	30,1	28,2	26,2	33,9
	Stuttgart-Stadt-Zentrum	22,6	18,7	25,4	25,0	23,0	29,8
	Stuttgart-Süd	29,8	30,2	31,8	30,6	29,1	34,0
	Stuttgart-West	36,9	34,0	35,3	34,7	33,2	37,8
	Vaihingen	41,9	36,4	43,5	42,8	40,8	46,0
	Waiblingen, Fellbach	33,1	31,8	34,6	34,1	33,5	35,8

		Bezug			Road Pricing-Maßnahme		
Quelle	**Ziel**	**6 - 7 Uhr**	**7 - 8 Uhr**	**8 - 9 Uhr**	**6 - 7 Uhr**	**7 - 8 Uhr**	**8 - 9 Uhr**
Stuttgart-Stadt-Süd	Backnang	48,7	50,2	50,1	49,4	48,7	51,9
	Bietigheim-Bissingen, Besigheim	59,0	58,9	56,5	58,1	53,8	56,5
	Böblingen, Sindelfingen	41,1	43,8	41,3	40,7	33,6	41,1
	Esslingen	36,7	38,3	37,5	37,3	30,9	40,2
	Geislingen	72,7	72,1	73,2	73,1	71,8	73,4
	Göppingen	65,8	64,8	66,1	66,2	64,4	66,4
	Herrenberg	56,2	55,5	56,7	56,1	50,0	57,0
	Kirchheim	57,2	56,9	58,2	58,3	55,9	58,5
	Leonberg	42,9	43,1	43,4	42,4	37,8	43,2
	Ludwigsburg, Kornwestheim	56,6	58,4	50,3	53,4	51,3	46,6
	Nürtingen	52,7	50,5	52,7	52,5	49,5	53,2
	Schorndorf	47,8	46,2	49,5	48,2	47,3	52,0
	Stuttgart-Stadt-Nord	32,6	31,8	33,1	31,1	28,6	33,8
	Stuttgart-Stadt-Ost	28,8	27,3	31,7	29,0	28,0	33,2
	Stuttgart-Stadt-Süd	20,6	20,0	20,9	20,8	21,1	21,2
	Stuttgart-Stadt-West	34,1	32,5	34,3	33,3	30,5	35,1
	Stuttgart-Stadt-Zentrum	27,1	22,4	27,8	26,8	23,8	29,3
	Stuttgart-Süd	28,8	29,1	28,1	29,1	27,0	28,1
	Stuttgart-West	39,4	38,5	39,5	37,7	37,4	38,6
	Vaihingen	57,2	57,8	53,5	55,6	56,1	53,2
	Waiblingen, Fellbach	36,7	34,6	38,1	36,7	36,3	40,2
Stuttgart-Stadt-West	Backnang	52,6	50,9	51,6	49,1	47,8	51,7
	Bietigheim-Bissingen, Besigheim	45,7	44,5	46,6	44,8	39,0	46,5
	Böblingen, Sindelfingen	43,3	43,9	43,6	44,4	37,6	44,2
	Esslingen	31,9	37,3	37,4	36,1	32,3	40,0
	Geislingen	69,3	68,5	63,8	67,4	67,0	64,9
	Göppingen	57,3	57,3	54,3	52,2	50,2	55,7
	Herrenberg	54,1	54,2	55,3	55,0	50,5	56,0
	Kirchheim	59,7	60,6	57,2	56,0	56,6	54,6
	Leonberg	33,2	33,8	33,9	32,5	29,9	34,3
	Ludwigsburg, Kornwestheim	36,4	37,2	37,7	36,4	34,5	39,0
	Nürtingen	57,9	58,4	58,3	58,2	56,0	58,5
	Schorndorf	42,0	41,5	45,9	43,9	42,5	47,7
	Stuttgart-Stadt-Nord	18,9	17,8	22,1	19,3	17,7	23,1
	Stuttgart-Stadt-Ost	22,3	22,3	28,1	24,6	22,9	29,9
	Stuttgart-Stadt-Süd	31,8	31,7	31,5	31,5	32,5	32,7
	Stuttgart-Stadt-West	16,7	15,1	18,1	16,4	15,6	18,2
	Stuttgart-Stadt-Zentrum	24,2	19,0	23,7	22,6	21,7	25,4
	Stuttgart-Süd	43,2	45,4	42,8	44,2	40,2	39,1
	Stuttgart-West	23,2	22,6	24,3	22,6	21,7	24,0
	Vaihingen	38,9	40,6	41,2	38,0	38,6	42,0
	Waiblingen, Fellbach	28,8	28,3	32,3	30,6	28,8	34,1

		Bezug			Road Pricing-Maßnahme		
Quelle	**Ziel**	**6 - 7 Uhr**	**7 - 8 Uhr**	**8 - 9 Uhr**	**6 - 7 Uhr**	**7 - 8 Uhr**	**8 - 9 Uhr**
Stuttgart-Stadt-Zentrum	Backnang	49,4	48,1	51,3	49,6	48,2	51,8
	Bietigheim-Bissingen, Besigheim	44,0	40,7	45,0	43,6	39,7	45,1
	Böblingen, Sindelfingen	44,3	43,5	44,3	44,1	37,7	44,3
	Esslingen	34,7	34,2	38,3	37,8	34,6	39,2
	Geislingen	69,1	67,5	68,3	68,8	67,3	68,4
	Göppingen	57,2	56,2	58,9	57,8	56,3	59,0
	Herrenberg	56,4	54,6	56,7	56,3	51,7	56,9
	Kirchheim	55,4	53,7	55,4	55,4	53,5	55,3
	Leonberg	38,6	37,6	39,2	38,6	35,9	39,6
	Ludwigsburg, Kornwestheim	36,1	33,7	37,7	36,2	34,2	37,5
	Nürtingen	52,3	50,0	52,6	52,4	49,1	52,9
	Schorndorf	50,4	48,9	51,8	50,8	49,7	52,4
	Stuttgart-Stadt-Nord	23,4	23,1	24,7	24,3	22,6	25,3
	Stuttgart-Stadt-Ost	23,8	22,8	28,7	25,5	24,4	29,4
	Stuttgart-Stadt-Süd	27,7	27,1	27,8	28,8	28,4	28,5
	Stuttgart-Stadt-West	25,5	23,6	27,0	25,8	23,8	27,7
	Stuttgart-Stadt-Zentrum	16,6	14,6	17,5	16,8	15,4	17,9
	Stuttgart-Süd	34,6	34,3	34,2	35,0	32,2	34,2
	Stuttgart-West	34,7	32,4	33,9	34,1	33,5	34,4
	Vaihingen	42,1	40,7	44,4	41,5	40,7	44,7
	Waiblingen, Fellbach	34,8	33,2	36,2	35,1	34,3	36,7
Stuttgart-Süd	Backnang	50,3	52,5	46,6	62,2	63,4	53,5
	Bietigheim-Bissingen, Besigheim	58,2	56,5	56,4	58,4	53,7	60,0
	Böblingen, Sindelfingen	39,5	40,0	37,6	40,1	31,9	41,0
	Esslingen	33,9	32,4	34,2	32,8	28,0	35,4
	Geislingen	67,7	66,8	64,4	65,3	65,2	65,3
	Göppingen	60,3	58,9	57,5	57,7	57,6	57,7
	Herrenberg	55,8	53,1	52,7	55,1	43,1	56,8
	Kirchheim	51,0	48,9	46,9	47,0	47,7	46,6
	Leonberg	46,4	44,8	43,8	46,3	40,4	48,9
	Ludwigsburg, Kornwestheim	57,5	56,2	53,5	58,3	55,1	60,7
	Nürtingen	34,2	32,9	34,5	34,2	32,3	34,9
	Schorndorf	49,4	48,0	47,0	48,4	48,7	47,5
	Stuttgart-Stadt-Nord	36,8	34,4	33,6	28,2	22,8	29,8
	Stuttgart-Stadt-Ost	30,0	27,7	29,5	22,8	18,2	26,2
	Stuttgart-Stadt-Süd	29,7	27,7	26,3	18,3	13,0	18,9
	Stuttgart-Stadt-West	44,5	43,2	36,9	33,6	30,1	30,8
	Stuttgart-Stadt-Zentrum	31,8	27,0	29,6	23,2	16,4	25,2
	Stuttgart-Süd	16,8	17,9	16,5	18,0	17,2	17,3
	Stuttgart-West	46,7	45,1	43,3	47,7	47,4	51,1
	Vaihingen	58,2	57,4	55,5	58,7	57,0	57,7
	Waiblingen, Fellbach	39,1	35,7	37,0	33,5	39,7	38,1

		Bezug			Road Pricing-Maßnahme		
Quelle	**Ziel**	**6 - 7 Uhr**	**7 - 8 Uhr**	**8 - 9 Uhr**	**6 - 7 Uhr**	**7 - 8 Uhr**	**8 - 9 Uhr**
Stuttgart-West	Backnang	55,2	53,6	55,7	54,1	54,7	55,6
	Bietigheim-Bissingen, Besigheim	39,8	38,1	41,0	38,6	36,0	41,0
	Böblingen, Sindelfingen	44,3	43,9	45,9	43,2	34,6	45,2
	Esslingen	42,0	49,9	42,2	47,3	43,1	51,9
	Geislingen	70,3	70,2	70,6	70,9	70,4	68,6
	Göppingen	66,6	66,1	67,4	66,4	65,8	61,9
	Herrenberg	54,8	54,1	56,6	54,8	46,5	57,4
	Kirchheim	61,8	61,5	63,5	61,9	60,9	64,1
	Leonberg	28,3	29,0	28,2	27,8	26,4	27,7
	Ludwigsburg, Kornwestheim	34,8	34,9	36,0	34,1	33,1	36,0
	Nürtingen	59,7	59,1	61,5	59,7	58,0	62,5
	Schorndorf	46,7	41,8	45,2	45,9	47,7	49,0
	Stuttgart-Stadt-Nord	24,3	25,1	26,6	17,9	13,0	18,9
	Stuttgart-Stadt-Ost	28,8	27,6	32,1	24,3	19,4	25,9
	Stuttgart-Stadt-Süd	34,6	33,8	34,6	25,7	21,3	26,2
	Stuttgart-Stadt-West	22,9	22,7	23,6	14,4	11,0	14,9
	Stuttgart-Stadt-Zentrum	32,2	30,3	31,1	22,9	18,2	23,5
	Stuttgart-Süd	47,0	47,2	47,1	47,7	45,4	49,7
	Stuttgart-West	19,3	18,9	19,3	17,8	19,7	17,8
	Vaihingen	34,2	35,4	36,0	34,1	35,1	35,8
	Waiblingen, Fellbach	36,6	34,0	35,8	38,4	37,5	40,1
Vaihingen	Backnang	47,6	47,2	48,4	47,5	46,7	50,0
	Bietigheim-Bissingen, Besigheim	30,8	32,0	33,1	32,0	29,5	33,1
	Böblingen, Sindelfingen	47,6	48,8	48,0	48,8	42,5	48,9
	Esslingen	42,5	57,7	47,6	56,5	49,8	60,4
	Geislingen	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Göppingen	58,2	63,6	57,3	65,2	64,5	57,9
	Herrenberg	52,4	55,8	56,5	55,7	49,6	57,2
	Kirchheim	62,0	67,2	66,1	66,0	63,1	67,1
	Leonberg	38,7	38,9	39,8	39,6	37,9	39,7
	Ludwigsburg, Kornwestheim	33,7	34,1	36,5	34,4	33,8	37,5
	Nürtingen	60,6	65,9	65,0	64,4	61,0	66,1
	Schorndorf	48,4	44,6	47,7	48,7	47,1	51,1
	Stuttgart-Stadt-Nord	34,2	33,3	37,8	28,2	22,1	30,2
	Stuttgart-Stadt-Ost	33,3	37,0	42,1	31,5	25,1	34,2
	Stuttgart-Stadt-Süd	46,4	53,2	46,3	40,3	35,3	41,1
	Stuttgart-Stadt-West	38,8	38,8	40,3	29,8	25,8	31,2
	Stuttgart-Stadt-Zentrum	39,3	41,8	40,3	31,4	25,5	32,9
	Stuttgart-Süd	52,4	58,6	56,2	56,2	51,6	57,3
	Stuttgart-West	34,2	35,1	35,6	34,4	34,7	35,4
	Vaihingen	24,1	23,9	24,6	24,3	23,9	24,8
	Waiblingen, Fellbach	41,6	38,6	42,6	42,5	38,9	44,2

		Bezug			Road Pricing-Maßnahme		
Quelle	**Ziel**	**6 - 7 Uhr**	**7 - 8 Uhr**	**8 - 9 Uhr**	**6 - 7 Uhr**	**7 - 8 Uhr**	**8 - 9 Uhr**
Waiblingen, Fellbach	Backnang	37,6	36,0	38,1	37,5	35,9	38,3
	Bietigheim-Bissingen, Besigheim	37,9	36,6	38,9	38,4	35,9	39,5
	Böblingen, Sindelfingen	46,3	43,5	42,3	46,0	41,5	46,0
	Esslingen	34,2	30,1	35,4	33,2	24,5	33,2
	Geislingen	50,8	48,8	49,8	49,6	44,7	49,9
	Göppingen	43,1	40,4	43,2	41,8	38,6	42,9
	Herrenberg	52,5	47,6	48,9	50,9	47,0	50,8
	Kirchheim	41,4	38,7	41,9	39,8	34,9	40,9
	Leonberg	45,5	43,0	43,3	44,7	40,6	46,0
	Ludwigsburg, Kornwestheim	34,6	32,0	35,0	34,5	32,3	35,1
	Nürtingen	43,7	41,2	45,3	43,7	33,5	44,2
	Schorndorf	38,2	35,1	37,6	37,3	36,0	37,7
	Stuttgart-Stadt-Nord	31,6	24,3	31,6	21,9	15,8	21,7
	Stuttgart-Stadt-Ost	29,2	21,1	33,7	24,1	17,5	24,5
	Stuttgart-Stadt-Süd	33,4	35,3	35,5	30,0	23,9	31,5
	Stuttgart-Stadt-West	32,9	27,5	32,9	24,5	18,8	26,6
	Stuttgart-Stadt-Zentrum	27,5	21,7	31,9	25,3	18,5	26,7
	Stuttgart-Süd	36,7	36,3	37,3	37,5	35,1	39,8
	Stuttgart-West	38,9	37,1	37,4	36,8	37,6	39,9
	Vaihingen	43,1	38,9	43,6	40,9	39,2	44,4
	Waiblingen, Fellbach	26,4	23,3	26,6	26,6	25,5	26,2

Karten

Karte 1	Topologische Übersichtskarte Region Stuttgart
Karte 2	Übersichtskarte: Verkehrsbezirke, Mittelbereiche, Landkreise, wichtige Verkehrsinfrastruktur
Karte 3	Verkehrsaufkommen nach Bezirken, Fahrtzweck Arbeit, Bezugsfall
Karte 4	Verkehrsaufkommen nach Mittelbereichen, Fahrtzweck Arbeit, Bezugsfall
Karte 5	MIV-Fahrtanteil am Aufkommen, Fahrtzweck Arbeit, Bezugsfall
Karte 6	ÖV-Fahrtanteil am Aufkommen, Fahrtzweck Arbeit, Bezugsfall
Karte 7	Radverkehrsanteil am Aufkommen, Fahrtzweck Arbeit, Bezugsfall
Karte 8	Fußgängeranteil am Aufkommen, Fahrtzweck Arbeit, Bezugsfall
Karte 9	Anteil des Zellbinnenverkehrs am Aufkommen, Fahrtzweck Arbeit, Bezugsfall
Karte 10	Veränderung der Verkehrsqualität im Zeitintervall 7 bis 8 Uhr, Maßnahmefall vs. Bezugsfall