

Weiterentwicklung von Bemessungsverfahren in planfreien Knotenpunkten

Vom Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen
der Universität Hannover
zur Erlangung des Grades einer

DOKTORIN DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN
Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation

von
Dipl.-Ing. Wiebke Dammann

geboren am 17.03.1973 in Stade

Hannover 2004

Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernhard Friedrich, Universität Hannover

Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Werner Brilon, Ruhr-Universität Bochum

Tag der Promotion: 19. Mai 2004

Kurzfassung

Für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen ist die Kenntnis der Kapazität von großer Bedeutung, da durch eine den verkehrlichen Randbedingungen angepasste Bemessung Kapazitätsengpässe vermieden werden können. In der vorliegenden Arbeit werden die bisherigen Erkenntnisse bezüglich der Kapazität und der Qualität des Verkehrsablaufs in planfreien Knotenpunkten überprüft und weiterentwickelt. Aus- und Einfahrten stehen dabei im Mittelpunkt.

Im Rahmen einer Literaturanalyse werden zunächst die vorhandenen Bemessungsverfahren für Aus- und Einfahrten analysiert. Auch zahlreiche Verfahren zur Kapazitätsermittlung auf Autobahnen werden betrachtet. Nach der Durchführung von umfangreichen empirischen Untersuchungen in zahlreichen Aus- und Einfahrten werden die bisherigen Bemessungsverfahren überprüft. Aufbauend auf der Literaturanalyse und der Überprüfung werden anschließend einzelne Bemessungsansätze weiterentwickelt.

Zunächst steht im Rahmen der Weiterentwicklung die Ermittlung der Kapazität im Mittelpunkt der Betrachtungen. Es werden verschiedene Verfahren zur Schätzung der Kapazität angewendet. Einerseits werden Verfahren zur Schätzung der Kapazität mittels Verkehrsstärken und Geschwindigkeiten eingesetzt, bei denen Übergänge vom stabilen in den instabilen Verkehrszustand betrachtet werden. Andererseits wird die Kapazität durch die Analyse von Fundamentaldiagrammen unter Anwendung eines makroskopischen Verkehrsflussmodells ermittelt. Einige Verfahren können jedoch nur in einzelnen Untersuchungsstellen angewendet werden. Die Ergebnisse sind insgesamt sehr uneinheitlich.

Für die Bemessung von Einfahrten des Typs E 1 / E 2 wird außerdem auf der Grundlage der empirisch erhobenen Daten ein funktionaler Zusammenhang für die Bestimmung der Verkehrsstärke im rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn ermittelt. Eine Funktion in Form eines Polynoms 3. Grades erweist sich dabei sowohl an zwei- als auch an dreistreifigen Hauptfahrbahnen als sehr gut geeignet. Darüber hinaus stellt die Funktion einen plausiblen Zusammenhang zwischen den betrachteten Größen dar, da die Verkehrsstärke im rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn nicht als prozentualer Anteil der Gesamtverkehrsstärke angenommen wird. Auf der Grundlage dieses neu ermittelten funktionalen Zusammenhangs sowie der im HBS 2001 angegebenen Kapazität für den Einfahrtstyp E 1 / E 2 und der Auslastungsgrade für die einzelnen Stufen der Qualität des Verkehrsablaufs werden die bestehenden Bemessungsdiagramme für den Einfädungsvorgang weiterentwickelt. Aufgrund der geringen Anzahl an Untersuchungsstellen für die Einfahrtstypen ist jedoch zu empfehlen, die Erkenntnisse insbesondere für zweistreifigen Hauptfahrbahnen zu verdichten.

Schlagwörter: Planfreier Knotenpunkt, Bemessung, Kapazität

Abstract

For the design of traffic systems the knowledge of the capacity is of great importance. With a design, that is well adapted on traffic referred conditions bottlenecks can be avoided. In this work the past knowledge is examined and developed further concerning the capacity and the quality of the traffic flow in grate separated junctions. Off-ramps and on-ramps stand thereby in the centre.

In the context of a literature analysis first the existing calculation procedures for the design of off-ramps and on-ramps are analyzed. Also numerous procedures for the capacity determination on motorways are regarded. After the execution of extensive empirical investigations in numerous off-ramps and on-ramps the past calculation procedures are examined. With regard on the literature analysis and the examination afterwards the calculation procedures for the design of off-ramps and on-ramps are developed further.

In the context of the advancement first the determination of the capacity in the foreground is located. Different procedures for the estimation of the capacity are accomplished. On the one hand procedures for the estimation of the capacity are used by means of traffic volumes and speeds, at which transitions of the stable to the unstable traffic condition are regarded. On the other hand the capacity is determined by the analysis of fundamental diagrams with application of a macroscopic traffic flow model. Some methods can be used however only in individual investigation places. The results are altogether very non-uniform.

For the design of on-ramps on the basis of the empirically raised data a functional connection for the determination of the traffic volume in the right driving lane of the main roadway is determined. A function in form of a polynomial of third degree is thereby very well suitably both at on-ramps at two-lane and at three-lane main roadways. Beyond that the function represents a plausible connection, because the traffic volume in the right lane of the main roadway is not a proportional portion of the overall traffic volume of the main roadway. On the basis of this determined functional connection as well as the capacity indicated in the HBS 2001 and the rates of utilization for the level of service the existing calculation diagrams for the design of entries are developed further. The areas of application of the calculation diagrams for small traffic volumes in the main roadway can be extended. However, because of the small number of investigation places for some types of on-ramps it is recommended to deepen the knowledge particularly for on-ramps at two-lane main roadways.

Key words: grade separated junction, quality of traffic flow, capacity

Inhaltsverzeichnis

1	Problemstellung und Zielsetzung	1
2	Theoretische Grundlagen	3
2.1	Überblick	3
2.2	Kenngößen zur Beschreibung des Verkehrsablaufs.....	3
2.3	Zusammenhänge zwischen den Kenngößen des Verkehrsablaufs.....	4
3	Literaturanalyse.....	9
3.1	Überblick	9
3.2	Entwicklung der deutschen Richtlinien und Entwurfshinweise.....	9
3.3	Aktuelle Richtlinien und Entwurfshinweise in Deutschland	11
3.4	Untersuchungen über die Bemessung von Ausfahrten.....	14
3.5	Untersuchungen über die Bemessung von Einfahrten.....	15
3.6	Vorhandene Bemessungsverfahren für Aus- und Einfahrten.....	19
3.6.1	Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen.....	19
3.6.2	Highway Capacity Manual 2000.....	26
3.7	Verfahren zur Kapazitätsermittlung auf Autobahnen	28
3.7.1	Allgemeines.....	28
3.7.2	Schätzung der Kapazität mittels Zeitlücken	29
3.7.3	Schätzung der Kapazität mittels Verkehrsstärken	30
3.7.4	Schätzung der Kapazität mittels Verkehrsstärken und Geschwindigkeiten	31
3.7.5	Schätzung der Kapazität mittels Verkehrsstärken, Verkehrsdichten und Geschwindigkeiten	38
3.8	Makroskopische Verkehrsflussmodelle	38
3.8.1	Allgemeines.....	38
3.8.2	Das lineare k-v-Modell von GREENSHIELDS	39
3.8.3	Das k-v-Modell von VAN AERDE	39
3.8.4	Das Modell von WU.....	41
3.9	Fazit	43
4	Durchführung von empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf.....	45
4.1	Auswahl der Untersuchungsstellen.....	45
4.2	Messsystem	48

4.3	Wahl des Bezugsintervalls	48
4.4	Plausibilitätskontrolle.....	49
5	Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf. 51	
5.1	Überblick	51
5.2	Ausfahrten.....	52
5.2.1	Ausfahrttyp A 1.....	52
5.2.2	Ausfahrttyp A 2.....	54
5.2.3	Ausfahrttyp A 3.....	55
5.2.4	Ausfahrttyp A 4.....	56
5.2.5	Ausfahrttyp A 5.....	57
5.3	Einfahrten.....	58
5.3.1	Einfahrttyp E 1 / E 2	58
5.3.2	Einfahrttyp E 3.....	59
5.3.3	Einfahrttyp E 4.....	60
5.3.4	Einfahrttyp E 5.....	61
5.4	Fazit	62
6	Überprüfung der Bemessungsverfahren	65
6.1	Überblick	65
6.2	Überprüfung der Kapazität.....	65
6.2.1	Ausfahrten.....	65
6.2.2	Einfahrten.....	67
6.3	Überprüfung des Einfädelungsvorgangs.....	69
6.4	Fazit	74
7	Weiterentwicklung der Bemessungsverfahren	77
7.1	Überblick	77
7.2	Ermittlung der Kapazität.....	77
7.2.1	Auswahl geeigneter Methoden.....	77
7.2.2	Anwendung der Breakdown Probability Methode	78
7.2.3	Anwendung der Methode von ZURLINDEN	85
7.2.4	Anwendung des Modells von VAN AERDE.....	88
7.2.5	Zusammenfassung der Ergebnisse	91
7.3	Beschreibung des Einfädelungsvorgangs.....	93
7.3.1	Ermittlung der Verkehrsstärke im rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn.....	93
7.3.2	Neue Bemessungsdiagramme.....	102

7.4	Fazit	105
8	Zusammenfassung.....	107
9	Literaturverzeichnis	111
10	Abbildungsverzeichnis	121
11	Tabellenverzeichnis	123

Anhang

1 Problemstellung und Zielsetzung

Die Zunahme des Kraftfahrzeugverkehrs auf den Bundesautobahnen führte in den letzten Jahren immer häufiger zu Kapazitätsengpässen. Die Kapazität und die Qualität des Verkehrsablaufs eines Autobahnabschnitts wird dabei entscheidend durch die planfreien Knotenpunkte beeinflusst, denn in den planfreien Knotenpunkten treten Konflikte durch die Ausfädelungs-, Verflechtungs- und Einfädelungsvorgänge auf. Um Kapazitätsengpässe in planfreien Knotenpunkten zu vermeiden, ist deshalb die Kenntnis der Kapazität der einzelnen Knotenpunktelemente von großer Bedeutung. Für die Bemessung sind darüber hinaus die Zusammenhänge zwischen den Verkehrsbelastungen unterhalb der Kapazität und der Qualität des Verkehrsablaufs wichtig. Nur die Kenntnis über diese Zusammenhänge ermöglicht eine den verkehrlichen Randbedingungen angepasste Bemessung der Knotenpunktelemente.

Im Jahre 2001 wurde erstmals ein Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen veröffentlicht, das die Kapazitätsbestimmung und die Beurteilung der Qualität des Verkehrsablaufs für nahezu alle Straßenverkehrsanlagen ermöglicht. Den im Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen enthaltenen Bemessungsverfahren für planfreie Knotenpunkte liegen mehrere Forschungsvorhaben zugrunde. Dennoch bestehen in den Bemessungsverfahren weiterhin einige Defizite. Darüber hinaus machen neue Ansätze zur Ermittlung der Kapazität von Straßenverkehrsanlagen eine Überprüfung der gewählten Ansätze erforderlich.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist daher die Überprüfung und Weiterentwicklung der bestehenden Bemessungsverfahren für Aus- und Einfahrten in planfreien Knotenpunkten. Nach einer Literaturanalyse und einer systematischen Darstellung des derzeitigen Forschungsstands werden umfangreiche empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf durchgeführt. Anhand der gewonnenen Daten erfolgt eine Analyse der Ergebnisse der empirischen Untersuchungen und die Überprüfung der vorhandenen Bemessungsverfahren für Aus- und Einfahrten in planfreien Knotenpunkten. Aufbauend auf den durch die Überprüfung der Bemessungsverfahren gewonnen Erkenntnissen werden abschließend die Bemessungsverfahren weiterentwickelt. Die modifizierten Ansätze sollen so angelegt sein, dass sie bei einer Fortschreibung des Handbuchs für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen berücksichtigt werden können.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Überblick

Für die Überprüfung und die Weiterentwicklung der Bemessungsverfahren sind die Kenngrößen zur Beschreibung des Verkehrsablaufs und ihre Zusammenhänge von zentraler Bedeutung. Im Folgenden werden daher die Kenngrößen beschrieben und ihre Zusammenhänge dargestellt.

2.2 Kenngrößen zur Beschreibung des Verkehrsablaufs

Die **Verkehrsstärke** q ist definiert als die Anzahl n der Kraftfahrzeuge die in einem Zeitintervall Δt an einem Querschnitt erfasst werden. In der Regel werden die gemessenen Daten in der Einheit Kraftfahrzeuge pro Stunde [Kfz/h] angegeben. Dabei wird üblicherweise auch eine Unterscheidung der Kraftfahrzeugklassen (Pkw und Lkw) vorgenommen.

Die Verkehrsstärke lässt sich in Aus- und Einfahrten mehreren Kraftfahrzeugströmen zuordnen. Es wird zwischen der Verkehrsstärke in der Hauptfahrbahn und der Verkehrsstärke in der Aus- bzw. Einfahrt unterschieden. Im Einzelnen lassen sich in Aus- und Einfahrten folgende Kraftfahrzeugströme nennen (vgl. Anhang 2.1 und 2.2):

- Verkehrsstärke im ausfahrenden (q_A) bzw. einfahrenden (q_E) Kraftfahrzeugstrom
- Verkehrsstärke in der Hauptfahrbahn oberhalb der Aus- bzw. Einfahrt (q_H)
- Verkehrsstärke in der Hauptfahrbahn unterhalb der Aus- bzw. Einfahrt (q_{HU})
- Summe der einfahrenden Kraftfahrzeuge und der Kraftfahrzeuge im rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn oberhalb der Einfahrt (Einfädelungsverkehrsstärke q_M)

Die **Geschwindigkeit** v ist neben der Verkehrsstärke die wichtigste lokale Kenngröße. Sie wird in der Praxis häufig durch entsprechende Erfassungsmethoden (z. B. Radarsensoren) direkt erfasst. Der Mittelwert der Einzelgeschwindigkeiten in einem Zeitintervall Δt ergibt die mittlere lokale Geschwindigkeit \bar{v}_l in der Einheit Kilometer pro Stunde [km/h]. In den verschiedenen Kraftfahrzeugströmen innerhalb von Aus- und Einfahrbereichen treten aufgrund der unterschiedlichen Entwurfs Elemente unterschiedliche Geschwindigkeiten auf.

Die **Verkehrsdichte** k ist definiert als die Anzahl n der Kraftfahrzeuge die sich zu einem festen Zeitpunkt t auf einem Wegintervall der Länge Δx befindet. Die Verkehrsdichte wird in der Einheit Kraftfahrzeuge pro Kilometer [Kfz/km] beschrieben.

2.3 Zusammenhänge zwischen den Kenngrößen des Verkehrsablaufs

Die Zusammenhänge zwischen den Kenngrößen des Verkehrsablaufs werden durch das Fundamentaldiagramm verdeutlicht. Das Fundamentaldiagramm stellt den Zusammenhang zwischen der lokalen Größe Verkehrsstärke q und den momentanen Größen Verkehrsdichte k und mittlere momentane Geschwindigkeit \bar{v}_m dar. Bei über die Strecke stationärem Verkehrsfluss gilt die Gleichung 2.1.

$$q = \bar{v}_m \cdot k \quad (\text{Gl. 2.1})$$

Zur Analyse des Verkehrsablaufs liegen in der Regel lokal erfasste Daten vor. Die momentanen Kenngrößen \bar{v}_m und k sind dann nicht direkt bestimmbar. Für die Darstellung im Fundamentaldiagramm werden daher homogene und stationäre Bedingungen vorausgesetzt. Homogen bedeutet, dass die Verteilung der Kenngrößen unabhängig vom Weg ist. Stationäre Bedingungen liegen vor, wenn die Verteilung der Kenngrößen unabhängig von der Zeit ist. Homogene und stationäre Bedingungen können angenommen werden, wenn keine Unstetigkeiten in der Trassierung, in der Verkehrsbelastung und -zusammensetzung sowie in den Steuerungsbedingungen (z. B. Geschwindigkeitsbeschränkungen) vorliegen. In der Praxis wird bei der Ermittlung von Fundamentaldiagrammen auf den Nachweis der Stationarität innerhalb der Bezugsintervalle verzichtet und es werden konstante Bezugsintervalle verwendet. Die Wahl des Bezugsintervalls ist von der verkehrstechnischen Verwendung abhängig (vgl. Ziffer 4.3).

Das Fundamentaldiagramm kann in unterschiedlichen Abhängigkeiten dargestellt werden. Der grundsätzliche Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke, der Verkehrsdichte und der mittleren momentanen Geschwindigkeit ist im Bild 2.1 dargestellt.

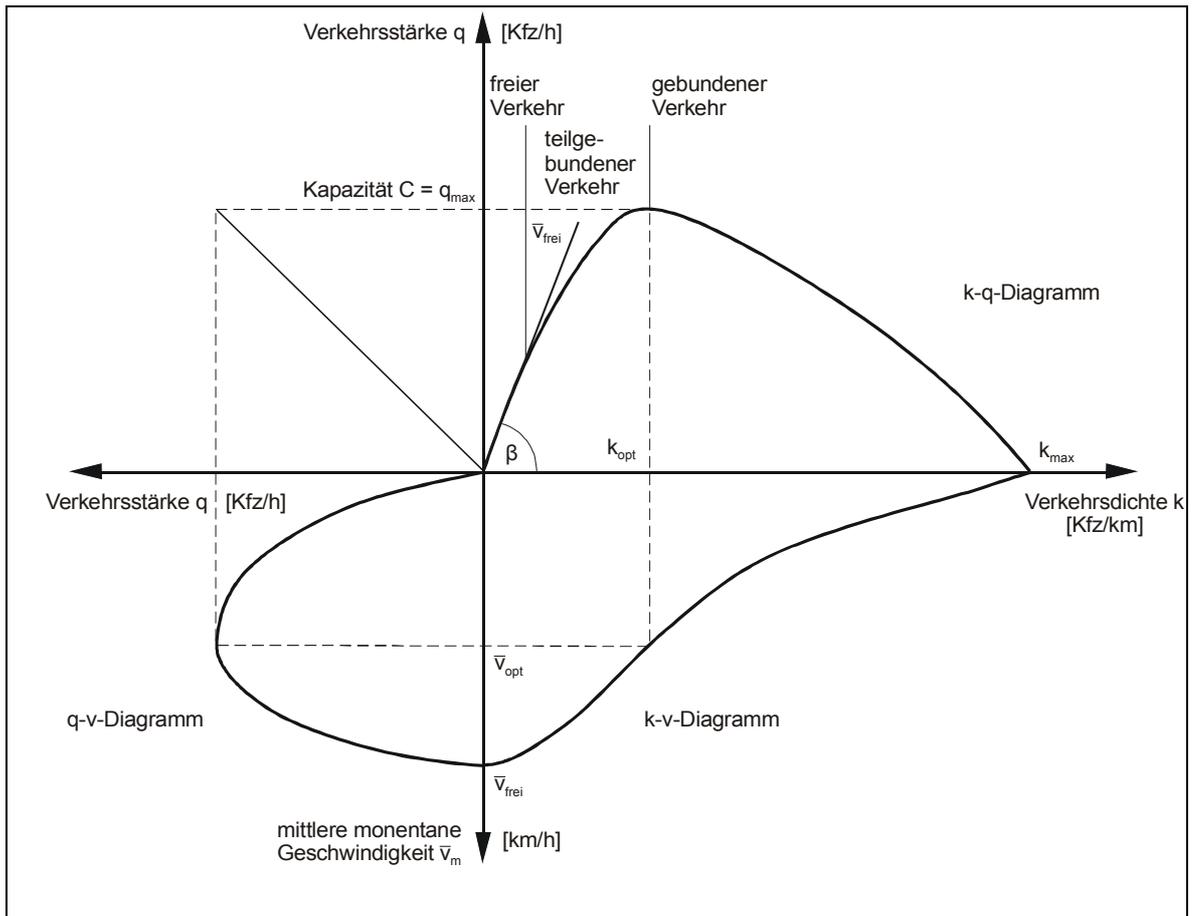


Bild 2.1: Theoretischer Zusammenhang zwischen Verkehrsstärke, Verkehrsdichte und mittlerer momentaner Geschwindigkeit (Fundamentaldiagramm)

Die Form des Fundamentaldiagramms ist von folgenden charakteristischen Parametern abhängig:

- freie Geschwindigkeit v_{max} (v_f)
- Kapazität C (q_{max})
- optimale Geschwindigkeit v_0 bei Kapazität
- optimale Verkehrsdichte k_0 bei Kapazität

Die **Kapazität C** ist definiert als die größte Verkehrsstärke q_{max} , die ein Kraftfahrzeugstrom in einem Zeitintervall Δt bei gegebenen Fahrbahn- und Verkehrsbedingungen in dem für die Funktionsfähigkeit der Verkehrsanlage entscheidenden Querschnitt erreichen kann [25]. Die Fahrbahnbedingungen beschreiben die entwurfstechnischen und betrieblichen Gegebenheiten (z. B. Anzahl der Fahrstreifen, Längsneigung und Steuerungsbedingungen), während die Verkehrsbedingungen Auskunft über die Zusammensetzung des Kraftfahrzeugstroms und das Fahrverhalten geben. Diese Definition der Kapazität

entspricht der Erkenntnis, dass die Kapazität einer Verkehrsanlage ein fester Wert ist. In Ziffer 3.7 wird auf diese Problematik vertiefend eingegangen.

Der durch das Fundamentaldiagramm beschriebene Verkehrsablauf kann in unterschiedliche Verkehrszustände eingeteilt werden. KIM und KELLER [39] definieren ausgehend von einer dynamischen Betrachtung und dem dabei beobachteten Hysterese-Phänomen folgende Verkehrszustände:

- Freier Verkehr: Die Verkehrsnachfrage ist gering und der Verkehrszustand ist stabil. Die Geschwindigkeiten zwischen den einzelnen Fahrstreifen sind unterschiedlich.
- Teilgebundener Verkehr: Die Verkehrsnachfrage steigt und die Interaktionen zwischen den Kraftfahrzeugen nehmen zu, während die Geschwindigkeiten zwischen den einzelnen Fahrstreifen immer noch unterschiedlich sind. Der Verkehrszustand ist meta-stabil.
- Synchroner Verkehr: Bei synchronem (gleichlaufendem) Verkehr sind die Geschwindigkeiten in allen Fahrstreifen gleich, aber etwas niedriger als beim freien und beim teilgebundenen Verkehr. Die Verkehrsnachfrage befindet sich auf dem gleichen Niveau wie beim teilgebundenen Verkehr. Der Verkehrszustand ist meta-stabil.
- Stockender Verkehr: Die Verkehrsnachfrage ist relativ hoch und verändert sich wenig. Die Geschwindigkeiten sind niedrig und unterliegen starken Schwankungen. Die einzelnen Fahrstreifen weisen jedoch kaum Unterschiede auf. Der Verkehrszustand ist instabil.
- Gestauter Verkehr: Die Verkehrsnachfrage ist sehr hoch und die Geschwindigkeiten sind sehr niedrig. Der Verkehrszustand ist instabil, sodass kleine Störungen den Verkehrszustand verändern können.
- Stehender Verkehr: Der Verkehr kommt zum Stillstand. Die maximale Verkehrsdichte k_{\max} wird erreicht.

Im Bild 2.2 werden die zuvor beschriebenen Verkehrszustände grafisch dargestellt.

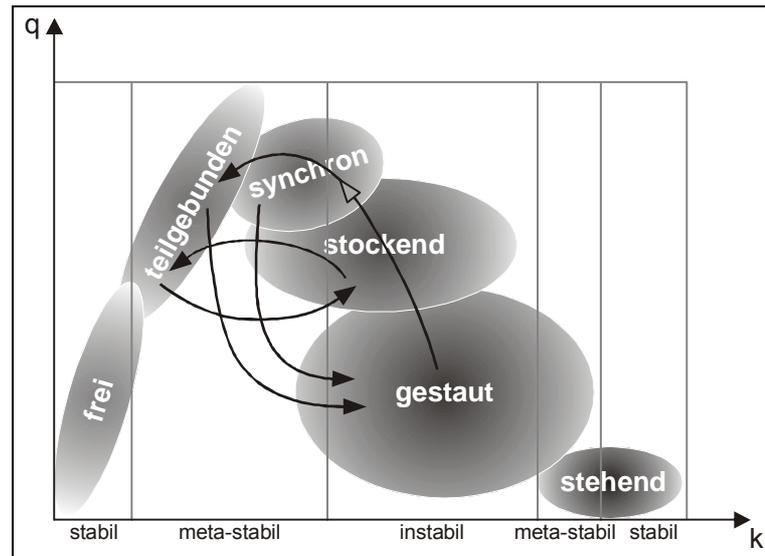


Bild 2.2: Übergänge zwischen den Verkehrszuständen im Fundamentaldiagramm [39]

Für die Zuordnung von Messwerten zu den genannten Verkehrszuständen ist zu beachten, dass eine Interpretation der Messwerten nur aus ihrer Entstehungsgeschichte heraus erfolgen kann. Das statische Fundamentaldiagramm allein kann die Dynamik der einzelnen Verkehrszustände nicht ausreichend abbilden.

Zwischen den Verkehrszuständen können typische Arten von Übergängen unterschieden werden. KIM und KELLER beobachteten in ihren Untersuchungen Übergänge von teilgebundenem zu gestautem Verkehr, von teilgebundenem zu stockendem Verkehr, von synchronem zu gestautem Verkehr und wiederholte Übergänge von teilgebundenem zu gestautem Verkehr (vgl. Bild 2.2).

3 Literaturanalyse

3.1 Überblick

Planfreie Knotenpunkte bestehen aus einzelnen Teilbereichen, die räumlich aufeinander folgen. Als Teilbereiche innerhalb planfreier Knotenpunkte werden Hauptfahrbahnen, Ausfahrbereiche, Verflechtungsbereiche, Einfahrbereiche und Verbindungsrampen unterschieden. Ausfahrten, Verflechtungsbereiche und Einfahrten können prinzipiell an Hauptfahrbahnen und an Verteilerfahrbahnen bzw. in Verbindungsrampen angeordnet sein. Die vorliegende Arbeit befasst sich ausschließlich mit Aus- und Einfahrten an Hauptfahrbahnen.

Im Rahmen der Literaturanalyse wird zunächst kurz auf die aktuellen Richtlinien und Entwurfshinweise und deren Entwicklung eingegangen. Anschließend wird ein Überblick über zurückliegende und aktuelle Untersuchungen über die Kapazität und die Bemessung von Aus- und Einfahrten gegeben. Danach werden die zurzeit vorhandenen Bemessungsverfahren für die Bemessung von Aus- und Einfahrten beschrieben. Neben den im deutschen Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) [24] beschriebenen Bemessungsverfahren, die im Mittelpunkt der Betrachtung stehen, wird auch das Verfahren des amerikanischen Highway Capacity Manual (HCM) [75] vorgestellt.

Ein weiterer Schwerpunkt der Literaturanalyse sind verschiedene Verfahren zur Schätzung der Kapazität auf Autobahnen. Auch mittels makroskopischer Verkehrsflussmodelle können Aussagen bezüglich der Kapazität getroffen werden. Aus diesem Grund werden abschließend aktuelle Erkenntnisse über die Kapazität und über die makroskopischen Verkehrsflussmodelle dokumentiert.

3.2 Entwicklung der deutschen Richtlinien und Entwurfshinweise

Bereits 1931 wurden von UHFELDER [79] erste Entwürfe von Autobahnknotenpunkten veröffentlicht. Die Ausführungen enthalten Überlegungen zu möglichen Typen von Knotenpunkten. Wenige Jahre später erarbeitete KOESTER [41] umfassende Grundsätze zur Gestaltung planfreier Knotenpunkte. Mit dem Wiederbeginn des Autobahnbaus in den fünfziger Jahren wurde die Frage nach der zweckmäßigen Gestaltung der Knotenpunkte wieder aufgegriffen. KORTE [40] beschäftigte sich in einer Veröffentlichung aus dem Jahre 1960 mit der baulichen Gestaltung und der Festlegung der Entwurfs-elemente von planfreien Knotenpunkten.

In einer Arbeit von SCHNÜLL [61] aus dem Jahre 1970 wurde die Gestaltung von Ausfahrten in planfreien Knotenpunkten untersucht. SCHNÜLL kommt zu dem Ergebnis,

dass lange parallele Ausfädelungstreifen zweckmäßiger sind als Ausfahrten ohne parallelen Ausfädelungstreifen (Direktausfahrten), weil sie den Verkehrsablauf innerhalb und oberhalb von Ausfahrbereichen sowie die Kapazität verbessern. Empfehlungen für die Ausbildung von Einfahrten gibt KRASSER [42] in einer Veröffentlichung aus dem Jahre 1974. KRASSER geht dabei auf die Art der Einfädelungstreifen (parallel oder direkt), auf die Länge der Einfahrtöffnung, auf die Breite des Einfädelungstreifens und auf die Linienführung ein. Schließlich werden Musterentwürfe für die Ausbildung von Einfahrten entwickelt.

Erst 1976 wurde mit den RAL-K-2 [20] eine bundeseinheitliche Richtlinie durch die Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen veröffentlicht. Fortan war es möglich, Aus- und Einfahrten sowie Verflechtungsstrecken an Straßen der Kategorien-Gruppe A durch die Anwendung standardisierter Typen weitgehend einheitlich auszubilden.

In einer Forschungsarbeit aus dem Jahre 1977 beschäftigte sich TRAPP [77] mit der Gestaltung und der Kapazität von Autobahnknotenpunkten. TRAPP traf in seiner Arbeit ergänzende und zum Teil auch weitergehende Aussagen zu den RAL-K-2. MEINEFELD [49] sowie MEINEFELD und SCHNÜLL [50] beschäftigten sich Mitte der siebziger bzw. Anfang der achtziger Jahre mit der Untersuchung des Verkehrsablaufs an Ausfahrten mit Fahrstreifensubtraktion. MEINEFELD untersuchte in einer Forschungsarbeit aus dem Jahre 1976 [49] den Verkehrsablauf im Ausfahrbereich einer Ausfahrt mit Fahrstreifensubtraktion (vgl. Bild 3.1) unter den Aspekten Sicherheit und Kapazität. MEINEFELD und SCHNÜLL [50] überprüften in ihrer Arbeit aus dem Jahre 1983 den Verkehrsablauf im Ausfahrbereich einer Ausfahrt mit Fahrstreifensubtraktion des Ausfahrtstyps A 4 nach den RAL-K-2 1976 (vgl. Bild 3.2). Diese Untersuchungen erlaubten eine vergleichende Betrachtung mit der von MEINEFELD untersuchten Variante 1. Sowohl bei der Variante 1, als auch bei der Variante 2 wurde eine ungleichmäßige Belegung der Fahrstreifen in der Ausfahrrampe in Höhe der Inselfspitze festgestellt. Auch im Hinblick auf die Sicherheit wiesen beide Varianten Nachteile auf. Um die Nachteile beider Varianten zu kompensieren wird in der Forschungsarbeit von MEINEFELD und SCHNÜLL eine dritte Variante vorgeschlagen, die im Jahre 1993 als Ausfahrtstyp A 5 in die AH-RAL-K-2 [21] übernommen wurde. Zusammenfassend wird betont, dass die Kapazität von Ausfahrten mit Fahrstreifensubtraktion vor allem von der Einheitlichkeit des Entwurfs und der Wegweisung sowie deren Abstimmung aufeinander abhängt.

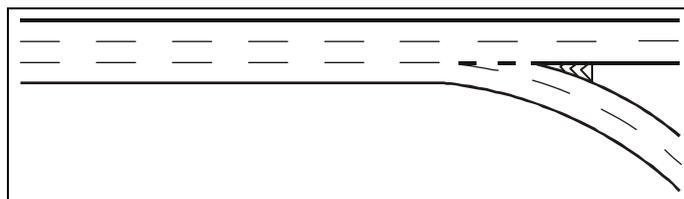


Bild 3.1: Zweistreifige Ausfahrt mit Fahrstreifensubtraktion, Standard vor 1977 [49]

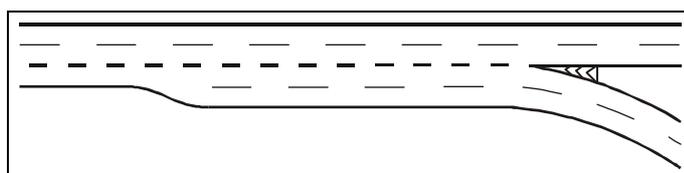


Bild 3.2: Zweistreifige Ausfahrt (Ausfahrtstyp A 4) nach den RAL-K-2 [20]

3.3 Aktuelle Richtlinien und Entwurfshinweise in Deutschland

Seit 1976 sind die RAL-K-2 [20] das deutsche Regelwerk für den Neu-, Um- und Ausbau von planfreien Knotenpunkten an Straßen der Kategoriengruppe A. Im Jahre 1993 wurden die RAL-K-2 durch die AH-RAL-K-2 [21] ergänzt. Die RAL-K-2 und die AH-RAL-K-2 gelten als Entwurfsrichtlinien, da sie genaue Angaben zur Geometrie der Knotenpunktelemente beinhalten.

Für **Ausfahrten** an Hauptfahrbahnen der Kategoriengruppe B sind grundsätzlich alle Ausfahrtstypen der RAL-K-2 analog und modifiziert einsetzbar. Nach den geltenden RAL-K-2-B werden sechs Ausfahrtstypen (A 1 bis A 6) an Hauptfahrbahnen unterschieden. Beim Ausfahrtstyp A 6, der in den RAL-K-2 nicht beschrieben wird, handelt es sich um eine Fahrstreifensubtraktion (vgl. Bild 3.3).

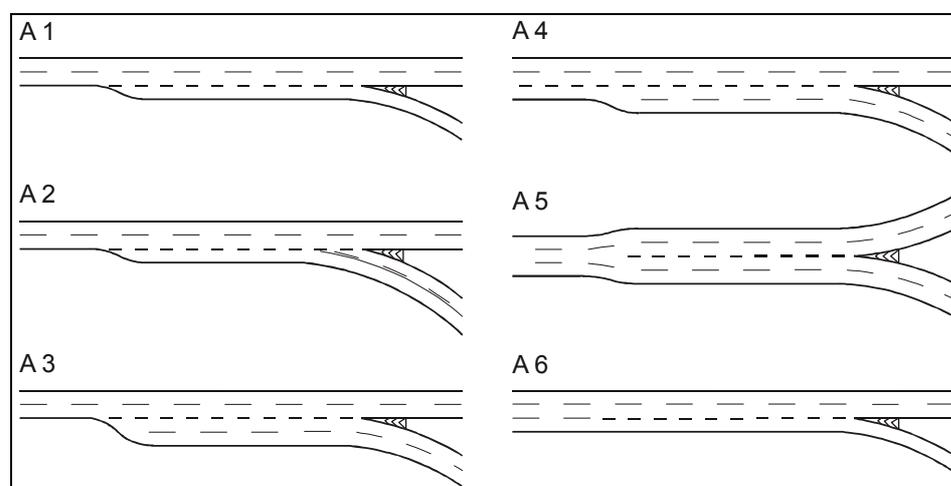


Bild 3.3: Ausfahrtstypen an Hauptfahrbahnen [20][21][22]

In den RAL-K-2 und in den AH-RAL-K-2 werden die im Folgenden beschriebenen Einsatzgrenzen für die im Bild 3.3 dargestellten Ausfahrttypen genannt. Die einstreifige Ausfahrt mit einfachem Ausfädelungstreifen (Ausfahrttyp A 1) stellt für Anschlussstellen die Standardlösung dar. Die zweistreifige Ausfahrt mit einfachem Ausfädelungstreifen (Ausfahrttyp A 2) ist anzuwenden, wenn in der sich anschließenden Verbindungsrampe ein zweistreifiger Querschnitt notwendig ist [20]. Die zweistreifige Ausfahrt mit doppeltem Ausfädelungstreifen (Ausfahrttyp A 3) ist gemäß den RAL-K-2 zweckmäßig, wenn aus Belastungsgründen ein zweistreifiger Rampenquerschnitt notwendig ist, jedoch die Anzahl der Fahrstreifen in der Hauptfahrbahn erhalten bleiben muss. Demgegenüber ist die zweistreifige Ausfahrt mit Fahrstreifenabstraktion (Ausfahrttyp A 4) zu wählen, wenn die Anzahl der Fahrstreifen in der Hauptfahrbahn reduziert werden kann. Die Ausfahrt mit einer Abstraktion von zwei Fahrstreifen (Ausfahrttyp A 5) ist dem Ausfahrttyp A 4 vorzuziehen, wenn der ausfahrende Fahrzeugstrom eine ähnliche Stärke aufweist wie der Fahrzeugstrom in der Hauptfahrbahn [21].

In den derzeit gültigen Richtlinien [20][21] werden für **Einfahrten** an Hauptfahrbahnen an Straßen der Kategoriengruppe A sowohl entwurfstechnische Grundsätze als auch zulässige Verkehrsstärken für die unterschiedlichen Einfahrtstypen angegeben. Neben den Verkehrsstärken in den Einfahrrampen sind dabei die Verkehrsstärken in den Hauptfahrbahnen von entscheidender Bedeutung [20]. Insgesamt werden fünf verschiedene Einfahrtstypen unterschieden (vgl. Bild 3.4).

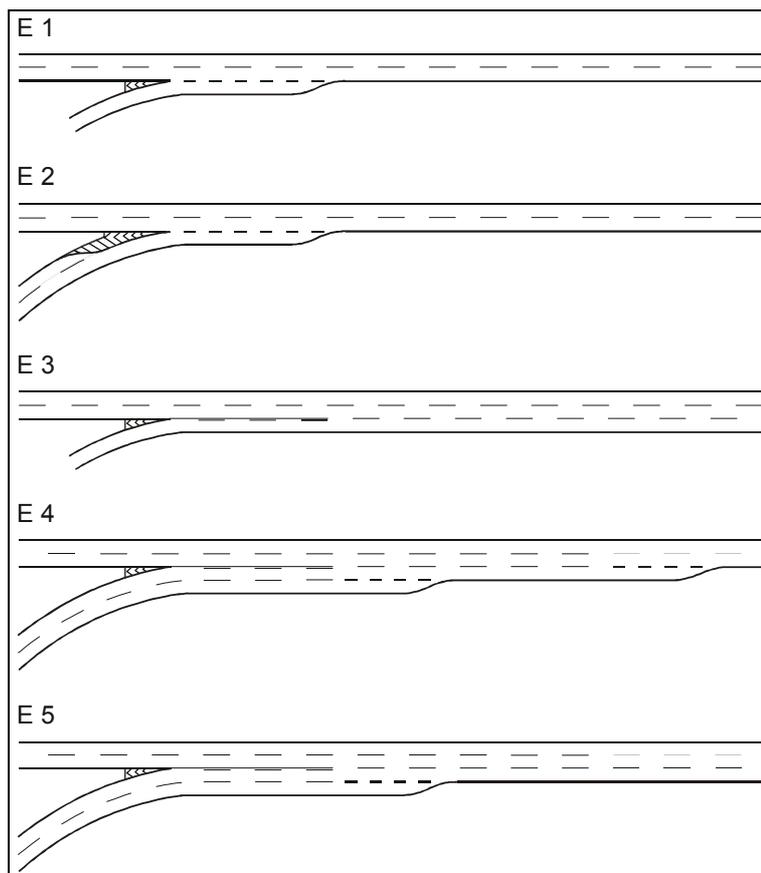


Bild 3.4: Einfahrtstypen E 1 bis E 5 an Hauptfahrbahnen [20]

Die einstreifige Einfahrt mit einfachem Einfädelungsstreifen (Einfahrtstyp E 1) stellt für Anschlussstellen die Standardlösung dar. Die verengte Einfahrt mit einfachem Einfädelungsstreifen (Einfahrtstyp E 2) soll gemäß den RAL-K-2 [20] angewendet werden, wenn eine zweistreifige Verbindungsrampe notwendig ist. Dabei wird der linke Fahrstreifen der Verbindungsrampe kurz vor dem Erreichen der Inself Spitze mit einer Sperrfläche eingezogen. Die einstreifige Einfahrt mit Fahrstreifenaddition (Einfahrtstyp E 3) soll angewendet werden, wenn aufgrund einer hohen Verkehrsstärke in der Hauptfahrbahn der Einfädelungsvorgang mit den Einfahrtstypen E 1 und E 2 nicht abgewickelt werden kann. Wenn aus Belastungsgründen eine zweistreifige Verbindungsrampe notwendig ist, ist eine zweistreifige Einfahrt zu wählen. Ist dabei aus Belastungsgründen das Weiterführen einer dreistreifigen Hauptfahrbahn unterhalb der Einfahrt notwendig, so wird der linke Einfädelungsstreifen addiert und der rechte eingezogen (Einfahrtstyp E 5). Ist eine Fahrstreifenaddition nicht notwendig, wird zunächst der rechte Einfädelungsstreifen und anschließend der linke Einfädelungsstreifen eingezogen (Einfahrtstyp E 4).

Zu den aktuellen Richtlinien und Entwurfshinweisen in Deutschland ist abschließend anzumerken, dass die aufgezeigten Einsatzgrenzen mit der Einführung des HBS 2001 ihre Gültigkeit verloren haben. Darüber hinaus findet derzeit eine Überarbeitung der Entwurfsrichtlinien [17][19][20][21][22] statt. Zukünftig wird es ein Regelwerk für den

Entwurf von Autobahnen [62] geben, das die bisherigen sektoralen Entwurfsrichtlinien für den Querschnitt, die Linienführung und die Knotenpunkte ersetzt. Einsatzgrenzen werden für die einzelnen Aus- und Einfahrttypen darin nicht mehr angegeben sein.

3.4 Untersuchungen über die Bemessung von Ausfahrten

Im Jahre 1969 untersuchte BREUER [8] mit Hilfe von Fahrstreifenbelegungsmessungen einstreifige Ausfahrten mit und ohne parallelen Ausfädelungstreifen. Unter Verwendung eines nichtlinearen Ansatzes ermittelte er die zulässige Belastung des rechten Fahrstreifens der Hauptfahrbahn am Beginn des Ausfahrbereichs. Darüber hinaus führte BREUER Geschwindigkeitsmessungen durch, um die Kapazität der Ausfahrten zu ermitteln. Der Grundgedanke war, dass die mittlere Geschwindigkeit aller im rechten Fahrstreifen fahrenden Fahrzeuge am Beginn des Ausfahrbereichs bestimmte Grenzwerte nicht unterschreiten sollte. Diesen Grenzwerten wurde dann die zu erwartende mittlere Geschwindigkeit gegenübergestellt. Auch für die Ermittlung der Kapazität einer zweistreifigen Ausfahrt stellte BREUER in seiner Forschungsarbeit eine Regressionsgleichung auf. Der Ansatz von BREUER, die Kapazität anhand der zulässigen Belastung und der mittleren Geschwindigkeit aller im rechten Fahrstreifen fahrenden Fahrzeuge am Beginn des Ausfahrbereichs zu ermitteln, muss vor allem vor dem Hintergrund gesehen werden, dass in der Untersuchung eine große Anzahl von Ausfahrten ohne parallelen Ausfädelungstreifen betrachtet wurde. Eine Beeinflussung der Fahrzeuge im rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn durch die ausfahrenden Kraftfahrzeuge ist bei dieser Bauform ausgeprägter ist als bei einer Ausfahrt mit parallelem Ausfädelungstreifen, die dem heutigen Standard entspricht.

In einer Forschungsarbeit von SCHNÜLL, HOFFMANN und IRZIK [64] aus dem Jahre 2000 wurden die Grundlagen für die Entwicklung eines Verfahrens zur Ermittlung der Kapazität und der Qualität des Verkehrsablaufs in zweistreifigen Ausfahrten an Hauptfahrbahnen in planfreien Knotenpunkten geschaffen. Im Rahmen des Projekts wurden umfangreiche empirische Untersuchungen in ausgewählten zweistreifigen Ausfahrten in den Ballungsräumen Hannover und München durchgeführt.

Der Schwerpunkt der Arbeit von SCHNÜLL, HOFFMANN und IRZIK lag in der Untersuchung des Ausfahrttyps A 2. Es wurde vermutet, dass aufgrund einer ungleichen Auslastung der beiden Fahrstreifen in der Ausfahrt die in den aktuellen Richtlinien und Entwurfshinweisen angegebene Kapazität oftmals nicht erreicht wird. Für die Ausfahrttypen A 3 und A 4 stand im Rahmen des Forschungsprojekts nur eine kleine Datenbasis zur Verfügung. Somit konnten für diese Ausfahrttypen keine statistisch abgesicherten Aussagen getroffen werden. Anhand der ermittelten Tendenzen wurden dennoch auch für diese Ausfahrttypen Bemessungsgrundlagen entwickelt. Darüber hinaus wird in der Forschungsarbeit belegt, dass mit Hilfe betrieblicher Maßnahmen eine ausgeglichene Fahrstreifenbelegung in der

Ausfahrt erreicht werden kann. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse wurde ein Verfahren zur Ermittlung der Kapazität und der Qualität des Verkehrsablaufs in Ausfahrten entwickelt. Die Ergebnisse der Arbeit von SCHNÜLL, HOFFMANN und IRZIK flossen als wesentlicher Bestandteil in das HBS 2001 ein. Der Ausfahrtstyp A 5 wurde im Rahmen des Forschungsprojekts nicht betrachtet und wird somit im HBS 2001 nicht aufgeführt.

Abschließend geben SCHNÜLL, HOFFMANN und IRZIK Empfehlungen für die Erarbeitung künftiger Richtlinien und Entwurfsempfehlungen. Kern dieser Empfehlungen ist die Forderung, dass aufgrund der Probleme, die beim Ausfahrtstyp A 2 beobachtet wurden, der Ausfahrtstyp A 3 der Regelfall für den Entwurf von zweistreifigen Ausfahrten werden sollte.

In der ausländischen Literatur sind nur wenige Angaben über die Ermittlung der Kapazität und der Qualität des Verkehrsablaufs in Ausfahrten in planfreien Knotenpunkten zu finden. Die Ausnahme bilden die im Zusammenhang mit der Entwicklung des amerikanischen Highway Capacity Manual durchgeführten Untersuchungen. Diese Untersuchungen befassen sich ebenfalls überwiegend mit der Frage nach der zweckmäßigen Ausbildung der Ausfahrt. Zur Beantwortung der Fragen nach der Qualität des Verkehrsablaufs wird in den meisten Ländern das amerikanische Highway Capacity Manual in modifizierter Form herangezogen.

3.5 Untersuchungen über die Bemessung von Einfahrten

Ziel einer Arbeit von BREUER [8] aus dem Jahre 1969 war es, für eine gegebene Verkehrsbelastung Angaben über den zu erwartenden Verkehrsablauf machen zu können. Mittels empirisch gewonnener Daten wurde insbesondere die Fahrstreifenbelegung im Bereich von Autobahnknotenpunkten untersucht (vgl. Ziff. 3.4). BREUER ermittelte eine Funktion der Verkehrsstärke zur Ermittlung der Fahrstreifenbelegung oberhalb der Einfahrt in Abhängigkeit vom durchfahrenden und einfahrenden Kraftfahrzeugverkehr. Weiterhin wurde aus den gewonnenen Angaben über die Größe der Zeitlücke im Teilstrom im rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn, über die Geschwindigkeit der in den Einfahrtvorgang eingebundenen Fahrzeuge und über die Annahme oder Ablehnung einer Zeitlücke ein „Einfahrtgesetz“ entwickelt. Eine wesentliche Aussage dieses Gesetzes ist, dass die Größe der zur Einfahrt benötigten Zeitlücke mit zunehmender Geschwindigkeit des einfahrenden Fahrzeugs stark abnimmt. Die Einfahrtgeschwindigkeit ist nach BREUER somit der entscheidende Faktor zur Ermittlung der Kapazität unterschiedlich ausgebaute Einfahrtrampen. Ein Ergebnis der Arbeit sind Diagramme zur Bestimmung der Kapazität von Einfahrten.

Im Rahmen eines von VAUBEL [80] aus dem Jahre 1974 durchgeführten Forschungsprojekts wurden mittels einer auf theoretischen Ansätzen basierenden Simulation

Kapazitätsuntersuchungen für verschiedene Bau- und Betriebsformen von Einfahrten durchgeführt. Neben quantifizierenden Aussagen konnten auch qualitative Erkenntnisse über den Verkehrsablauf durch die Simulation gewonnen werden. Dabei stellte sich heraus, dass das Fahrstreifenwechselfverhalten eine zentrale Bedeutung für den Verkehrsablauf in Einfahrten hat. Die für einen Fahrstreifenwechsel benötigte Zeitlücke steigt nicht stetig an, wenn die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen dem betrachteten Fahrzeug im Einfädelsstreifen und dem nachfolgenden Fahrzeug im rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn zunimmt.

TRAPP [76] untersuchte im Jahre 1974 die baulichen und verkehrlichen Einflüsse auf die Qualität des Verkehrsablaufs im Bereich von Einfahrten durch empirische Untersuchungen zum Verkehrsablauf und formulierte Empfehlungen für die RAL-K-2. Die Ergebnisse der Untersuchung flossen als wesentlicher Bestandteil in die RAL-K-2 ein.

Für die Bemessung von Einfahrten spielt die Verteilung des Verkehrs in der Hauptfahrbahn eine bedeutende Rolle. Der Fahrstreifenbelegung von mehrstreifigen Richtungsfahrbahnen widmeten sich in der Vergangenheit zahlreiche Forschungsarbeiten. SPARMANN [68] analysierte im Jahre 1978 die Fahrstreifenwechselfvorgänge auf einer zweistreifigen Richtungsfahrbahn. Das Bild 3.5 zeigt den im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Auslastungsgrad a des rechten und des linken Fahrstreifens in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke in der Hauptfahrbahn. Auch BUSCH [14] beobachtete in einer Forschungsarbeit aus dem Jahre 1984 einen eindeutigen Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke und der Auslastung der Fahrstreifen. Durch die Analyse der Fahrstreifenbelegung einer dreistreifigen Richtungsfahrbahn erkannte BUSCH außerdem, dass bei niedrigen und insbesondere bei sehr hohen Verkehrsstärken ein extremes Ungleichgewicht in der Fahrstreifenaufteilung besteht. Die von BUSCH ermittelten Zusammenhänge zwischen der Fahrstreifenbelegung und der Verkehrsstärke sind im Bild 3.6 dargestellt. Weitere Untersuchungen widmeten sich den Auswirkungen unterschiedlicher Fahrvorschriften auf die Fahrstreifenbelegung von Richtungsfahrbahnen [31][45][81].

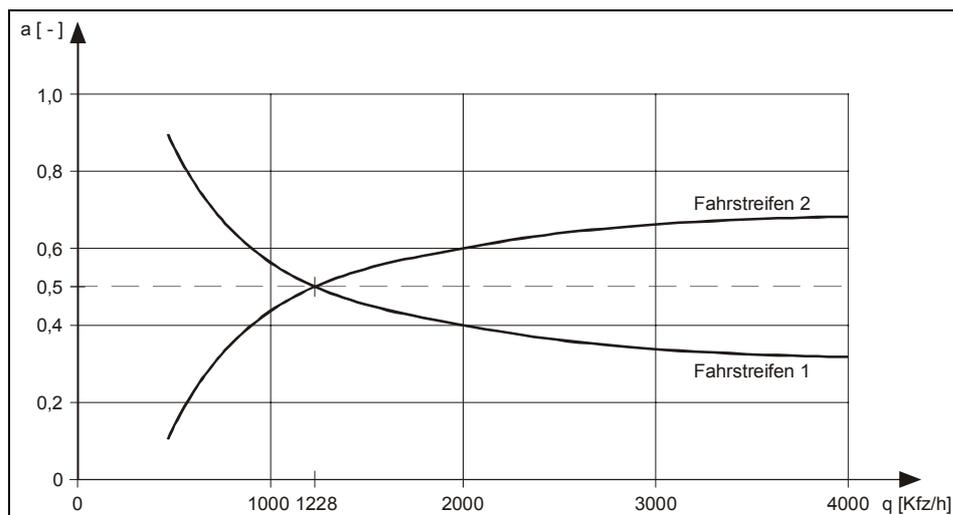


Bild 3.5: Abhängigkeit der Fahrstreifenaufteilung von der Verkehrsstärke (1-Minuten-Intervall), nach SPARMANN [68]

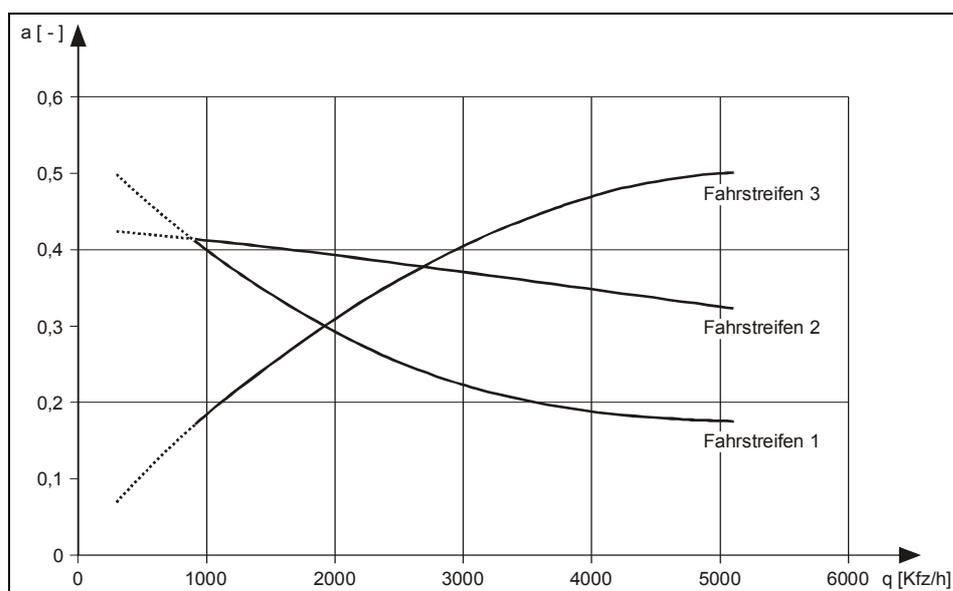


Bild 3.6: Mittlere Fahrstreifenaufteilung in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke (1-Minuten-Intervalle) nach BUSCH [14]

In einer Forschungsarbeit von THEIS [70] aus dem Jahre 1997 wurden empirische Untersuchungen zum Verkehrsablauf zur Ermittlung der Fahrstreifenbelegung innerhalb von Anschlussstellen durchgeführt. THEIS kommt zu dem Ergebnis, dass oberhalb von Einfahrten eine auf den linken Fahrstreifen verschobene Fahrstreifenbelegung im Vergleich zur freien Strecke besteht. Dies wird damit erklärt, dass einige Kraftfahrzeuge an der Ausfahrt den rechten Fahrstreifen verlassen haben. Darüber hinaus wurde beobachtet, dass die Kraftfahrzeuge auf dem rechten Fahrstreifen oberhalb der Einfahrt gemäß §7 StVO [13] auf den linken Fahrstreifen wechseln, um den einfahrenden Kraftfahrzeugen das Einfädeln zu erleichtern.

BRILON und WESTPHAL [9] entwickelten erstmals ein Bemessungsverfahren, das den Nachweis einer ausreichenden Qualität des Verkehrsablaufs von Einfahrten an planfreien Knotenpunkten von Schnellverkehrsstraßen der Kategoriengruppe B gemäß den RAS-N [18] für deutsche Verhältnisse ermöglicht. Das Verfahren basiert auf empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf an 20 Untersuchungsstellen in verschiedenen Städten Deutschlands. Dabei wurde ein möglichst repräsentativer Querschnitt der vorhandenen Einfahrtstypen in die Untersuchung aufgenommen. Den größten Anteil nahm dabei der Einfahrtstyp E 1 / E 2 an zweistreifigen Hauptfahrbahnen ein. Die Einfahrtstypen E 4 und E 5 wurden gemäß ihrem Vorkommen nur in geringem Umfang untersucht. Der Einfahrtstyp E 3 tritt an Schnellverkehrsstraßen hauptsächlich in Verbindung mit einer nachfolgenden Ausfahrt auf. Dies entspricht einer Verflechtungsstrecke, die nicht Gegenstand der Untersuchung war. In allen untersuchten Einfahrten war die Geschwindigkeit auf 80 km/h oder 100 km/h beschränkt. Dies wird als ein wesentlicher Unterschied zwischen Schnellverkehrsstraßen der Kategoriengruppe B und Autobahnen der Kategoriengruppe A angesehen.

Auf der Grundlage des erhobenen Datenmaterials wurden verschiedene Analysen durchgeführt. Zunächst wurde die Verteilung des Verkehrs auf die Fahrstreifen der Hauptfahrbahn untersucht. Die bisherigen Untersuchungen über die Fahrstreifenbelegung bezogen sich auf die freie Strecke, sodass allein die Verkehrsstärke in der Hauptfahrbahn als Einflusskriterium berücksichtigt wird (vgl. Bild 3.5 und Bild 3.6). BRILON und WESTPHAL stellten fest, dass die Auslastung des rechten Fahrstreifens oberhalb einer Einfahrt sowohl von der Verkehrsstärke in der Hauptfahrbahn, als auch von der Verkehrsstärke in der Einfahrt beeinflusst wird. Einen deutlichen Einfluss hat in diesem Zusammenhang auch der Anteil des Schwerverkehrs im einfahrenden Kraftfahrzeugstrom. Es wird festgestellt, dass mit zunehmendem Anteil des Schwerverkehrs im einfahrenden Kraftfahrzeugstrom der Anteil der Fahrzeuge im rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn abnimmt.

Bei der Analyse der Zusammenhänge zwischen den mittleren Geschwindigkeiten und den Verkehrsstärken erwies sich der Zusammenhang zwischen der mittleren Geschwindigkeit in den zusammengeführten Kraftfahrzeugströmen, der Verkehrsstärke im rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn und die Verkehrsstärke des einfahrenden Kraftfahrzeugstroms als am besten geeignet zur Beurteilung der Qualität des Verkehrsablaufs. Ein Einfluss des Schwerverkehrs auf die Geschwindigkeit konnte angesichts der örtlich zulässigen Geschwindigkeiten nicht festgestellt werden.

Ein weiteres Ziel der Untersuchung von BRILON und WESTPHAL war es, den Einfluss der Länge des Einfädelungstreifens auf die Kapazität der Einfahrt zu ermitteln. Dabei stellte sich heraus, dass die Kapazität nicht von der Länge des Einfädelungstreifens abhängig ist, wenn dieser eine Länge zwischen 100 m und 300 m besitzt.

Ein Schwerpunkt der Forschungsarbeit von BRILON und WESTPHAL lag in der Ermittlung der Kapazitäten für die untersuchten Einfahrtstypen. Dafür wurden zahlreiche q-v-Diagramme erstellt und daraus die Kapazitäten ermittelt. Es konnten jedoch nur für den Einfahrtstyp E 1 / E 2 an zwei- und dreistreifigen Hauptfahrbahnen statistisch gesicherte Erkenntnisse formuliert werden.

Abschließend entwickelten BRILON und WESTPHAL ein Bemessungsverfahren zur Ermittlung der Kapazität und der Qualität des Verkehrsablaufs von Einfahrten an planfreien Knotenpunkten. Das Bemessungsverfahren wurde in modifizierter Form in den Entwurf für das Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) [11] aufgenommen.

Von WIRTH und STAUFER wurde im Jahre 2000 [83] das zuvor beschriebene Bemessungsverfahren von BRILON und WESTPHAL ergänzt. Dabei wurde insbesondere der Einfluss des Schwerverkehranteils bei allen im Bemessungsverfahren verwendeten Verkehrsstärken untersucht sowie der Themenbereich „Einfahrten ohne Geschwindigkeitsbeschränkung“ durch Analogieschlüsse und Extrapolation ergänzt. Die Grundlage für die Untersuchungen bildete eine kleine Datenbasis aus Daten von Dauerzählstellen von vier Untersuchungsstellen im Ballungsraum München.

Auch WIRTH und STAUFER untersuchten die Verteilung des Verkehrs in der Hauptfahrbahn oberhalb der Einfahrt. Im Gegensatz zu den Ergebnissen von BRILON und WESTPHAL konnte jedoch kein Hinweis auf einen Zusammenhang zwischen der Belegung des rechten Fahrstreifens der Hauptfahrbahn und der Verkehrsstärke in der Einfahrt sowie deren Schwerverkehranteil festgestellt werden. WIRTH und STAUFER vermuteten, dass dies entweder an der unzureichenden Datenbasis lag oder, dass zwischen den einzelnen von BRILON und WESTPHAL [9] als abhängig vorausgesetzten Größen gar kein signifikanter Zusammenhang besteht. Aus diesem Grund wird von WIRTH und STAUFER in dem überarbeiteten Bemessungsverfahren bei der Modellierung der Verteilung des Verkehrs in der Hauptfahrbahn auf diese beiden Einflussgrößen verzichtet. Es wurde vielmehr angenommen, dass die Verkehrsstärke im rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn allein von der Verkehrsstärke der Hauptfahrbahn oberhalb der Einfahrt abhängt. Die Ergebnisse der Arbeit von WIRTH und STAUFER wurden in das HBS 2001 aufgenommen.

3.6 Vorhandene Bemessungsverfahren für Aus- und Einfahrten

3.6.1 Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen

Aufgrund der amerikanischen Erfahrungen mit dem Highway Capacity Manual [72] wurde Ende der achtziger Jahre auch in Deutschland die Notwendigkeit eines bundesweit einheitlichen Handbuchs für die Kapazitätsbestimmung und die Beurteilung der Qualität des Verkehrsablaufs von Straßenverkehrsanlagen erkannt. Aus diesem Grund wurde von

BRILON, ET. AL. im Jahre 1994 im Rahmen eines Forschungsvorhabens [11] ein erster Entwurf für ein „Deutsches Highway Capacity Manual“ entwickelt. Die Entwürfe für das HBS wurden seitdem kontinuierlich weiterentwickelt (vgl. Ziffer 3.4 und 3.5) und im Jahre 2001 erstmals veröffentlicht [24].

Analog zu dem amerikanischen Highway Capacity Manual [75] wird im HBS 2001 eine sechsstufige Einteilung des Niveaus der Qualität des Verkehrsablaufs vorgenommen. Die planfreien Knotenpunkte werden in dem Bemessungsverfahren in die Teilknotenpunkte Ausfahrt, Verflechtungsbereich und Einfahrt zerlegt. Die verschiedenen Ausbauförmungen der Teilknotenpunkte sind dabei zu unterscheiden (vgl. Bild 3.3 und Bild 3.4). Zu den Vorteilen der sechsstufigen Einteilung gehört vor allem, dass bei der Festlegung von Qualitätsansprüchen der einzelnen Teilknotenpunkte eine Vergleichbarkeit hergestellt wird.

Um die Qualität des Verkehrsablaufs beurteilen zu können, wird ein Maß bestimmt, das die Bewegungsfreiheit bzw. den Grad der Behinderung der Verkehrsteilnehmer beschreibt. Abweichend von den ersten Entwürfen des HBS [11][64] wird in der Fassung aus dem Jahre 2001 nicht mehr die Aus- bzw. Einfädungsgeschwindigkeit als Beurteilungskriterium für die Qualität des Verkehrsablaufs, sondern der Auslastungsgrad verwendet. Da sich das Geschwindigkeitsniveau der aus- und einfahrenden Fahrzeuge in Schleifenrampen signifikant vom Geschwindigkeitsniveau in Tangentialrampen unterscheidet, lässt sich die Qualität des Verkehrsablaufs nicht direkt durch die erreichbare mittlere Geschwindigkeit ausdrücken. Deshalb wird als Maß für die Qualität des Verkehrsablaufs in Aus- und Einfahrten in planfreien Knotenpunkten analog zu den Autobahnabschnitten außerhalb der Knotenpunkte einheitlich der Auslastungsgrad verwendet. Dieser beschreibt die Möglichkeit der Kraftfahrer, sich im Rahmen der rechtlichen und örtlichen Randbedingungen unbehindert bewegen zu können [24].

Der Auslastungsgrad a kann gemäß der Gleichung 3.1 als Quotient aus der Bemessungsverkehrsstärke q_B und der Kapazität C berechnet werden.

$$a = \frac{q_B}{C} \quad (\text{Gl. 3.1})$$

mit:	a	=	Auslastungsgrad	[-]
	q_B	=	Bemessungsverkehrsstärke	[Kfz/h]
	C	=	Kapazität	[Kfz/h]

Für die sechs Stufen der Qualität des Verkehrsablaufs werden im HBS 2001 die in der Tab. 3.1 angegebenen Grenzwerte der Auslastungsgrade angegeben.

Tab. 3.1: Grenzwerte der Auslastungsgrade für die Qualitätsstufen A bis F [24]

Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs (QSV)	Auslastungsgrad a [-]
A	$\leq 0,30$
B	$\leq 0,55$
C	$\leq 0,75$
D	$\leq 0,90$
E	≤ 1
F	-

Da es sich bei dem Bemessungsverfahren um ein Standardverfahren handelt, müssen für die Anwendung die Gültigkeitsgrenzen beachtet werden. Die „Standardsituation“ wird definiert als: normaler Werktagsverkehr, trockene Fahrbahn und klare Sicht. Voraussetzung für die Anwendung des Verfahrens ist die Kenntnis der Bemessungsverkehrsstärke q_B . Deren Aufteilung auf die einzelnen Fahrstreifen muss jedoch nicht bekannt sein.

Als weitere Einflussgrößen gehen

- die Fahrstreifenanzahl,
- der Schwerverkehranteil,
- die Funktion und die Lage des Autobahnabschnitts (außerhalb und innerhalb von Ballungsräumen) und
- die Geschwindigkeitsbeschränkungen in der Hauptfahrbahn

in das Berechnungsverfahren ein.

Das Verfahren für die Bemessung von **Ausfahrten** ist anwendbar an Hauptfahrbahnen für die Ausfahrttypen A 1, A 2, A 3 und A 4 (vgl. Bild 3.3). Die Bezeichnung der Fahrzeugströme in den Ausfahrttypen A 1 bis A 4 ist im Anhang 2.1 dargestellt.

Die Kapazität einer Ausfahrt als Teil eines planfreien Knotenpunkts wird im Bemessungsverfahren durch die Kapazitäten von drei kritischen Bereichen bestimmt:

- maximale Ausfädelungsverkehrsstärke q_M
- Kapazität der Ausfahrrampe q_A

- Kapazität der Hauptfahrbahn unterhalb der Ausfahrt q_{HU} (nur bei Fahrstreifensubtraktion)

Eine Ausfahrt ist nur dann ausreichend leistungsfähig, wenn in allen drei Bereichen die zu erwartenden Verkehrsstärken niedriger sind als die Kapazitäten. Wollen im Extremfall alle Fahrzeuge die Hauptfahrbahn über die Ausfahrt verlassen, wird die Kapazität der Ausfahrrampe maßgebend. Im Bemessungsverfahren werden aus diesem Grund lediglich zulässige Verkehrsstärken für die einzelnen Stufen der Qualität des Verkehrsablaufs für die Ausfahrrampe angegeben (vgl. Tab. 3.2).

Tab. 3.2: Zulässige Verkehrsstärken in der Ausfahrt für die Ausfahrtstypen A 1 bis A 4 [24]

Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs (QSV)	zulässige Verkehrsstärken* in der Ausfahrt $q_{A,zul}$ [Kfz/h]		
	A 1	A 2**	A 3, A 4
A	≤ 450	≤ 770	≤ 900
B	≤ 830	≤ 1400	≤ 1650
C	≤ 1130	≤ 1910	≤ 2250
D	≤ 1350	≤ 2300	≤ 2700
E	≤ 1500	≤ 2550	≤ 3000
F	-	-	-

* Die Werte gelten für Schwerverkehrsanteile bis 20 %. Anderenfalls sind die Angaben um 10 % zu verringern.

** Die Werte werden nur bei richtliniengerechter Beschilderung erreicht.

Die Kapazität der Hauptfahrbahn unterhalb der Ausfahrt hat nur im Falle einer Fahrstreifensubtraktion (Ausfahrtstyp A 4) einen Einfluss auf den Verkehrsablauf. Um die gewünschte Qualität des Verkehrsablaufs in Ausfahrten mit Fahrstreifensubtraktion zu erreichen, darf die Verkehrsstärke in der Hauptfahrbahn unterhalb der Ausfahrt die zulässige Verkehrsstärke nicht überschreiten. Die maximal möglichen Verkehrsstärken für die Hauptfahrbahn können der Tab. 3.3 und der Tab. 3.4 entnommen werden. Dabei wird die Kapazität in Abhängigkeit von der Lage außerhalb oder innerhalb eines Ballungsraums, dem Schwerverkehrsanteil und einer eventuell vorhandenen Geschwindigkeitsbeschränkung in der Hauptfahrbahn bestimmt. Bei dynamischen Geschwindigkeitsbeschränkungen gelten die zulässigen Verkehrsstärken für eine Geschwindigkeitsbeschränkung von 100 km/h bzw. 80 km/h.

Tab. 3.3: Kapazitäten der Hauptfahrbahn ohne Geschwindigkeitsbeschränkung für Gefälle oder Steigungen bis 2 % [24]

Anzahl der Fahrstreifen [-]	Lage	Kapazität [Kfz/h]		
		SV-Anteil		
		0 %	10 %	20 %
3	außerhalb Ballungsraum	5400	5100	4800
	innerhalb Ballungsraum	5700	5400	5100
2	außerhalb Ballungsraum	3600	3500	3400
	innerhalb Ballungsraum	4000	3800	3600

Tab. 3.4: Kapazitäten der Hauptfahrbahn mit Geschwindigkeitsbeschränkung für Gefälle oder Steigungen bis 2 % [24]

Anzahl der Fahrstreifen [-]	Geschwindigkeitsbeschränkung [km/h]	Kapazität [Kfz/h]		
		SV-Anteil		
		0 %	10 %	20 %
3	120	5700	5400	5100
	100 / 80	5800	5500	5200
2	120	4000	3800	3600
	100 / 80	4100	3900	3700

Das Verfahren für die Bemessung von **Einfahrten** ist anwendbar, wenn der einfahrende Kraftfahrzeugstrom auf einem Einfädungsstreifen parallel an die Hauptfahrbahn heran geführt wird. Entsprechend den gültigen Richtlinien für den Entwurf von planfreien Knotenpunkten [20][21] sind dies die Einfahrtstypen E 1, E 2, E 3, E 4 und E 5 (vgl. Bild 3.4). Die Bezeichnung der Fahrzeugströme in den Einfahrtstypen E 1 bis E 5 ist im Anhang 2.2 dargestellt.

Die Kapazität einer Einfahrt als Teil eines planfreien Knotenpunkts wird im Bemessungsverfahren nach dem HBS 2001 durch die Kapazitäten von zwei kritischen Bereichen bestimmt:

- Maximale Einfädungsverkehrsstärke q_M
- Kapazität der Hauptfahrbahn unterhalb der Einfahrt q_{HU}

Die gewünschte Qualität des Verkehrsablaufs gilt nur dann als erreicht, wenn in beiden kritischen Bereichen die zu erwartenden Verkehrsstärken niedriger sind als die Kapazitäten.

Falls die Bemessungsverkehrsstärke fahrestreifenbezogen vorliegt, kann die Einfädungsverkehrsstärke rechnerisch ermittelt werden. Für die verschiedenen Einfahrtstypen gelten die in der Tab. 3.5 beschriebenen Zusammenhänge. Beim Einfahrtstyp E 4 ist zu beachten,

dass im HBS 2001 davon ausgegangen wird, dass sich der einfahrende Verkehr in der zweistreifigen Einfahrrampe hälftig verteilt. Der Einfahrtstyp E 4 wird deshalb als ein System von zwei aufeinander folgenden und direkt hintereinander liegenden Einzelauffahrten betrachtet. Der Einfahrbereich wird in zwei Hälften (I und II) unterteilt.

Tab. 3.5: Berechnung der Einfädelungsverkehrsstärke bei fahstreifenbezogenen Bemessungsverkehrsstärken [24]

Einfahrtstyp	E 1, E 2	E 3, E 5	E 4
Ermittlung der Einfädelungsverkehrsstärke	$q_M = q_{H1} + q_E$	Der Nachweis kann auf Grund der Fahstreifenaddition entfallen.	$q_{E1} = q_{E2} = 0,5 * q_E$ $q_{M,I} = q_{H1} + q_{E1}$ $q_{M,II} = q_{H1,I} + q_{E1,I} = q_{H1,I} + q_{E2}$

Zur Berücksichtigung des Schwerverkehranteils wird die Einfädelungsverkehrsstärke in Pkw-Einheiten pro Stunde (Pkw-E/h) angegeben. Die in der Tab. 3.6 angegebenen Einfädelungsverkehrsstärken gelten für den Fall, dass aufgrund der Trassierung in der Einfahrrampe in Höhe der Trenninselspitze Geschwindigkeiten von mindestens 60 km/h erreichbar sind. Andernfalls sind die reduzierten Werte zu verwenden.

Tab. 3.6: Zulässige Einfädelungsverkehrsstärken für die Einfahrtstypen E 1 bis E 5 [24]

Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs (QSV)	Zulässige Einfädelungsverkehrsstärke $q_{M,zul}$ [Pkw-E/h]	
	Regelfall	Reduzierte Werte
A	≤ 900	≤ 600
B	≤ 1400	≤ 1100
C	≤ 1650	≤ 1500
D	≤ 2000	≤ 1800
E	≤ 2200	≤ 2000
F	>2200	>2000

Die rechnerische Ermittlung der Einfädelungsverkehrsstärke ist jedoch in den meisten Fällen nicht möglich, weil die Aufteilung des Kraftfahrzeugverkehrsstroms in der Hauptfahrbahn auf die einzelnen Fahstreifen nicht bekannt ist. Aus diesem Grund wird im HBS 2001 die Möglichkeit angeboten, die Ermittlung der Qualitätsstufe des Verkehrsablaufs in der Einfahrt allein anhand der Verkehrsstärke in der Einfahrt und der Verkehrsstärke in der Hauptfahrbahn oberhalb der Einfahrt aus Bemessungsdiagrammen abzulesen. Diesen Bemessungsdiagrammen liegt ein funktionaler Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke in der Hauptfahrbahn und der Verkehrsstärke im rechten Fahstreifen der Hauptfahrbahn zugrunde. Es wird jeweils ein Bemessungsdiagramm für den Einfahrtstyp E 1 / E 2 an dreistreifigen Hauptfahrbahnen (vgl. Bild 3.7), für den Einfahrtstyp E 1 / E 2 an zweistreifigen Hauptfahrbahnen (vgl. Bild 3.8) und für den Einfahrtstyp E 4 an zweistreifigen Hauptfahrbahnen (vgl. Bild 3.9) angegeben.

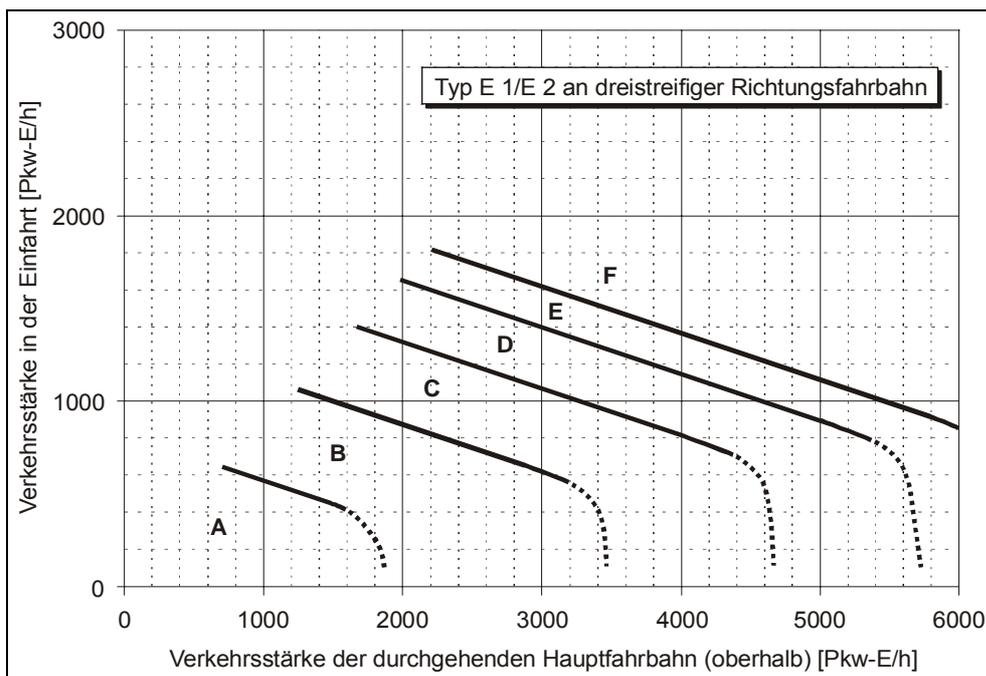


Bild 3.7: Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs für den Einfädungsvorgang in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke der Hauptfahrbahn und der Verkehrsstärke der Einfahrt für die Einfahrtstypen E 1 und E 2 an dreistreifigen Hauptfahrbahnen [24]

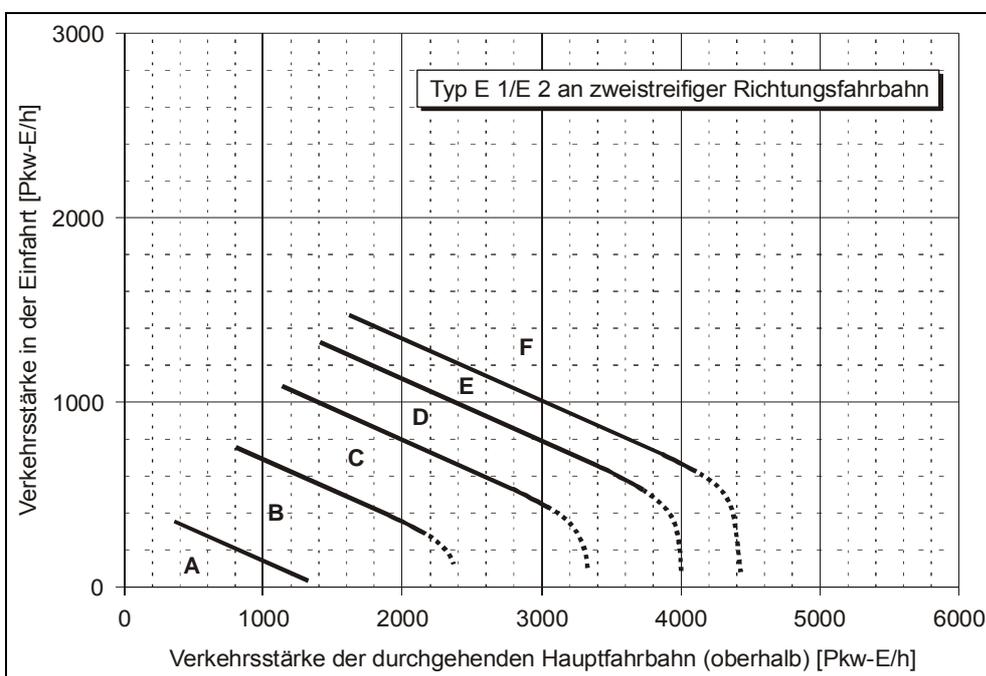


Bild 3.8: Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs für den Einfädungsvorgang in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke der Hauptfahrbahn und der Verkehrsstärke der Einfahrt für die Einfahrtstypen E 1 und E 2 an zweistreifigen Hauptfahrbahnen [24]

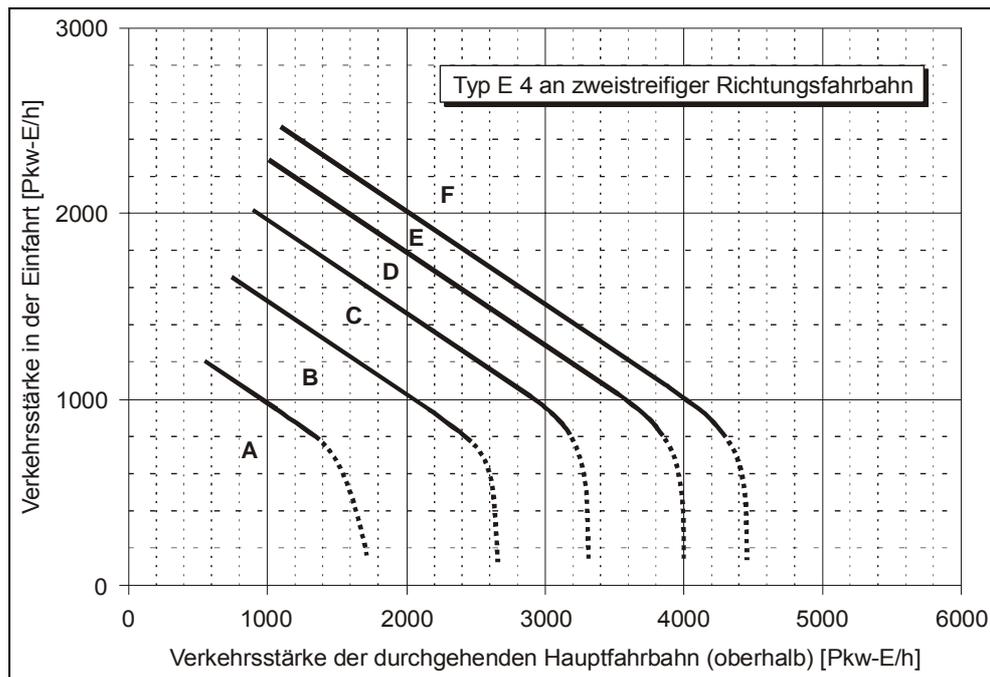


Bild 3.9: Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs für den Einfädelungsvorgang in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke der Hauptfahrbahn und der Verkehrsstärke der Einfahrt für den Einfahrtstyp E 4 an zweistreifigen Hauptfahrbahnen [24]

Als weitere Einflussgröße auf die Qualität des Verkehrsablaufs in Einfahrten wird die Verkehrsstärke in der Hauptfahrbahn unterhalb der Einfahrt genannt. Die Verkehrsstärke in der Hauptfahrbahn unterhalb der Einfahrt setzt sich für alle Einfahrtstypen aus der Verkehrsstärke in der Hauptfahrbahn oberhalb der Einfahrt und der Verkehrsstärke in der Einfahrt zusammen. Die Kapazitäten der Hauptfahrbahnen unterhalb der Einfahrt können der Tab. 3.3 und der Tab. 3.4 entnommen werden.

3.6.2 Highway Capacity Manual 2000

Im Jahre 1950 erschien in den USA erstmals das Highway Capacity Manual, ein Handbuch für die Planung und Dimensionierung von Straßenverkehrsanlagen, das gleichzeitig Berechnungsverfahren für die Ermittlung der Kapazität und der Qualität des Verkehrsablaufs für Straßenverkehrsanlagen liefert. Der Kern des amerikanischen Highway Capacity Manual ist das seit 1965 bestehende Konzept, die Qualität des Verkehrsablaufs in sechs Stufen für die Qualität des Verkehrsablaufs (Level Of Service) einzuteilen.

Mit dem Highway Capacity Manual 1985 [72] erschien die dritte Ausgabe des Handbuchs. Die Aktualisierung war aufgrund unterschiedlicher Entwicklungen (z. B. in der Fahrzeugtechnik) notwendig geworden. Nach dem Berechnungsverfahren des Highway Capacity Manual 1985 ist für die Kapazität von Aus- und Einfahrten an Autobahnen vor allem die Verkehrsstärke im äußeren rechten Fahrstreifen (V_1) maßgebend. Das Highway Capacity Manual 1985 gibt zahlreiche Nomogramme und Gleichungen zur Ermittlung der Verkehrs-

stärke im rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn für verschiedene Rampenarten an. Eingangsgrößen sind die Verkehrsstärke in der Hauptfahrbahn oberhalb der Ein- bzw. Ausfahrt, die Anzahl der Fahrstreifen und die Belastung in den Rampen. Da dieses Verfahren in seiner Anwendung relativ kompliziert war, wurde für die Ausgabe des Highway Capacity Manuals aus dem Jahr 1994 (ergänzt: 1997) ein neues, wesentlich vereinfachtes Verfahren für die Ermittlung der Kapazität und Qualität des Verkehrsablaufs in Aus- und Einfahrten an mehrstreifigen Hauptfahrbahnen entwickelt [59] [72].

Die aktuelle Ausgabe des Highway Capacity Manuals erschien im Jahre 2000 [75]. Es hat sich gegenüber dem Highway Capacity Manual von 1994 lediglich in der Form der Darstellung des Bemessungsverfahrens geändert. Für die Bemessung von Aus- und Einfahrten wird zunächst ein Beeinflussungsbereich definiert, für den die Qualitätsstufen ermittelt werden. Untersuchungen haben gezeigt, dass im Bereich des Aus- bzw. Einfädungsstreifens und der beiden rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn über eine Länge von 1.500 ft (ausgehend von der Trenninselspitze) die meisten Fahrstreifenwechsel und Bremsvorgänge auftreten und dass sich die Beeinflussungen im Verkehrsablauf auf diesen Bereich konzentrieren. Sowohl für Ausfahrten als auch für Einfahrten umfasst dieser Beeinflussungsbereich somit die beiden rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn und den Aus- bzw. Einfädungsstreifen. Die Beeinflussungsbereiche für Ausfahrten (diverge influence area) und Einfahrten (merge influence area) sowie die für die Bemessung maßgebenden Kenngrößen des Verkehrsablaufs sind im Bild 3.10 dargestellt.

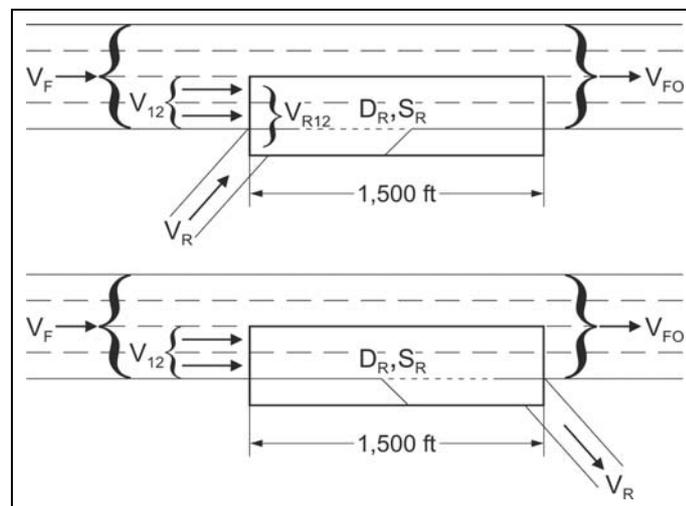


Bild 3.10: Beeinflussungsbereiche und maßgebende Kenngrößen des Verkehrsablaufs für Einfahrten und Ausfahrten [75]

Das Verfahren wird in drei Schritten durchgeführt. Im ersten Schritt wird die Verkehrsstärke der beiden rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn (V_{12}) oberhalb des Beeinflussungsbereichs bestimmt. Dafür wird die Verkehrsstärke in der Hauptfahrbahn oberhalb

der Aus- bzw. Einfahrt mit einem Faktor, der in Abhängigkeit von der Anzahl der Fahrstreifen der Hauptfahrbahn gewählt wird, abgemindert.

Der zweite Schritt besteht darin, die maximal mögliche Verkehrsstärke der aufgeführten Kraftfahrzeugströme zu ermitteln und der nachgefragten Verkehrsbelastung gegenüber zu stellen. Der Vergleich gibt Aufschluss über die Wahrscheinlichkeit eines Verkehrszusammenbruchs. Die Kapazität kann für folgende Kenngrößen bestimmt werden

- Verkehrsstärke in der Hauptfahrbahn oberhalb des Beeinflussungsbereichs (v_F , nur für Ausfahrten)
- Verkehrsstärke in der Hauptfahrbahn unterhalb des Beeinflussungsbereichs (v_{FO})
- Verkehrsstärke am Beginn des Beeinflussungsbereichs (v_{12} für Ausfahrten, v_{R12} für Einfahrten)
- Verkehrsstärke in der Aus- bzw. Einfahrtrampe (v_R)

Im dritten Schritt wird anhand der Verkehrsdichte (D_R) innerhalb des Beeinflussungsbereichs die Qualitätsstufe des Verkehrsablaufs festgelegt. In einigen Fällen kann auch die Durchschnittsgeschwindigkeit (S_R) als Kriterium für die Ermittlung der Qualitätsstufe dienen. In der Tab. 3.7 ist die im HCM angegebene Einteilung der Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs für Aus- und Einfahrten dargestellt.

Tab. 3.7: Einteilung der Qualitätsstufen für Aus- und Einfahrten [75]

Level of Service	Density D_R
A	≤ 10
B	$> 10-20$
C	$> 20-28$
D	$> 28-35$
E	> 35
F	-

3.7 Verfahren zur Kapazitätsermittlung auf Autobahnen

3.7.1 Allgemeines

Wie bereits in Ziffer 2 erwähnt, wird die Kapazität als maximale Verkehrsstärke, die an einem Querschnitt erreicht werden kann, definiert. Die Kapazität kann jedoch auch als Zufallsgröße aufgefasst werden, die insbesondere in Aus- und Einfahrten planfreier Knotenpunkte von entwurfstechnischen und betrieblichen sowie von weiteren Randbedingungen (z. B. vom Wetter) abhängig ist. Auch unter idealen Bedingungen, wie sie im

HBS 2001 und im HCM vorausgesetzt werden, ist die Kapazität kein konstanter Wert, denn ebenfalls die Fahrer- und Fahrzeugeigenschaften spielen eine Rolle. Die Verkehrsstärke, bei der es zu einem Zusammenbruch des Verkehrsablaufs kommt kann als Zufallsgröße betrachtet werden. Die Kapazität kann dann als stochastische Größe aufgefasst werden, die einer Verteilung folgt. Diese Kapazitätsverteilung kann verwendet werden, um bestimmte mathematische Größen zu bestimmen, beispielsweise den Mittelwert, den Median oder das 90-% Perzentil [71].

Die Schätzung eines Kapazitätswerts oder einer Kapazitätsverteilung wird seit langem in der Literatur diskutiert [16][32][48][51][52][54][71]. Im Folgenden werden einige Methoden dargestellt, deren Anwendung mit empirisch gewonnenen Daten (Verkehrsstärken, Geschwindigkeiten, Verkehrsdichten und Zeitlücken) möglich ist. Somit kann beurteilt werden, welches der dargestellten Verfahren im Rahmen der vorliegenden Arbeit zur Anwendung geeignet ist. Die Zusammenstellung orientiert sich im Wesentlichen an den Veröffentlichungen von MINDERHOUD et. al. [51] und ZURLINDEN [87]. Einen Überblick über die einzelnen Methoden liefert das Bild 3.11.

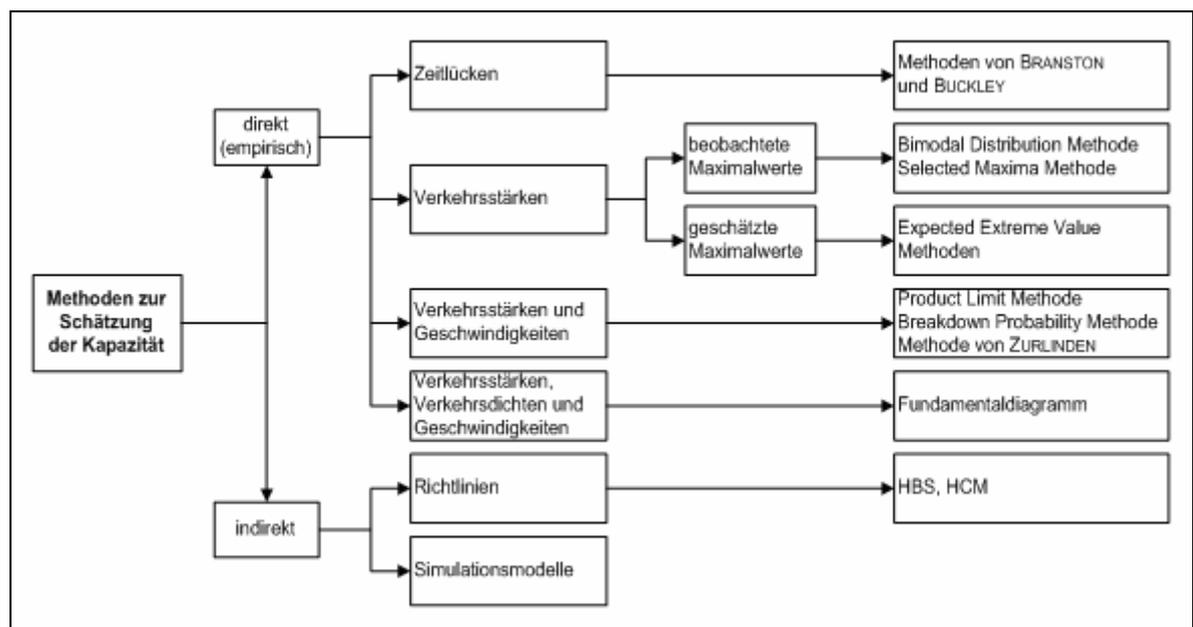


Bild 3.11: Methoden zur Schätzung der Kapazität, nach MINDERHOUD [51]

3.7.2 Schätzung der Kapazität mittels Zeitlücken

Die Schätzung der Kapazität mittels Zeitlücken basiert auf der Tatsache, dass sich ein Fahrzeugstrom aus frei fahrenden und nicht frei fahrenden Fahrzeugen zusammensetzt. Die nicht frei fahrenden Fahrzeuge passen ihre Geschwindigkeit der Geschwindigkeit des Pulkführers an.

Die beiden bekanntesten Verfahren wurden von BRANSTON [6] und BUCKLEY [12] entwickelt. Sie gehen davon aus, dass die Verteilung der Zeitlücken der nicht frei fahrenden Fahrzeuge im Bereich der Kapazität einen stationären Verkehrszustand abbildet. Der Kehrwert des Quotienten aus der mittleren Zeitlücke und der Anzahl der nicht frei fahrenden Kraftfahrzeuge weist bei diesem Verkehrszustand ein Maximum für die Verkehrsstärke auf. Diese Verkehrsstärke wird als Kapazität betrachtet.

Abgesehen von der Schwierigkeit, die Zeitlücken zu erfassen, kann in der Praxis ein einfaches Entscheidungskriterium ermittelt werden, mit dem frei fahrende und nicht frei fahrende Fahrzeuge voneinander unterschieden werden können. Infolgedessen kann die statistische Verteilung der nicht frei fahrenden Fahrzeuge und somit die Kapazität einfach ermittelt werden. Bei dem Verfahren muss jedoch jeder Fahrstreifen einzeln betrachtet werden. Die Anwendung dieses Modells in der Praxis hat allerdings gezeigt, dass die Kapazität der Verkehrsanlage deutlich überschätzt wird, weil sich auch bei größter Verkehrsnachfrage im Verkehrsstrom Lücken bilden, die erheblich größer als die Mindestabstände sind [6][12][16].

3.7.3 Schätzung der Kapazität mittels Verkehrsstärken

Bezüglich der Schätzung der Kapazität unter Verwendung von beobachteten Verkehrsstärken können zwei Methoden unterschieden werden. Bei der Bimodal Distribution Methode und bei der Selected Maxima Methode werden ausschließlich tatsächlich beobachtete Verkehrsstärken zur Schätzung der Kapazität heran gezogen.

Die **Bimodal Distribution Methode** kann angewendet werden, wenn hohe Verkehrsstärken vorliegen. Die Daten werden an einem Querschnitt über einen längeren Zeitraum beobachtet, wobei die Verkehrsnachfrage sehr stark von der Beobachtungsdauer und dem Beobachtungszeitraum abhängt. Wichtig ist, dass die Kapazität häufig erreicht und durch die Nachfrage übertroffen wird. Die Methode liefert als Ergebnis eine Dichtefunktion der Kapazität. Nach den Erfahrungen von COHEN [16] bilden sich in dieser Dichtefunktion beobachteter Verkehrsstärken zwei Bereiche mit besonders häufig auftretenden Verkehrsstärken aus. Der erste Bereich liegt bei einer niedrigen Verkehrsstärke, da in der Regel die Stunden mit schwacher Nachfrage die größte Häufigkeit aufweisen. Die zweite Häufung von Verkehrsstärken liegt im Bereich von sehr hohen Verkehrsstärken, wenn die Verkehrsnachfrage die Kapazität regelmäßig überschreitet. Als Kapazität wird die Verkehrsstärke bezeichnet, bei der das zweite Maximum der Häufigkeiten auftritt. Aus der Anwendung dieser Methode resultiert ein Wert für die Kapazität, der dem Erwartungswert der Dichtefunktion entspricht, die die maximal beobachteten Verkehrsstärken repräsentiert.

Bei der von COHEN [16] beschriebenen **Selected Maxima Methode** werden an einem Querschnitt über einen längeren Beobachtungszeitraum die Verkehrsstärken aufgezeichnet. Der Mittelwert der maximalen Verkehrsstärke eines jeden Tages wird als Kapazität der Verkehrsanlage betrachtet. Auch bei dieser Methode hängt das Ergebnis stark von der Verkehrsnachfrage ab. Somit kann die Methode nur zur Anwendung kommen, wenn täglich Verkehrsstärken im Bereich der Kapazität auftreten. Wird an einem Tag nicht die Kapazität erreicht, geht die höchste gemessene Verkehrsstärke dennoch als Wert für die Kapazität in die Stichprobe ein. Je häufiger hingegen die Nachfrage hohe Werte erreicht, um so wahrscheinlicher ist es, dass eine sehr hohe Verkehrsstärke als Kapazität eingeht.

3.7.4 Schätzung der Kapazität mittels Verkehrsstärken und Geschwindigkeiten

Bei der Schätzung der Kapazität mittels Verkehrsstärken und Geschwindigkeiten wird im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Verfahren auch der Verkehrszustand berücksichtigt. Ein Verfahren zur Schätzung der Kapazität mittels Verkehrsstärken und Geschwindigkeiten ist die Breakdown Probability Methode.

Die **Breakdown Probability Methode** wird auf der Grundlage von q-v-Diagrammen angewendet. Dabei wird der plötzliche Übergang von einem stabilen in einen instabilen Verkehrszustand (vgl. Ziffer 2) betrachtet. Die Verkehrsstärke, die den Übergang in einen instabilen Verkehrszustand nach sich zieht, wird bei dieser Methode als die momentane Kapazität angesehen. Als Kriterium für das Erreichen der Kapazität dient das plötzliche Absinken der Geschwindigkeit. Dabei muss wie bei der Product Limit Methode zunächst eine Grenzgeschwindigkeit definiert werden.

Mit der Breakdown Probability Methode können alle Übergänge in einen instabilen Verkehrszustand ermittelt werden. Dabei handelt es sich um diejenigen Intervalle, denen ein Zusammenbruch des Verkehrsflusses folgt. Liegen in einer Untersuchung zahlreiche Zusammenbrüche vor, kann mit der Breakdown Probability Methode die Wahrscheinlichkeit eines Zusammenbruchs bei einer bestimmten Verkehrsstärke berechnet werden. Dabei wird die Häufigkeit der beobachteten Zusammenbrüche mit der Anzahl der Messwerte mit dieser Verkehrsstärke, bei denen kein Zusammenbruch aufgetreten ist, verglichen. Für die Anwendung der Methode ist es zweckmäßig, die Verkehrsstärken in Klassen zusammenzufassen. Abschließend kann aus den berechneten Wahrscheinlichkeiten des Zusammenbruchs der einzelnen Verkehrsstärkeklassen eine Häufigkeitsverteilung erstellt werden.

OKAMURA et. al. [54] sowie LORENZ und ELEFTERIADOU [48] wendeten die Breakdown Probability Methode in Japan bzw. in Kanada an. In beiden Untersuchungen wurde deutlich, dass der Übergang von einem stabilen in einen instabilen Verkehrszustand ein

stochastisches Ereignis ist, das bei Verkehrsstärken auftreten kann, die sowohl deutlich kleiner, als auch deutlich größer als die Kapazität sein können. OKAMURA et. al. [54] sowie LORENZ und ELEFTERIADOU [48] konnten in ihren Untersuchungen jedoch keinen Zusammenhang zwischen der Kapazität und der Verkehrsstärke unmittelbar vor einem Zusammenbruch feststellen. Dennoch konnte bewiesen werden, dass mit dem Ansteigen der Verkehrsstärke auch die Wahrscheinlichkeit zunimmt, dass es zu einem Übergang in den instabilen Verkehrszustand kommt.

Die **Product Limit Methode** [52] stellt eine weitere Methode zur Schätzung der Kapazität dar. Diese Methode basiert auf der statistischen Analyse von Lebensalterdaten, die insbesondere in den biomedizinischen Wissenschaften und in den Ingenieurwissenschaften Anwendung findet. Alle Anwendungsgebiete zeichnen sich dadurch aus, dass ein Interesse an einem Zeitpunkt besteht, an dem ein bestimmtes Ereignis eintritt (z. B. Eintritt des Todes oder Versagen eines Bauteils). Die Zeitspanne bis zum Erreichen dieses Ereignisses wird in der Regel als Lebensdauer bezeichnet. Die Lebensdauer kann dabei sowohl das Alter als auch die ab einem bestimmten Zeitpunkt gemessene Überlebensdauer sein.

In Bezug auf die Kapazitätsermittlung wird die Zufallsgröße Kapazität wie eine Lebensdauer behandelt. Die Kapazität ist dabei die Verkehrsstärke, die ein Verkehrsstrom im stabilen Verkehrszustand nicht überschreiten kann. Der Versagensfall tritt ein, wenn der stabile Verkehrszustand in einen instabilen Verkehrszustand übergeht.

Da die Theorie der Lebensdauerverteilung im Verkehrswesen nicht gebräuchlich ist, werden die Grundbegriffe kurz erläutert. Die folgende Darstellung bezieht sich weitgehend auf die Arbeiten von LAWLESS [43] und ZURLINDEN [87], in denen bereits ausführliche Erläuterungen der Product Limit Methode enthalten sind.

$f(t)$: statistische Dichtefunktion der Lebensdauer

$$f(t) = h(t) \cdot S(t) \quad (\text{Gl. 3.2})$$

$F(t)$: Verteilungsfunktion der Lebensdauer T

$$F(t) = p(t_i \leq t) = \int_0^t f(x) dx \quad (\text{Gl. 3.3})$$

$S(t)$: Überlebensfunktion

$$S(t) = p(t_i > t) = 1 - F(t) = e^{-\int_0^t h(x) dx} \quad (\text{Gl. 3.4})$$

$h(t)$: Hazard-Funktion (Mortalität, Todesrate)

$$h(t) = \frac{f(t)}{S(t)} \quad (\text{Gl. 3.5})$$

Die Hazard-Funktion gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass ein Individuum in dem infinitesimal kleinen Intervall $(t, t+\Delta t)$ stirbt. Die Bedingung dafür ist, dass es bis zum Zeitpunkt t überlebt hat. Aus den zuvor genannten Gleichungen folgt :

$$f(t) = h(t) \cdot e^{-\int_0^t h(x) dx} \quad (\text{Gl. 3.6})$$

Wenn die Beobachtung abgebrochen wird, bevor bei allen beobachteten Individuen der Tod eingetreten ist, spricht man von sogenannten zensierten Daten. Dann ist für diese Individuen lediglich ein Mindestwert der Lebensdauer bekannt, der jedoch nicht der tatsächlichen Lebensdauer entspricht. Bei der Lebensdaueranalyse treten zensierte Daten häufig auf, weil es bei der Datenerhebung Zeitbegrenzungen oder andere Restriktionen gibt. Die Lebensdauerverteilung kann dann nicht mehr vollständig geschätzt werden, da in diesem Fall nur unvollständige Informationen zur Verfügung stehen.

Nach der Ermittlung der Verteilungsfunktion der Lebensdauer kann die Überlebensfunktion $S(t)$ geschätzt werden. Dazu dient die von KAPLAN und MEIER [35] im Jahre 1958 erstmals diskutierte Product Limit Methode, die eine Maximum-Likelihood-Schätzung der Überlebensfunktion $S(t)$ darstellt. Sie ermöglicht die Schätzung von einzelnen bedingten Wahrscheinlichkeiten. Auf diese Weise werden die Parameter so bestimmt, dass das Ergebnis der Stichprobe im Rahmen des vorgegebenen statistischen Modells mit der größtmöglichen Wahrscheinlichkeit auftritt.

Die Likelihood-Funktion hat das folgende Aussehen, wenn unzensierte und zensierte Daten vorliegen [43]:

$$L = \prod_{i=1}^n f(t_i)^{\delta_i} \cdot S(L_i)^{1-\delta_i} \quad (\text{Gl. 3.7})$$

mit n = Gesamtzahl der Individuen

$\delta_i = 1$, wenn das Individuum unzensiert ist

$\delta_i = 0$, wenn das Individuum zensiert ist

Für bestimmte Dichte- und Verteilungsfunktionen ergibt sich für die Gleichung 3.7 ein Maximum. Die Product-Limit-Schätzung erfordert dagegen nicht die Annahme bestimmter Dichte- und Verteilungsfunktionen. Die Herleitung wird beispielsweise von LAWLESS [43] beschrieben. Danach wird die Überlebensfunktion gemäß der Gleichung 3.8 geschätzt.

$$\hat{S}(t) = \prod_{j: t_j < t} \frac{n_j - d_j}{n_j} \quad (\text{Gl. 3.8})$$

mit: $n_j =$ Anzahl der unmittelbar vor t_j lebenden Individuen [-]

$d_j =$ Anzahl der Todesfälle zum Zeitpunkt t_j [-]

Wenn zu jedem Zeitpunkt nur ein Todesfall eintreten kann, geht die Gleichung 3.8 in die Gleichung 3.9 über.

$$\hat{S}(t) = \prod_{j: t_j < t} \frac{n_j - 1}{n_j} \quad (\text{Gl. 3.9})$$

Wenn die größte verzeichnete Lebensdauer der Stichprobe ein zensierter Wert und keine durch ein Todesereignis abgeschlossene Lebensdauer ist, ist die Product-Limit-Schätzung nur bis zum letzten beobachteten Todeszeitpunkt definiert.

Die zuvor beschriebene Methode zur Ermittlung von Lebensdauerverteilungen und Überlebensfunktionen kann für die empirische Analyse der Kapazitätsverteilung einer Straße angewendet werden. Statt der Zeit (Überlebensdauer) wird die Verkehrsstärke ausgewertet. Es werden die in der Tab. 3.8 dargestellten Zusammenhänge betrachtet.

Tab. 3.8: Analogie zwischen Lebensdauer- und Kapazitätsanalyse, nach ZURLINDEN [87]

	Lebensdaueranalyse	Kapazitätsanalyse
Achse	Zeit t	Verkehrsstärke q
Versagensfall	Tod zum Zeitpunkt t	Erreichen der Kapazität bei Verkehrsstärke q
Lebensdauer	Überlebensdauer t_i bis zum Eintritt des Todes	Kapazität C
Zensierung	Überlebensdauer t ist größer als Länge des Experiments	Kapazität C ist größer als Verkehrsnachfrage
Überlebensfunktion	$S(t)$	$G(q)$
Dichtefunktion der Lebensdauer	$f(t)$	Verteilungsfunktion der Kapazitäten $F_C(q)$

Jedes Intervall einer empirischen Untersuchung zum Verkehrsablauf kann wie ein Experiment begrenzter Dauer behandelt werden. Wird bei der in einem Intervall gemessenen Verkehrsstärke die Kapazität erreicht, ist das Ergebnis nicht zensiert. Wird jedoch ein Intervall analysiert, in dem der Kraftfahrzeugverkehr noch frei fließt, so gilt dieses Intervall als zensiert. Jedes zensierte Intervall weist darauf hin, dass die Kapazität in diesem Intervall größer als die beobachtete Verkehrsstärke ist. Insgesamt sind für die Anwendung der Product Limit Methode jedoch nur die Intervalle relevant, deren Verkehrsstärke größer als der kleinste beobachtete Kapazitätswert ist.

Für die Anwendung der Methode auf den Verkehrsfluss muss erkennbar sein, ob bei einer beobachteten Verkehrsstärke der Zusammenbruch des Verkehrsflusses erfolgt ist. Aus diesem Grund ist es erforderlich, dass die Verkehrsstärken und Geschwindigkeiten von zwei Querschnitten im Bereich einer Engstelle vorliegen. Zusätzlich muss eine so genannte Grenzgeschwindigkeit v_G definiert werden. Die Grenzgeschwindigkeit ist die Geschwindigkeit, mit der entschieden wird, ob der Verkehr fließt oder bereits in einen instabilen Verkehrszustand übergegangen ist. Es werden folgende Größen definiert:

$$v_0 = \text{Geschwindigkeit im Engpass} \quad [\text{km/h}]$$

$$v_1 = \text{Geschwindigkeit stromaufwärts des Engpasses} \quad [\text{km/h}]$$

$$q_0 = \text{Verkehrsstärke im Engpass} \quad [\text{Kfz/h}]$$

$$v_G = \text{Grenzgeschwindigkeit} \quad [\text{km/h}]$$

In jedem Zeitintervall werden die Größen v_0 , v_1 und q_0 gemessen. In der Engstelle herrscht der Zustand „Q“ (fließender Verkehr), wenn die Geschwindigkeit v_1 größer oder gleich der Grenzgeschwindigkeit ist. Ist jedoch die Geschwindigkeit v_1 kleiner als die Grenzgeschwindigkeit, so herrscht in der Engstelle der Zustand „C“ (Kapazität erreicht). Die

Zeitintervalle, in denen keiner der beiden Zustände vorherrscht (z. B. $v_0 < v_G$) gehen nicht in die Ermittlung der Kapazitätsverteilung ein.

Von entscheidender Bedeutung ist, dass bei der Product Limit Methode die Dauer der Experimente keinen Einfluss auf die ermittelte Verteilungsfunktion hat. Der Einfluss besteht lediglich darin, dass eine zu kurze Beobachtungsdauer dazu führt, dass die Verteilungsfunktion bis zum Erreichen der Kapazität nicht hinreichend untersucht werden kann. Die Dauer der empirischen Untersuchung zum Verkehrsablauf sollte deshalb so gewählt werden, dass sie zahlreiche Intervalle, in denen die Kapazität erreicht wird, einschließt. Alternativ können viele Untersuchungen von sehr kurzer bis zu sehr langer Dauer durchgeführt werden. Die Dauer der einzelnen Untersuchungen ist unerheblich. Die Beobachtungen sollten also über eine große Anzahl aufeinander folgender Zeitintervalle durchgeführt werden, die hohe Verkehrsbelastungen einschließen. Alle Intervalle einer solchen Messung werden unter Berücksichtigung der gemessenen Verkehrsstärke in der Engstelle in einer Rangfolge angeordnet. Außerdem wird für alle Intervalle, denen der Zustand „C“ zugeordnet wird, die Zahl k_i ermittelt. Die Zahl k_i beschreibt die Anzahl der Intervalle, in denen die Verkehrsstärke größer (oder gleich) als alle übrigen gemessenen Verkehrsstärken ist. In der Tab. 3.9 wird beispielhaft die Anwendung der Product Limit Methode auf den Verkehrsfluss dargestellt.

Tab. 3.9: Anwendung der Product Limit Methode auf den Verkehrsfluss [87]

Messintervall		Verkehrsstärke [Kfz/h]	Zustand	k_i , $i \in \{C\}$	Überlebensfunktion $G(q)$	Verteilungsfunktion der Lebensdauer $F_c(q)$
1	15.30-15.45	3000	Q	-		
2	15.45-16.00	2500	Q	-	1	$1-G(q) = 0$
3	16.00-16.15	3500	C	6	$5/6 = 0,83$	$1-G(q) = 0,17$
4	16.15-16.30	4000	Q	-		
5	16.30-16.45	4300	C	3	$5/6 \cdot 3/4 \cdot 2/3 = 0,41$	$1-G(q) = 0,59$
6	16.45-17.00	4500	Q	-		
7	17.00-17.15	4600	C	1	$5/6 \cdot 3/4 \cdot 2/3 \cdot 0/1 = 0$	$1-G(q) = 1$
8	17.15-17.30	4100	C	4	$5/6 \cdot 3/4 = 0,62$	$1-G(q) = 0,38$

Auch die **Methode von ZURLINDEN** ermöglicht die Schätzung einer Verteilungsfunktion für die Kapazität. Sie stellte eine Verbesserung der zuvor beschriebenen Product Limit Methode durch die Breakdown Probability Methode dar [87]. Alle Verkehrsstärken unmittelbar vor einem Zusammenbruch werden dabei als Zustände des Typs „C“ (Kapazitätswert) betrachtet. Alle Intervalle in denen die beobachtete Geschwindigkeit größer als die Grenzggeschwindigkeit ist, werden als Zustände des Typs „Q“ definiert. Alle übrigen Intervalle werden nicht betrachtet. Somit gehen lediglich die Intervalle in die

Kapazitätsermittlung ein, bei denen die beobachtete Geschwindigkeit über der Grenzgeschwindigkeit liegt.

Wichtig für den Erfolg der Untersuchungsmethode ist, dass der Messquerschnitt tatsächlich in einem Engpass liegt. Andernfalls kann der Zusammenbruch auf einen Rückstau von einem weiter stromabwärts liegenden Engpass zurückzuführen sein. Bei der Analyse der Verkehrsdaten langer Zeiträume kann jedoch nicht verhindert werden, dass einige Zusammenbrüche auf sich stromabwärts ereignete Unfälle oder Nothalte zurückzuführen sind. Der Einfluss dieser Fehler kann bei einer sehr großen Anzahl von Zusammenbrüchen jedoch als gering eingeschätzt werden.

Ein Vergleich der geschätzten Verteilungsfunktion der Kapazität nach der Methode von ZURLINDEN mit der Breakdown Probability Methode bzw. der Product Limit Methode ist im Bild 3.12 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die nach der modifizierten Methode von ZURLINDEN ermittelte Verteilungsfunktion im Bereich höherer Verkehrsstärken liegt. Es muss jedoch angemerkt werden, dass Zusammenbrüche bei sehr hohen Verkehrsstärken im betrachteten Beispiel nur selten beobachtet werden konnten. Deshalb kann der Verlauf der Verteilungsfunktion in diesem Bereich durch einzelne Übergänge in instabile Verkehrszustände gravierend beeinflusst werden.

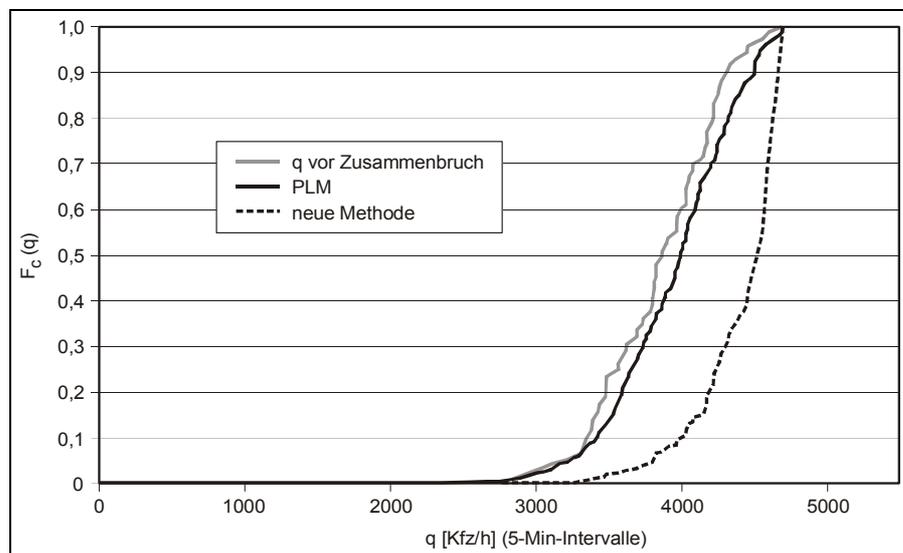


Bild 3.12: Geschätzte Verteilungsfunktionen der Kapazität bei der Anwendung verschiedener Methoden [87]

Ein Vorteil dieser Methode gegenüber den zuvor beschriebenen ist, dass alle Intervalle vor einem Zusammenbruch in die Analyse einbezogen werden. Nachteilig ist jedoch, dass die Verteilungsfunktion nur vollständig geschätzt werden kann, wenn die größte gemessene Verkehrsstärke ein Kapazitätswert ist (vgl. Ziffer 7.2.3). Wird allerdings eine

bestimmte Verteilungsfunktion unterstellt (z. B. Weibull), kann auch mit der Methode von Zurlinden eine vollständige Schätzung der Kapazitätsverteilung erfolgen.

3.7.5 Schätzung der Kapazität mittels Verkehrsstärken, Verkehrsdichten und Geschwindigkeiten

Eine gebräuchliche Methode zur Ermittlung der Kapazität ist die Analyse von Fundamentaldiagrammen. In die im q-v-Diagramm dargestellten Messwerte, die in der Regel eine große Streuung aufweisen, wird eine Regressionskurve so eingepasst, dass die Summe der Fehlerquadrate minimal wird. Der Scheitelpunkt der Kurve wird als mittlere Kapazität betrachtet. Diese Schätzung von Kapazitäten ist Stand der praxisorientierten Verkehrstechnik und kommt sowohl im HBS 2001 [24] als auch im HCM 2000 [75] zur Anwendung.

Problematisch bei der Anwendung dieser Methode ist jedoch, dass in den q-v-Diagrammen im Übergangsbereich zwischen dem oberen und dem unteren Ast (vgl. Ziffer 2) in der Regel nur wenige Messwerte zur Verfügung stehen. Die Einpassung der Kurve in die Menge der Messpunkte ist dann sehr ungenau. Das Ergebnis hängt darüber hinaus in hohem Maße von der Wahl der Modellfunktion und dem Schätzverfahren für die Parameter des Regressionsmodells ab. Meistens werden polynomische, logarithmische oder exponentielle Funktionen angewendet. Außerdem sollte zur Anwendung dieser Methode eine hohe Verkehrsnachfrage vorhanden sein.

In Ziffer 3.8 wird auf die Schätzung der Kapazität mittels Verkehrsstärken, Verkehrsdichten und Geschwindigkeiten näher eingegangen.

3.8 Makroskopische Verkehrsflussmodelle

3.8.1 Allgemeines

Makroskopische Verkehrsflussmodelle beschreiben den Zusammenhang zwischen den Kenngrößen des Verkehrsablaufs. Diese Beschreibung erfolgt durch eine einfache mathematische Gleichung, die den Zusammenhang zwischen den quantitativen Parametern Verkehrsstärke q und Verkehrsdichte k und dem qualitativen Parameter mittlere momentane Geschwindigkeit \bar{v}_m darstellt.

In der Literatur wird eine Vielzahl verschiedener makroskopischer Verkehrsflussmodelle beschrieben. Im Folgenden werden einige übliche Modelle erläutert und kurz auf ihre Vor- und Nachteile in der Anwendung eingegangen.

3.8.2 Das lineare k-v-Modell von GREENSHIELDS

GREENSHIELDS [27] entwickelte bereits 1935 ein einfaches Verkehrsflussmodell, das einen linearen Zusammenhang zwischen den Kenngrößen des Verkehrsablaufs beschreibt (vgl. Gleichung 3.10).

$$\overline{v}_m = c - a \cdot k \quad (\text{Gl. 3.10})$$

mit: \overline{v}_m = mittlere momentane Geschwindigkeit [km/h]

k = Verkehrsdichte [Kfz/km]

a, c = Modellparameter

Aus der Gleichung 3.10 und der Gleichung 2.1 ergibt sich für das Fundamentaldiagramm eine quadratische Funktion (vgl. Gleichung 3.11).

$$q = c \cdot k - a \cdot k^2 \quad (\text{Gl. 3.11})$$

mit: q = Verkehrsstärke [Kfz/h]

Aus dem Modell von GREENSHIELDS ergibt sich im Fundamentaldiagramm ein parabolischer Verlauf, wobei das Maximum der Verkehrsstärke den Erwartungswert für die Kapazität bildet. Dieses Modell hat jedoch den Nachteil, dass es im Bereich hoher Verkehrsdichten unrealistisch wird. Darüber hinaus konnte aus gemessenen Werten bestätigt werden, dass das Fundamentaldiagramm in der Regel nicht parabelförmig und symmetrisch ist. Eine lineare Funktion kann also lediglich eine Näherung an die Daten im k-v-Diagramm liefern.

3.8.3 Das k-v-Modell von VAN AERDE

Das Modell von VAN AERDE [3] basiert auf einem einfachen Fahrzeugfolgemedell. Es wird angenommen, dass die mittlere Weglänge zwischen aufeinander folgenden Fahrzeugen einschließlich der Fahrzeuglänge die Summe aus einem konstanten und einem variablen Term ist. Zusätzlich wird als dritter Term eine lineare Funktion der Geschwindigkeit berücksichtigt. Der Übergang vom mikroskopischen zum makroskopischen Modell erfolgt unter Ausnutzung der Tatsache, dass die mittlere Weglänge die Inverse der Verkehrsdichte ist. VAN AERDE gibt für den Zusammenhang von Geschwindigkeit und Verkehrsdichte folgende Gleichung an:

$$k(\bar{v}_m) = \frac{1}{h} = \frac{1}{c_1 + \frac{c_2}{v_0 - \bar{v}_m} + c_3 \cdot \bar{v}_m} \quad (\text{Gl. 3.12})$$

mit: $k(v)$ = Verkehrsdichte

h = Weglücke zwischen aufeinander folgenden Fahrzeugen

c_1, c_2, c_3 = Konstanten

\bar{v}_0 = Geschwindigkeit bei frei fahrenden Kraftfahrzeugverkehr

\bar{v}_m = aktuelle Geschwindigkeit

Das Modell von VAN AERDE beschreibt den Verkehrsfluss sowohl im freien, als auch im teilgebundenen und gebunden Bereich mit einer durchgehenden Funktion. Der Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit und der Verkehrsdichte wird durch eine inverse S-Form dargestellt (vgl. Bild 3.13), deren Ausprägung von der Größe der Konstanten abhängt. Sind c_1 und c_3 gleich Null, erhält man eine Gerade, die dem linearen k-v-Modell von GREENSHILDS [27] entspricht.

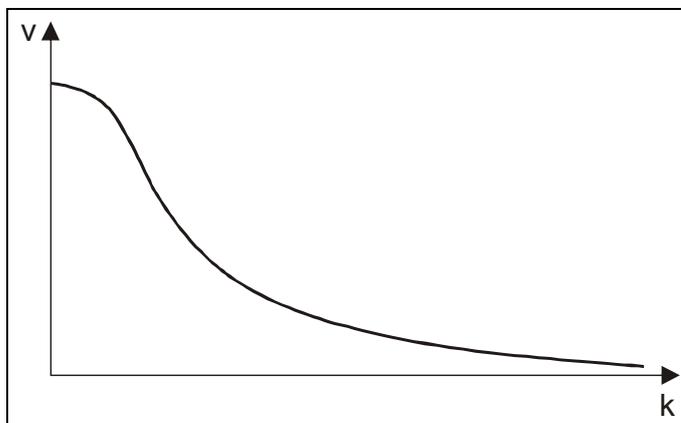


Bild 3.13: Inverse S-Form des Modells von VAN AERDE [3]

Die Gleichung 3.12 beschreibt die Abhängigkeit der Verkehrsdichte von der Geschwindigkeit. Für die Regressionsrechnung im k-v-Modell muss die Gleichung 3.12 nach v aufgelöst werden. Aus der Umformung ergibt sich die Gleichung 3.13.

$$v(k) = \frac{1}{2} \cdot \left(v_0 + \frac{1}{c_3 \cdot k} - \frac{c_1}{c_3} \pm \sqrt{R_1} \right) \quad (\text{Gl. 3.13})$$

mit:

$$R_1 = \frac{1 - 2 \cdot c_1 \cdot k + 2 \cdot c_1 \cdot c_3 \cdot k^2 \cdot v_0 + c_1^2 \cdot k^2 + 4 \cdot c_2 \cdot c_3 \cdot k^2 - 2 \cdot c_3 \cdot k \cdot v_0 + c_3^2 \cdot k^2 \cdot v_0^2}{(c_3 \cdot k)^2} \quad (\text{Gl. 3.14})$$

Für die Betrachtungen im q-v-Diagramm kann die Gleichung 3.12 unter Verwendung der Zustandsgleichung (vgl. Gleichung 2.1) umgeformt und nach v aufgelöst werden. Es ergibt sich die Gleichung 3.15.

$$v(q) = \frac{1}{2} \cdot \left(v_0 + \frac{c_1 \cdot q}{1 - c_3 \cdot q} \pm \sqrt{R_2} \right) \quad (\text{Gl. 3.15})$$

mit:

$$R_2 = \frac{v_0^2 - 2 \cdot c_1 \cdot q \cdot v_0 + 2 \cdot c_1 \cdot c_3 \cdot q^2 \cdot v_0 + c_1^2 \cdot q^2 - 4 \cdot c_2 \cdot q + 4 \cdot c_2 \cdot c_3 \cdot q^2 - 2 \cdot c_3 \cdot q \cdot v_0^2 + c_3^2 \cdot q^2 \cdot v_0^2}{(1 - c_3 \cdot q)^2} \quad (\text{Gl. 3.16})$$

Unter der Bedingung, dass R_2 aus der Gleichung 3.15 gleich Null ist, kann die maximale Verkehrsstärke q_{\max} berechnet werden. Die Kapazität tritt am Wendepunkt der Kurve im k-v-Diagramm auf. Für die Berechnung muss die Gleichung 3.15 umgeformt werden. Die maximale Verkehrsstärke am Wendepunkt kann dann unter Verwendung der Gleichung 3.17 berechnet werden.

$$q_{\max} = \frac{-2 \cdot \sqrt{c_2} \cdot \sqrt{c_2 + c_1 \cdot v_0} + c_1 \cdot v_0 + 2 \cdot c_2 + c_3 \cdot v_0^2}{c_1^2 + 4 \cdot c_2 \cdot c_3 + 2 \cdot c_1 \cdot c_3 \cdot v_0 + c_3^2 \cdot v_0^2} \quad (\text{Gl. 3.17})$$

PONZLET stellte in einer Forschungsarbeit aus dem Jahre 1996 [57] fest, dass mit dem Modell von VAN AERDE unter der Vorgabe einer maximalen Verkehrsdichte die Kapazität geschätzt werden kann, auch wenn nur Messwerte im Bereich des fließenden Verkehrs vorliegen. Es muss jedoch eine ausreichende Datenbasis für den stabilen Bereich des Verkehrsflusses vorhanden sein.

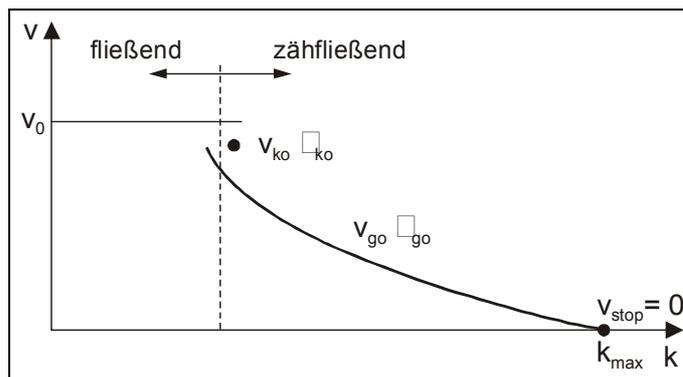
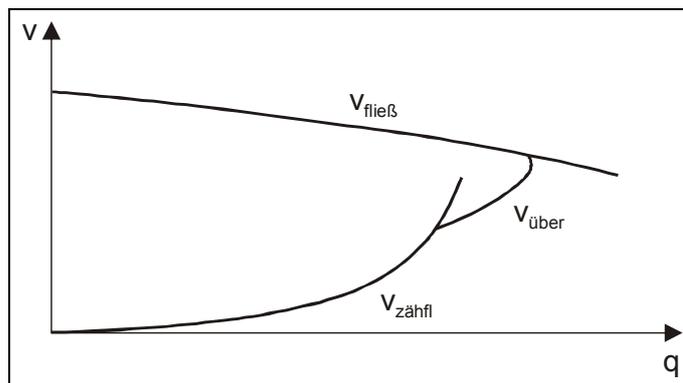
3.8.4 Das Modell von WU

Ein neues Modell zur Beschreibung des Verkehrsablaufs in allen Bereichen wurde im Jahre 2000 von WU [84] veröffentlicht. Das Modell von WU basiert auf einer Einteilung des Fundamentaldiagramms in vier homogene Zustände, die durch die in der Tab. 3.10 dargestellten Parameter eindeutig beschrieben werden können.

Tab. 3.10: : Homogene Verkehrszustände und ihre zugehörigen Parameter [84]

	Homogener Zustand	Abkürzung	Beschreibende Parameter
Fließender Verkehr	Einzelne Fahrzeuge	FREI	v_0 : Wunschgeschwindigkeit
	Gebundene Kolonne	KOLONNE	v_{ko} : Kolonnengeschwindigkeit τ_{ko} : Nettozeitlücke zwischen zwei Fahrzeugen
Zähfließender Verkehr	Gebundene Kolonne	GO	τ_{go} : Nettozeitlücke zwischen zwei Fahrzeugen
	Stehende Fahrzeuge	STOP	k_{max} : max. Verkehrsdichte im stehenden Verkehr

Im k - v -Diagramm stellt der Zustand „frei“ eine horizontale Gerade dar (vgl. Bild 3.14). Der Zustand „Kolonne“ wird lediglich als ein Punkt dargestellt, weil von einer konstanten Zeitlücke und Geschwindigkeit in einer Kolonne ausgegangen wird. Der Zustand „stop“ wird ebenfalls durch einen Punkt im q - v -Diagramm beschrieben. Der Verlauf des Zustands „go“ kann durch eine hyperbolische Funktion dargestellt werden. Im Bild 3.15 ist der Verlauf der q - v -Beziehung nach dem Modell von Wu dargestellt.

Bild 3.14: Verlauf der homogenen Verkehrszustände in der k - v -Beziehung nach Wu [84]Bild 3.15: Verlauf der q - v -Beziehung nach Wu [84]

Die Nettozeitlücke in der Kolonne im fließenden Verkehrszustand τ_{ko} ist im Allgemeinen kleiner als die Nettozeitlücke in der Kolonne im zähfließenden Verkehrszustand τ_{go} . Aus

diesem Grund gibt es einen Bereich, in dem sich die Funktionen für den fließenden und zählfließenden Kraftfahrzeugverkehr überlappen. Der Verkehrszustand ist in diesem Bereich nicht genau vorher zu sagen. Es können dann zählfließende oder fließende Kolonnen vorliegen, wobei der Wechsel dazwischen sprunghaft erfolgt. Die Wahrscheinlichkeit für einen Übergang von einer zählfließenden zu einer fließenden Kolonne nimmt linear mit zunehmender Verkehrsstärke ab. In der Tab. 3.11 werden alle Formeln des Modells von WU zusammengefasst.

Tab. 3.11: Formeln und Parameter des Modells von WU [84]

Bereich	$v(k)$
Fließender Verkehr für: $k \leq k_{ko}$	$v(k) = v_{\text{fließ}} = v_0 - (v_0 - v_{ko}) \cdot \left(\frac{k}{k_{ko}}\right)^{N-1}$
Übergang für: $k_{ko} \geq k \geq k_{go,min}$	$v(k) = v_{\text{über}} = v_{\text{fließ}} \cdot p_{\dot{u}} + v_{\text{zählfl.}} \cdot (1 - p_{\dot{u}})$
Zählfließender Verkehr für: $k \geq k_{go,min}$	$v(k) = v_{\text{zählfl.}} = \frac{1}{\tau_{go}} \left(\frac{1}{k} - \frac{1}{k_{max}} \right)$
	mit: $k_{ko} = v \cdot \left[v_{ko} \cdot \left(\tau_{ko} + \frac{1}{v_{ko} \cdot k_{max}} \right) \right]^{-1}$ $k_{go,min} = \left[v_{ko} \cdot \left(\tau_{go} + \frac{1}{v_{ko} \cdot k_{max}} \right) \right]^{-1}$ $p_{\dot{u}} = 1 - \frac{k - k_{go,min}}{k_{ko} - k_{go,min}}$
Modellparameter: v_0 Wunschgeschwindigkeit k_{ko} Geschwindigkeit in der Kolonne τ_{ko} Nettozeitlücke in der Kolonne τ_{go} Nettozeitlücke in der zählfließenden Kolonne k_{max} maximale Verkehrsdichte bei Stillstand	

3.9 Fazit

Die Literaturanalyse macht deutlich, dass es über die Bemessung von Aus- und Einfahrten zahlreiche Untersuchungen gibt. Die in einigen Forschungsarbeiten durchgeführten empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf weisen jedoch nicht immer Daten im Bereich der Kapazität auf. Als Kapazität wurde dabei in den aktuellen Untersuchungen über die Bemessung von Aus- und Einfahrten die maximale Verkehrsstärke im stabilen Bereich des q-v-Diagramms festgelegt. Neue Untersuchungen widerlegen jedoch, dass die Kapazität ein festgelegter Wert ist. Vielmehr geht man davon aus, dass sich die Kapazität durch die Wahrscheinlichkeit, dass bei einer bestimmten Verkehrsstärke ein Zusammenbruch des Verkehrsablaufs eintritt, besser beschreiben lässt. Derartige Verfahren wurden in Aus- und Einfahrten bisher nicht angewendet.

Die Literaturanalyse zeigt weiterhin, dass einzelne Aus- und Einfahrtstypen bislang nur unzureichend oder gar nicht untersucht wurden. Bezüglich der Ausfahrten liegen für die Ausfahrtstypen A 3, A 4 und A 5 bisher nur unzureichende bzw. keine empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf vor. Darüber hinaus beruhen die Bemessungsgrundlagen für den Ausfahrtstyp A 1 nicht auf empirischen Untersuchungen und bedürfen daher einer Überprüfung. Auch für einige Einfahrtstypen (E 3, E 4 und E 5) liegen bisher nur unzureichende empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf vor. Für den Einfahrtstyp E 1 / E 2 liegen dagegen umfangreiche Untersuchungen vor, die jedoch ausschließlich an Schnellverkehrsstraßen der Kategoriengruppe B durchgeführt wurden.

In Bezug auf den Einfädeltvorgang macht die Literaturanalyse deutlich, dass die Erkenntnisse aus umfangreichen Forschungsarbeiten im HBS 2001 zum Teil nicht berücksichtigt wurden. Eine Überprüfung des Bemessungsverfahrens für den Einfädeltvorgang ist daher dringend erforderlich.

Auch die Erkenntnisse aus der Literaturanalyse bezüglich des Maßes für die Beschreibung der Qualität des Verkehrsablaufs sind nicht eindeutig. Im HBS 2001 wird abweichend von allen Forschungsergebnissen der Auslastungsgrad verwendet. Dies wird damit begründet, dass aufgrund der sehr kurzen zu durchfahrenden Streckenlängen in planfreien Knotenpunkten die Geschwindigkeiten von geringer Bedeutung sind. Zudem unterscheiden sich unabhängig von der Verkehrsbelastung die Geschwindigkeiten je nach Linienführung, Steuerungsbedingungen, Rampenformen u.s.w. erheblich. Um das Bemessungsverfahren möglichst anwendungsfreundlich zu gestalten, gelten im HBS 2001 für alle Teilbereiche der planfreien Knotenpunkte sowie für die knotenpunktfreie Strecke dieselben Auslastungsgrade. Auch dieser Problematik sollte in den weiteren Ausführungen Beachtung geschenkt werden.

4 Durchführung von empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf

4.1 Auswahl der Untersuchungsstellen

Zur Schaffung einer Datenbasis zur Überprüfung der bisherigen Ansätze zur Bemessung von Aus- und Einfahrten in planfreien Knotenpunkten werden empirische Untersuchungen zum Verkehrsablauf bei sehr hohen Verkehrsstärken und nach Möglichkeit mit zahlreichen Übergängen vom stabilen zum instabilen Verkehrszustand durchgeführt. Nur so kann gewährleistet werden, dass Daten im Bereich der Kapazität vorliegen.

Um eine Datenbasis mit den gewünschten hohen Verkehrsstärken zu erhalten, wurden die Ballungsräume Hannover, München, Frankfurt/Main und Mannheim für die empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf ausgewählt. Im Autobahnnetz dieser Ballungsräume wird täglich eine sehr hohe Verkehrsbelastung verzeichnet. Darüber hinaus fanden die empirischen Untersuchungen im Ballungsraum Hannover während der Messen CeBIT 2001 und Hannover-Messe 2001 sowie im Ballungsraum München während der Messe BAUMA 2001 statt. Während dieser Großveranstaltungen ist in der Regel ein besonders hohes Verkehrsaufkommen zu erwarten. Für die Ballungsräume Frankfurt/Main und Mannheim lagen Daten vom 01.01.2000 bis zum 05.11.2000 vor, aus denen einzelne hochbelastete Tage ausgewählt werden konnten.

Um in den genannten Ballungsräumen geeignete Untersuchungsstellen zu finden, wurde ein dreistufiges Auswahlverfahren durchgeführt. Im ersten Schritt wurden die vorab ausgewählten Ballungsräume bereist und die Aus- und Einfahrten mittels Videotechnik dokumentiert. Auf der Grundlage der Dokumentation konnte die bauliche Gestaltung der Aus- und Einfahrten ermittelt und eine genaue Zuordnung zu den einzelnen Aus- und Einfahrtstypen vorgenommen werden. Bei der Auswahl der Untersuchungsstellen war von Bedeutung, dass durch die einzelnen Knotenpunktelemente ein möglichst breites Spektrum aller Aus- und Einfahrtstypen abgedeckt wird. Darüber hinaus sollte den bisher nur unzureichend untersuchten Aus- und Einfahrtstypen besondere Beachtung geschenkt werden.

Im nächsten Schritt wurden die Untersuchungsstellen ausgewählt, die sowohl in der Hauptfahrbahn als auch in den Aus- bzw. Einfahrrampen hohe Verkehrsstärken aufwiesen. Da aus den Ballungsräumen Frankfurt/Main und Mannheim bereits zu diesem Zeitpunkt Daten vorlagen, konnten hochbelastete Aus- und Einfahrten einfach ermittelt werden. In den Ballungsräumen Hannover und München war aufgrund der Großveranstaltungen im gesamten Straßennetz mit hohen Verkehrsbelastungen zu rechnen.

Es wurde darüber hinaus auf die Erfahrungen aus bereits durchgeführten Untersuchungen [30][64] zurückgegriffen.

Um den Erhebungsaufwand zu minimieren, sollten für die empirischen Untersuchungen Daten von vorhandenen stationären Messquerschnitten verwendet werden. Nach Möglichkeit sollten die Messquerschnitte in den Aus- bzw. Einfahrtrampen sowie in der Hauptfahrbahn ober- und unterhalb der Aus- oder Einfahrten vorhanden sein. Aus diesem Grund war bei der endgültigen Auswahl der Untersuchungsstellen schließlich das Vorhandensein stationärer Messquerschnitte ausschlaggebend.

Um möglichst genaue Aussagen bezüglich des Einflusses der einzelnen Verkehrsstärken auf den Verkehrsablauf in dem betrachteten Element zu erhalten, ist auch die Lage der stationären Messquerschnitte von großer Bedeutung. Liegen die Messquerschnitte in allen Untersuchungsstellen an der gleichen Stelle, kann eine bessere Vergleichbarkeit zwischen den Kenngrößen des Verkehrsablaufs in den einzelnen Aus- und Einfahrttypen erreicht werden. In den Einfahrten sollten die Messquerschnitte in der Einfahrt sowie unterhalb der Einfahrt möglichst nah an der Trenninselspitze liegen. Bei den Ausfahrten ist zunächst nur der Messquerschnitt in der Ausfahrtrampe von Bedeutung, auch dieser sollte möglichst gering von der Trenninselspitze entfernt sein. Die Erfüllung dieser Randbedingungen konnten jedoch nicht bei allen Untersuchungsstellen gewährleistet werden. Bei der Formulierung der Ergebnisse ist dies zu berücksichtigen.

Für die empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf wurden schließlich die in der Tab. 4.1 dargestellten Untersuchungsstellen ausgewählt. Es handelt sich dabei ausschließlich um Aus- und Einfahrten in planfreien Knotenpunkten an Autobahnen der Kategoriengruppe A.

Tab. 4.1: Überblick über die Untersuchungsstellen

Untersuchungsstelle	
Ausfahrten	Ausfahrttyp
AS Friedberg, A 5 Fahrtrichtung Kassel	A 1
Viernheimer Dreieck, A 67 Fahrtrichtung Stuttgart	A 1
Bad Homburger Kreuz, A 5 Fahrtrichtung Basel	A 1
AS Hannover-Lahe, A 2 Fahrtrichtung Berlin	A 2
AD Hannover-Süd, A 7 Fahrtrichtung Hamburg	A 2
Mönchhof Dreieck, A 67 Fahrtrichtung Frankfurt/Main	A 2
Viernheimer Dreieck, A 6 Fahrtrichtung Frankfurt/Main	A 2
AK Neufahrn, A 9 Fahrtrichtung Nürnberg	A 3
AK München-Nord, A 9 Fahrtrichtung München	A 4
AK München-Nord, A 9 Fahrtrichtung Nürnberg	A 4
Wiesbadener Kreuz, A 3 Fahrtrichtung Frankfurt/Main	A 4
Wiesbadener Kreuz, A 3 Fahrtrichtung Köln	A 5
Einfahrten	Einfahrttyp
AS Friedberg, A 5 Fahrtrichtung Kassel	E 1
AS Garching-Süd, A 9 Fahrtrichtung Nürnberg	E 1
AS Oberschleißheim, A 92 Fahrtrichtung Deggendorf	E 1
Viernheimer Dreieck, A 67 Fahrtrichtung Frankfurt/Main	E 2
Wiesbadener Kreuz, A 3 Fahrtrichtung Frankfurt/Main	E 3
Mönchhof Dreieck, A 3 Fahrtrichtung Frankfurt/Main	E 4
AK Neufahrn, A 92 Fahrtrichtung Stuttgart	E 4
Mainspitz Dreieck, A 60 Fahrtrichtung Rüsselsheim	E 4*
Mainspitz Dreieck, A 671 Fahrtrichtung Wiesbaden	E 4*
AK München-Nord, A 9 Fahrtrichtung Nürnberg	E 5
Offenbacher Kreuz, A 661 Fahrtrichtung Homburg	E 5

* Ausbildung ist nicht richtlinienkonform

Im Anhang 4.1 bis 4.23 werden alle Untersuchungsstellen grafisch dargestellt und beschrieben. Dabei werden die Lage der Untersuchungsstellen im Ballungsraum, die Abmessungen der Elemente sowie die Bezeichnung und die Lage der stationären Messquerschnitte beschrieben. Darüber hinaus sind Angaben über die Messtage und die Messdauer aufgeführt.

Zur Auswahl der Untersuchungsstellen muss angemerkt werden, dass insbesondere der Ausfahrttyp A 3 nur selten angewendet wird und daher lediglich anhand einer Untersuchungsstelle betrachtet werden konnte. Gleiches gilt für den Ausfahrttyp A 5 sowie für die Einfahrttypen E 2 und E 3. Außerdem sind zwei der untersuchten Einfahrten des Einfahrttyps E 4 nicht richtlinienkonform ausgebildet. Bei diesen beiden Einfahrten wird der linke Fahrstreifen der Einfahrtrampe ohne parallelen Einfädungsstreifen direkt in die Hauptfahrbahn geführt, während der rechte Fahrstreifen der Einfahrtrampe weiter stromabwärts mit einem Einfädungsstreifen eingezogen wird (vgl. Anhang 4.20 und 4.21). Dennoch werden sie in den Untersuchungen als Einfahrttyp E 4 betrachtet, da sie zweistreifige Einfahrtrampen besitzen, die ohne Fahrstreifenaddition in zweistreifige Hauptfahrbahnen geführt werden.

4.2 Messsystem

Die Durchführung der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf erfolgte in den untersuchten Ballungsräumen in Zusammenarbeit mit den zuständigen Behörden vor Ort. Für die Erhebungen von fahrstreifenbezogenen Verkehrsstärken und Geschwindigkeiten wurden vorhandene stationäre Messquerschnitte in Form von Induktivschleifen- oder Radar-Detektoren verwendet. Mit Hilfe der Messquerschnitte können gleichzeitig die Verkehrsstärke, die zugehörigen lokalen Geschwindigkeiten und die Kraftfahrzeugklassen (Pkw, Lkw) in konstanten Zeitintervallen gleicher Dauer gemessen und gespeichert werden. Die kontinuierliche Erfassung der Daten ermöglicht eine im Prinzip unbegrenzt lange Messdauer und somit die Auswertung beliebig langer Zeiträume. Eine Beeinflussung des fließenden Kraftfahrzeugverkehrs kann daher bei der Verwendung von Daten stationärer Messquerschnitte von vornherein ausgeschlossen werden.

4.3 Wahl des Bezugsintervalls

Mit dem Bezugsintervall ist der Zeitraum definiert, in dem eine gewisse Anzahl von Fahrzeugen, die in der Berechnung der Verkehrsstärke und der mittleren Geschwindigkeit für dieses Zeitintervall einbezogen werden, einen festgelegten Querschnitt durchfahren. Die Länge des Bezugsintervalls hat einen entscheidenden Einfluss auf den Aussagegehalt der aus den Messungen abgeleiteten Ergebnisse. Jede Zusammenfassung von einzelnen Messwerten in Intervalle bedingt einen mehr oder weniger großen Informationsverlust. Lange Bezugsintervalle ergeben vergleichsweise statistisch sichere Ergebnisse. Sie können jedoch unterschiedliche Verkehrszustände beinhalten, sodass signifikante Veränderungen im Verkehrsablauf nicht mehr erkannt werden. Mit wachsender Länge des Bezugsintervalls steigt die statistische Sicherheit für die Beschreibung des Verkehrsablaufs mit Hilfe einer aggregierten Kenngröße. Die Schärfe der Aussage nimmt nach dem Erreichen eines Optimums wieder ab. Das Bild 4.1 verdeutlicht diesen Zusammenhang.

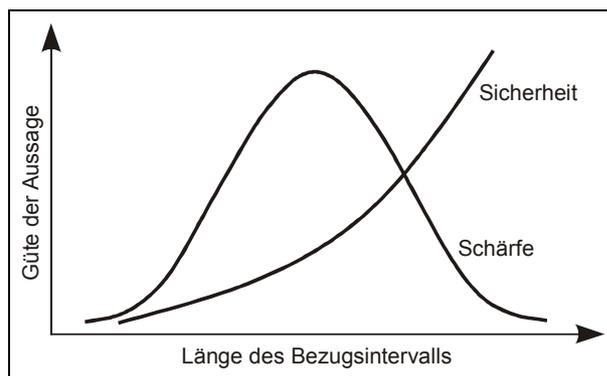


Bild 4.1: Qualität einer Verkehrszustandsbeschreibung in Abhängigkeit von der Länge des Bezugsintervalls [7]

Das Bezugsintervall muss daher so gewählt werden, dass sowohl hinsichtlich der Genauigkeit der Ergebnisse, als auch im Hinblick auf die Handhabbarkeit gleich gute Aussagen zu erwarten sind. KELLER und SACHSE [36] verglichen basierend auf umfangreichen Messungen an Bundesstraßen Fundamentaldiagramme auf der Basis stationärer Messintervalle mit Fundamentaldiagrammen, die über konstante Bezugsintervalle erstellt wurden. Die Untersuchung ergab, dass der Wert für die Kapazität bei der Wahl eines 5-min-Intervalls als Bezugsintervall in der gleichen Größenordnung lag, wie bei einer genaueren, stationären Analyse. Aus diesem Grund werden alle in der vorliegenden Arbeit ermittelten Verkehrsstärken und Geschwindigkeiten auf einer Basis von 5-min-Intervallen erstellt. KELLER und SACHSE ermittelten darüber hinaus bei einem Vergleich von 5-min-Intervallen und 60-min-Intervallen einen Faktor von 1,2 zur Berücksichtigung von zeitweise auftretenden erhöhten Verkehrsstärken, die innerhalb des 60-min-Intervalls nicht abgebildet werden. Dieser Faktor ist bei der Interpretation der im Bereich der Kapazität gemessenen Verkehrsstärken zu berücksichtigen.

4.4 Plausibilitätskontrolle

Um eine möglichst fehlerfreie Datenbasis zu erhalten, werden Plausibilitätskontrollen durchgeführt. Neben dem Totalausfall der Messeinrichtungen können einzelne gespeicherte Messwerte bestimmter Intervalle fehlerbehaftet oder auch unglaubwürdig sein. Diese Fehler können durch technische Probleme während der Messung (Ausfall einer Messeinrichtung) oder auch durch Auslese- und Datenfehler nach der Messung entstanden sein. Fehlende Daten werden in der Regel mit Hilfe von Ersatzwertverfahren rekonstruiert. Um fehlende Messwerte zu ersetzen, wurde die folgende Vorgehensweise gewählt:

- Fehlt der erste Messwert einer Messreihe, so wird dieser Messwert gleich dem zweiten gesetzt.

- Fehlt ein Zwischenwert einer Messreihe, so wird dieser durch Mittelwertbildung der beiden benachbarten Messwerte ergänzt.
- Fehlt der letzte Wert einer Messreihe, so wird dieser Wert gleich dem vorletzten Messwert gesetzt.
- Messwerte die vor dem vorgesehenen Ende endeten, ansonsten aber plausible Ergebnisse lieferten, wurden mit entsprechend verkürzter Messdauer in die Auswertung integriert.

5 Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf

5.1 Überblick

Zur Auswertung der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf werden die Daten zunächst in q-v-Diagrammen dargestellt. Auf diese Weise ist ein erster Überblick über die erzielten Messergebnisse möglich. Mit Hilfe der q-v-Diagramme können, wie bereits in Ziffer 2 beschrieben, die Zusammenhänge zwischen den Kenngrößen Verkehrsstärke und Geschwindigkeit erfasst und beurteilt werden. Diese sollen vor allem zur Überprüfung der bisherigen Bemessungsansätze für die Aus- und Einfahrtstypen herangezogen werden.

Die im Anhang 5.1 bis 5.12 dargestellten q-v-Diagramme zeigen die in den Aus- und Einfahrten im Rahmen der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf beobachteten Verkehrsstärken und mittleren lokalen Geschwindigkeiten. Anhand der q-v-Diagramme kann festgestellt werden, ob die für die Überprüfung und Weiterentwicklung der Bemessungsverfahren relevanten Daten im Bereich hoher Verkehrsstärken bzw. im Bereich der Kapazität erfasst werden konnten. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Kapazität erreicht wurde, wenn Übergänge vom stabilen in den instabilen Verkehrszustand beobachtet wurden (vgl. Ziffer 2).

Im Folgenden werden für alle Untersuchungsstellen die Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf beschrieben. Es wird insbesondere auf die beobachteten Verkehrsstärken in den so genannten kritischen Bereichen eingegangen (vgl. Ziffer 3.6.1). Für die Kapazität der Hauptfahrbahn unterhalb der Einfahrt gelten die im HBS 2001 für die Autobahnabschnitte außerhalb der Knotenpunkte angegebenen Verkehrsstärken. Eine Überprüfung und Weiterentwicklung soll in der vorliegenden Arbeit nicht erfolgen. Im Mittelpunkt der Betrachtungen stehen vielmehr die für die Bemessung relevanten Verkehrsstärken in den Aus- und Einfädungsstreifen bzw. die Einfädungsverkehrsstärke.

Für die Ausfahrtstypen A 1 bis A 5 wird die maximale Verkehrsstärke im Ausfädungsstreifen q_A sowie die zugehörige mittlere lokale Geschwindigkeit dargestellt. Für die Bemessung der Einfahrtstypen E 1, E 2 und E 4 ist die Einfädungsverkehrsstärke q_M die relevante Größe (vgl. Tab. 3.5). Für die Einfahrtstypen E 3 und E 5 erfolgt die Bemessung aufgrund der Fahrstreifensubtraktion ausschließlich anhand der Verkehrsstärke in der Hauptfahrbahn unterhalb der Einfahrt (vgl. Ziffer 3.6.1). Für diese Einfahrtstypen erfolgt daher eine Betrachtung der maximalen Verkehrsstärke im Einfädungsstreifen q_E .

Für die Bestimmung der Einfädelungsverkehrsstärke ist die Verkehrsstärke im rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn oberhalb der Einfahrt von Bedeutung. Da oberhalb von Einfahrten im Vergleich zur freien Strecke eine auf den linken Fahrstreifen verschobene Fahrstreifenbelegung besteht [70], sollte die Verkehrsstärke in der Hauptfahrbahn möglichst nah an der Trenninselspitze erfasst werden. In allen betrachteten Untersuchungsstellen liegen die stationären Messquerschnitte in den Hauptfahrbahnen oberhalb der Einfahrten nicht direkt an der Trenninselspitze. Eine Entfernung von bis zu 100 m wird bei den vorhandenen Geschwindigkeiten von den Kraftfahrzeugen in drei bis vier Sekunden durchfahren. Es wird daher davon ausgegangen, dass bei einer Entfernung von bis zu 100 m oberhalb der Trenninselspitze keine bedeutende Anzahl an Fahrstreifenwechseln durchgeführt wird. Bei den untersuchten Einfahrten vom Einfahrtstyp E 4 befinden sich alle vorhandenen stationären Messquerschnitte in den Hauptfahrbahn oberhalb der Einfahrten in einer Entfernung von zum Teil mehreren hundert Metern von der Trenninselspitze. Eine Bestimmung der Einfädelungsverkehrsstärke kann für die Einfahrten vom Einfahrtstyp E 4 daher nicht erfolgen. Für diese Einfahrten wird in Anlehnung an die Einfahrtstypen E 3 und E 5 daher lediglich eine Betrachtung der Verkehrsstärke in den Einfädelungsstreifen q_E vorgenommen.

Bei der Betrachtung der Einfahrten erfolgt durch die Umrechnung der Verkehrsstärken in Pkw-Einheiten eine Berücksichtigung des unterschiedlichen Fahrverhaltens und der verschiedenen Fahrzeuglängen der Pkw und des Schwerverkehrs. Für die Umrechnung in Pkw-Einheiten wird im Allgemeinen ein Gleichwert von 2,0 Pkw-Einheiten je Schwerverkehrsfahrzeug angesetzt [24]. In der vorliegenden Arbeit wird daher eine Umrechnung mit diesem Gleichwert vorgenommen.

Falls in den einzelnen Untersuchungsstellen Übergänge in instabile Verkehrszustände zu beobachten waren, bezieht sich die angegebene maximale Verkehrsstärke auf den stabilen Verkehrszustand.

5.2 Ausfahrten

5.2.1 Ausfahrtstyp A 1

Die empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf wurden in drei Ausfahrten vom Ausfahrtstyp A 1 durchgeführt. Alle betrachteten Ausfahrten befinden sich an dreistreifigen Hauptfahrbahnen (vgl. Anhang 4.1 bis 4.3).

Die in der **AS Friedberg** betrachtete Ausfahrt vom Ausfahrtstyp A 1 befindet sich an der A 5 in Fahrtrichtung Kassel. Der im Rahmen der empirischen Untersuchungen verwendete stationäre Messquerschnitt im Ausfädelungsstreifen liegt ca. 60 m oberhalb der Trenninselspitze. Hier konnte eine maximale Verkehrsstärke von 140 Kfz/5min mit einer zugehörigen Geschwindigkeit von 67 km/h gemessen werden (vgl. Anhang 5.1). Die

Geschwindigkeiten im stabilen Verkehrszustand lagen insgesamt zwischen 70 km/h und 90 km/h. Es wurden keine Übergänge in den instabilen Verkehrszustand beobachtet.

Im **Viernheimer Dreieck** an der A 67 in Fahrtrichtung Stuttgart wurde eine weitere Ausfahrt vom Ausfahrttyp A 1 untersucht. In dieser Ausfahrt liegt der betrachtete stationäre Messquerschnitt ca. 200 m oberhalb der Trenninselspitze. Im Ausfädelungstreifen konnten Verkehrsstärken von bis zu 169 Kfz/5min mit einer zugehörigen Geschwindigkeit von 72 km/h erfasst werden (vgl. Anhang 5.1). Die Geschwindigkeiten im stabilen Verkehrszustand lagen zwischen 80 km/h und 110 km/h. In dieser Ausfahrt wurden einzelne Übergänge in den instabilen Verkehrszustand beobachtet.

Die im **Bad Homburger Kreuz** betrachtete Ausfahrt vom Ausfahrttyp A 1 liegt an der A 5 in Fahrtrichtung Basel. Der stationäre Messquerschnitt im Ausfädelungstreifen befindet sich ca. 45 m oberhalb der Trenninselspitze. In dieser Ausfahrt wurde eine maximale Verkehrsstärke von 194 Kfz/5min mit einer zugehörigen Geschwindigkeit von 80 km/h beobachtet (vgl. Anhang 5.2). Im stabilen Verkehrszustand lagen die Geschwindigkeiten zwischen 80 km/h und 120 km/h. Außerdem wurden zahlreiche Übergänge vom stabilen in den instabilen Verkehrszustand aufgenommen.

Die Tab. 5.1 verdeutlicht, dass für den Ausfahrttyp A 1 eine umfangreiche Datenbasis mit den relevanten Daten im Bereich hoher Verkehrsstärken vorliegt. Alle Untersuchungsstellen weisen darüber hinaus Übergänge in den instabilen Verkehrszustand auf. Dabei ist zu beachten, dass die betrachteten stationären Messquerschnitte in allen Untersuchungsstellen oberhalb der Trenninselspitze liegen. Insbesondere im Viernheimer Dreieck ist davon auszugehen, dass nicht alle ausfahrenden Kraftfahrzeuge durch den stationären Messquerschnitt erfasst wurden.

Die Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zeigen außerdem, dass die beobachteten Geschwindigkeiten in den drei Untersuchungsstellen deutliche Differenzen aufweisen. Während in der AS Friedberg Geschwindigkeiten von maximal 90 km/h aufgetreten sind, weisen die Ausfahrten im Bad Homburger Kreuz und im Viernheimer Dreieck deutlich höhere Geschwindigkeiten auf. Dies kann einerseits an der unterschiedlichen Lage der stationären Messquerschnitte innerhalb des Ausfädelungstreifens liegen. Andererseits schließen unterschiedlich geführte Verbindungsrampen an die Ausfahrten an. An die Ausfahrt in der AS Friedberg schließt eine indirekt geführte Verbindungsrampe an, die in einen plangleichen Knotenpunkt mündet. Die anderen beiden Ausfahrten befinden sich dagegen in Autobahnknotenpunkten und weisen direkt geführte Verbindungsrampen auf. Direkt und indirekt geführte Verbindungsrampen werden in der Regel mit unterschiedlichen Entwurfsgeschwindigkeiten trassiert [20]. Darüber hinaus ist anzumerken, dass die zulässige Höchstgeschwindigkeit in der Ausfahrt im Viernheimer Dreieck auf 100 km/h beschränkt ist, während in den beiden anderen

Untersuchungsstellen keine Beschränkung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit vorhanden ist. Ein Zusammenhang zwischen den zulässigen Höchstgeschwindigkeiten und den beobachteten Geschwindigkeiten ist jedoch nicht zu erkennen.

Tab. 5.1: Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf für den Ausfahrttyp A 1

Untersuchungsstelle	$q_{A,max}$ [Kfz/5min]	v bei $q_{A,max}$ [km/h]	Gibt es Übergänge in den instabilen Verkehrszustand?
AS Friedberg A 5 Fahrtrichtung Kassel	140	67	ja
Viernheimer Dreieck A 67 Fahrtrichtung Stuttgart	169	72	ja
Bad Homburger Kreuz A 5 Fahrtrichtung Basel	194	80	ja

5.2.2 Ausfahrttyp A 2

In der vorliegenden Arbeit wurden vier Ausfahrten vom Ausfahrttyp A 2 untersucht, von denen drei an dreistreifigen und eine an einer zweistreifigen Hauptfahrbahn liegen (vgl. Anhang 4.4 bis 4.7).

Die Ausfahrt vom Ausfahrttyp A 2 in der **AS Hannover-Lahe** befindet sich an der A 2 in Fahrtrichtung Berlin. Der für die empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf verwendete stationäre Messquerschnitt liegt ca. 600 m unterhalb der Trenninselspitze. Es wurden Verkehrsstärken von bis zu 272 Kfz/5min mit einer zugehörigen mittleren Geschwindigkeit von 79 km/h in den Ausfädelungstreifen beobachtet (vgl. Anhang 5.2). Die Geschwindigkeiten im stabilen Verkehrszustand lagen zwischen 80 km/h und 120 km/h. Es konnten zahlreiche Übergänge in instabile Verkehrszustände erfasst werden.

Im **AD Hannover-Süd** an der A 7 in Fahrtrichtung Hamburg wurde eine weitere Ausfahrt vom Ausfahrttyp A 2 untersucht. Der betrachtete stationäre Messquerschnitt befindet sich in Höhe der Trenninselspitze. Im AD Hannover-Süd konnten Verkehrsstärken in den Ausfädelungstreifen von 218 Kfz/5min mit einer zugehörigen mittleren Geschwindigkeit von 85 km/h gemessen werden (vgl. Anhang 5.3). Die Geschwindigkeiten im stabilen Verkehrszustand lagen zwischen 80 km/h und 120 km/h. Dabei wurden einzelne Übergänge in instabile Verkehrszustände beobachtet.

Die Ausfahrt im **Mönchhof Dreieck** an der A 67 in Fahrtrichtung Frankfurt/Main stellt die einzige Ausfahrt vom Ausfahrttyp A 2 an einer zweistreifigen Hauptfahrbahn dar. Der betrachtete stationäre Messquerschnitt in den Ausfädelungstreifen befindet sich ca. 270 m unterhalb der Trenninselspitze. Im Mönchhof Dreieck konnten im stabilen Verkehrszustand Verkehrsstärken von bis zu 294 Kfz/5min mit einer zugehörigen mittleren Geschwindigkeit von 101 km/h erfasst werden (vgl. Anhang 5.3). Insgesamt wurden im stabilen Verkehrszustand Geschwindigkeiten zwischen 100 km/h und 120 km/h beobachtet. Es wurden mehrere Übergänge in instabile Verkehrszustände verzeichnet.

Auch im **Viernheimer Dreieck** an der A 6 in Fahrtrichtung Frankfurt/Main wurde eine Ausfahrt vom Ausfahrttyp A 2 untersucht. Der betrachtete stationäre Messquerschnitt liegt ca. 300 m unterhalb der Trennselspitze. Die maximale Verkehrsstärke in den Ausfädelungstreifen beträgt 187 Kfz/5min mit einer zugehörigen mittleren Geschwindigkeit von 103 km/h. Die Geschwindigkeiten im stabilen Verkehrszustand lagen zwischen 90 km/h und 115 km/h (vgl. Anhang 5.4). Es konnte kein Übergang in einen instabilen Verkehrszustand beobachtet werden.

Die Tab. 5.2 zeigt, dass für den Ausfahrttyp A 2 eine umfangreiche Datenbasis mit den relevanten Daten im Bereich hoher Verkehrsstärken vorliegt, da drei der vier Untersuchungsstellen Übergänge in instabile Verkehrszustände aufweisen. Auch bei diesem Ausfahrttyp wurden in den einzelnen Untersuchungsstellen unterschiedliche Geschwindigkeiten beobachtet. Die betrachteten stationären Messquerschnitte liegen entweder in Höhe oder deutlich unterhalb der Trennselspitze. Eine Abhängigkeit zwischen der Lage der stationären Messquerschnitte und den beobachteten Geschwindigkeiten ist jedoch nicht zu erkennen. An alle Ausfahrten schließen direkt geführte Verbindungsrampen an, die unterschiedliche zulässige Höchstgeschwindigkeiten aufweisen. In der AS Hannover-Lahe und im AD Hannover-Süd ist keine Beschränkung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit vorhanden, während in den anderen beiden Ausfahrten eine Beschränkung auf 100 km/h angezeigt wird. Die Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zeigen jedoch, dass die Geschwindigkeiten in den Ausfädelungstreifen trotz der unterschiedlichen betrieblichen Randbedingungen insgesamt im stabilen Verkehrszustand annähernd auf dem gleichen Niveau liegen.

Tab. 5.2: Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf für den Ausfahrttyp A 2

Untersuchungsstelle	$q_{A,max}$ [Kfz/5min]	v bei $q_{A,max}$ [km/h]	Gibt es Übergänge in den instabilen Verkehrszustand?
AS Hannover-Lahe A 2 Fahrtrichtung Berlin	272	79	ja
AD Hannover-Süd A 7 Fahrtrichtung Hamburg	218	85	ja
Mönchhof Dreieck A 67 Fahrtrichtung Frankfurt/M.	294	101	ja
Viernheimer Dreieck A 6 Fahrtrichtung Frankfurt/M.	187	103	nein

5.2.3 Ausfahrttyp A 3

In der vorliegenden Arbeit wurden lediglich in einer Ausfahrt vom Ausfahrttyp A 3 empirische Untersuchungen zum Verkehrsablauf durchgeführt (vgl. Anhang 4.8).

Die untersuchte Ausfahrt befindet sich im **AK Neufahrn** an der A 9 in Fahrtrichtung Nürnberg. Der betrachtete stationäre Messquerschnitt in den Ausfädelungstreifen liegt in Höhe der Trennselspitze. In dieser Ausfahrt wurden Verkehrsstärken von bis zu 213 Kfz/5min mit einer zugehörigen mittleren Geschwindigkeit von 86 km/h erfasst (vgl.

Anhang 5.4). Die Geschwindigkeiten lagen insgesamt zwischen 75 km/h und 100 km/h. Es konnte kein Übergang in einen instabilen Verkehrszustand beobachtet werden.

Die Tab. 5.3 zeigt, dass für den Ausfahrttyp A 3 lediglich eine kleine Datenbasis vorliegt. Stellt man die beobachteten Verkehrsstärken den zweistreifigen Ausfahrttypen A 2 und A 4 gegenüber (vgl. Tab. 5.2 und Tab. 5.4) ist festzustellen, dass bei diesen Ausfahrttypen zum Teil vergleichbare Verkehrsstärken beobachtet wurden. Dennoch wurde die Kapazität beim Ausfahrttyp A 3 nicht erreicht.

Tab. 5.3: Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf für den Ausfahrttyp A 3

Untersuchungsstelle	$q_{A,max}$ [Kfz/5min]	v bei $q_{A,max}$ [km/h]	Gibt es Übergänge in den instabilen Verkehrszustand?
AK Neufahrn A 9 Fahrtrichtung Nürnberg	213	86	nein

5.2.4 Ausfahrttyp A 4

Für den Ausfahrttyp A 4 wurden empirische Untersuchungen zum Verkehrsablauf in insgesamt drei Ausfahrten durchgeführt (vgl. Anhang 4.9 bis 4.11).

Eine Ausfahrt vom Ausfahrttyp A 4 befindet sich im **AK München-Nord** an der A 9 in Fahrtrichtung München. Der betrachtete stationäre Messquerschnitt liegt ca. 100 m unterhalb der Trenninselspitze. In den Ausfädelungstreifen wurden Verkehrsstärken von bis zu 310 Kfz/5min mit einer mittleren Geschwindigkeit von 90 km/h gemessen (vgl. Anhang 5.5). Die Geschwindigkeiten im stabilen Verkehrszustand lagen zwischen 90 km/h und 120 km/h. Es wurden Übergänge in instabile Verkehrszustände beobachtet.

Die zweite Ausfahrt vom Ausfahrttyp A 4 befindet sich an der A 9 im **AK München-Nord** in Fahrtrichtung Nürnberg. In dieser Ausfahrt befindet sich der betrachtete stationäre Messquerschnitt ca. 140 m unterhalb der Trenninselspitze. Es wurden Verkehrsstärken von bis zu 223 Kfz/5min mit einer mittleren Geschwindigkeit von 101 km/h beobachtet (vgl. Anhang 5.5). Die Geschwindigkeiten lagen zwischen 95 km/h und 115 km/h. Es wurde kein Übergang in einen instabilen Verkehrszustand erfasst.

Eine weitere Ausfahrt vom Ausfahrttyp A 4 wurde im **Wiesbadener Kreuz** an der A 3 in Fahrtrichtung Frankfurt/Main untersucht. Der betrachtete stationäre Messquerschnitt in den Ausfädelungstreifen befindet sich ca. 220 m unterhalb der Trenninselspitze. Im stabilen Verkehrszustand wurden in dieser Ausfahrt Verkehrsstärken von bis zu 226 Kfz/5min mit einer mittleren Geschwindigkeit von 78 km/h gemessen (vgl. Anhang 5.6). Im stabilen Verkehrszustand konnten Geschwindigkeiten zwischen 80 km/h und 100 km/h erfasst werden. Es wurden zahlreiche Übergänge in instabile Verkehrszustände beobachtet.

Die Tab. 5.4 zeigt, dass eine umfangreiche Datenbasis mit den relevanten Daten im Bereich hoher Verkehrsstärken für den Ausfahrttyp A 4 vorliegt. In zwei der drei Untersuchungsstellen konnten darüber hinaus Übergänge in instabile Verkehrszustände verzeichnet werden. Die Ergebnisse für diese beiden Untersuchungsstellen weisen jedoch deutliche Unterschiede auf. Sowohl die maximale Verkehrsstärke, als auch das gesamte Geschwindigkeitsniveau sind im AK München-Nord (Fahrtrichtung München) deutlich höher als im Wiesbadener Kreuz. Das niedrigere Geschwindigkeitsniveau im Wiesbadener Kreuz könnte darauf zurück zu führen sein, dass der stationäre Messquerschnitt einen größeren Abstand zur Trenninselspitze aufweist und die Kraftfahrzeuge an dieser Stelle ihre Geschwindigkeit bereits weiter reduziert haben. Über unterschiedliche zulässige Höchstgeschwindigkeiten können an dieser Stelle keine Aussagen getroffen werden, da über diese betriebliche Randbedingung für das Wiesbadener Kreuz keine Angaben vorliegen.

Tab. 5.4: Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf für den Ausfahrttyp A 4

Untersuchungsstelle	$q_{A,max}$ [Kfz/5min]	v bei $q_{A,max}$ [km/h]	Gibt es Übergänge in den instabilen Verkehrszustand?
AK München-Nord A 9 Fahrtrichtung München	310	90	ja
AK München-Nord A 9 Fahrtrichtung Nürnberg	223	101	nein
Wiesbadener Kreuz A 3 Fahrtrichtung Frankfurt/Main	226	78	ja

5.2.5 Ausfahrttyp A 5

Für den Ausfahrttyp A 5 wurden an einer Untersuchungsstelle empirische Untersuchungen zum Verkehrsablauf durchgeführt (vgl. Anhang 4.12).

Die Ausfahrt vom Ausfahrttyp A 5 liegt im **Wiesbadener Kreuz** an der A 3 in Fahrtrichtung Köln. Der stationäre Messquerschnitt befindet sich ca. 380 m unterhalb der Trenninselspitze. Im stabilen Verkehrszustand wurden hier Verkehrsstärken von bis zu 194 Kfz/5min mit einer mittleren Geschwindigkeit von 65 km/h verzeichnet (vgl. Anhang 5.6). Insgesamt lagen die Geschwindigkeiten im stabilen Verkehrszustand zwischen 65 km/h und 85 km/h. Auch in dieser Untersuchungsstelle wurden Übergänge in instabile Verkehrszustände beobachtet.

Die Tab. 5.5 verdeutlicht, dass für den Ausfahrttyp A 5 lediglich eine kleine Datenbasis zur Verfügung steht. Die Verkehrsstärken liegen im Vergleich zu den übrigen zweistreifigen Ausfahrten auf einem niedrigen Niveau. Dennoch konnten Übergänge in instabile Verkehrszustände beobachtet werden.

Tab. 5.5: Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf für den Ausfahrttyp A 5

Untersuchungsstelle	$q_{A,max}$ [Kfz/5min]	v bei $q_{A,max}$ [km/h]	Gibt es Übergänge in den instabilen Verkehrszustand?
Wiesbadener Kreuz A 3 Fahrtrichtung Köln	194	65	ja

5.3 Einfahrten

5.3.1 Einfahrttyp E 1 / E 2

In der vorliegenden Arbeit wurden zwei Einfahrten vom Einfahrttyp E 1 an dreistreifigen Hauptfahrbahnen und eine Einfahrt vom Einfahrttyp E 1 an einer zweistreifigen Hauptfahrbahn untersucht. Außerdem wurde eine Einfahrt vom Einfahrttyp E 2 an einer dreistreifigen Hauptfahrbahn analysiert (vgl. Anhang 4.13 bis 4.16).

Die in der **AS Friedberg** betrachtete Einfahrt vom Einfahrttyp E 1 befindet sich an der A 5 in Fahrtrichtung Kassel. Der im Rahmen der empirischen Untersuchungen verwendete stationäre Messquerschnitt im Einfädelungstreifen liegt ca. 60 m oberhalb der Trenninselspitze. Der betrachtete stationäre Messquerschnitt in der dreistreifigen Hauptfahrbahn oberhalb der Einfahrt befindet sich ca. 100 m oberhalb der Trenninselspitze. In der Einfahrt in der AS Friedberg konnten Einfädelungsverkehrsstärken von bis zu 209 Pkw-E/5min mit einer zugehörigen Geschwindigkeit von 54 km/h verzeichnet werden (vgl. Anhang 5.7). Die Geschwindigkeiten im stabilen Verkehrszustand lagen insgesamt zwischen 55 km/h und 120 km/h. Es wurden Übergänge in instabile Verkehrszustände erfasst.

In der **AS Garching-Süd** an der A 9 in Fahrtrichtung Nürnberg wurde eine weitere Einfahrt vom Einfahrttyp E 1 an einer dreistreifigen Hauptfahrbahn untersucht. In dieser Einfahrt liegt der betrachtete stationäre Messquerschnitt im Einfädelungstreifen ca. 70 m oberhalb der Trenninselspitze. Der stationäre Messquerschnitt in der Hauptfahrbahn oberhalb der Einfahrt befindet sich ebenfalls ca. 70 m oberhalb der Trenninselspitze. Die maximale Einfädelungsverkehrsstärke beträgt 218 Pkw-E/5min mit einer zugehörigen Geschwindigkeit von 74 km/h (vgl. Anhang 5.7). Insgesamt lagen die Geschwindigkeiten im stabilen Verkehrszustand zwischen 60 km/h und 120 km/h. Auch in dieser Einfahrt wurden Übergänge in instabile Verkehrszustände beobachtet.

Die in der **AS Oberschleißheim** betrachtete Einfahrt vom Einfahrttyp E 1 an einer zweistreifigen Hauptfahrbahn befindet sich an der A 92 in Fahrtrichtung Deggendorf. Die stationären Messquerschnitte im Einfädelungstreifen und in der Hauptfahrbahn oberhalb der Einfahrt befinden sich jeweils ca. 80 m oberhalb der Trenninselspitze. Im Rahmen der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf wurden Einfädelungsverkehrsstärken von bis zu 154 Pkw-E/5min mit einer Geschwindigkeit von 86 km/h beobachtet (vgl.

Anhang 5.8). Das Geschwindigkeitsniveau lag insgesamt zwischen 70 km/h und 120 km/h. Übergänge in instabile Verkehrszustände wurde nicht beobachtet.

Die Einfahrt vom Einfahrtstyp E 2 befindet sich im **Viernheimer Dreieck** an der A 67 in Fahrtrichtung Frankfurt/Main. Der verwendete stationäre Messquerschnitt im Einfädungsstreifen liegt ca. 250 m oberhalb der Trenninselspitze. Der stationäre Messquerschnitt in der Hauptfahrbahn oberhalb der Einfahrt befindet sich ca. 30 m oberhalb der Trenninselspitze. In dieser Einfahrt wurden Einfädungsverkehrsstärken von bis zu 217 Pkw-E/5min mit einer zugehörigen Geschwindigkeit von 94 km/h gemessen (vgl. Anhang 5.8). Das Geschwindigkeitsniveau befand sich im stabilen Verkehrszustand insgesamt zwischen 85 km/h und 115 km/h. Ein Übergang in einen instabilen Verkehrszustand wurde nicht erfasst.

Die in der Tab. 5.6 dargestellten Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf für die Einfahrtstypen E 1 und E 2 zeigen, dass eine umfangreiche Datenbasis mit den relevanten Daten im Bereich hoher Verkehrsstärken vorliegt. Für die AS Friedberg und die AS Garching-Süd konnten bei annähernd gleich hohen maximalen Einfädungsverkehrsstärken Übergänge in instabile Verkehrszustände beobachtet werden. Im Viernheimer Dreieck wurden ebenfalls hohe Einfädungsverkehrsstärken verzeichnet. Dennoch wurde kein Übergang in einen instabilen Verkehrszustand erfasst. Die beim Erreichen der maximalen Einfädungsverkehrsstärke beobachteten zugehörigen mittleren Geschwindigkeiten weisen deutliche Differenzen auf, insgesamt lagen die Einfädungsgeschwindigkeiten in den vier Untersuchungsstellen jedoch auf einem ähnlichen Niveau.

Tab. 5.6: Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf für die Einfahrtstypen E 1 und E 2

Untersuchungsstelle	$q_{M,max}$ [Pkw-E/5min]	v bei $q_{M,max}$ [km/h]	Gibt es Übergänge in den instabilen Verkehrszustand?
AS Friedberg A 5 Fahrtrichtung Kassel	209	54	ja
AS Garching-Süd A 9 Fahrtrichtung Nürnberg	218	74	ja
AS Oberschleißheim A 92 Fahrtrichtung Deggendorf	154	86	nein
Viernheimer Dreieck A 67 Fahrtrichtung Frankfurt/M.	217	94	nein

5.3.2 Einfahrtstyp E 3

Im Rahmen der empirischen Untersuchungen wurde eine Einfahrt vom Einfahrtstyp E 3 untersucht (vgl. Anhang 4.17). Die Einfahrt befindet sich im **Wiesbadener Kreuz** an der A 3 in Fahrtrichtung Frankfurt/Main. Der verwendete stationäre Messquerschnitt liegt ca. 220 m unterhalb der Trenninselspitze. In dieser Einfahrt wurden Einfahrverkehrsstärken von bis zu 180 Pkw-E/5min mit einer zugehörigen Geschwindigkeit von 60 km/h

beobachtet (vgl. Anhang 5.9). Im stabilen Verkehrszustand lagen die Geschwindigkeiten zwischen 85 km/h und 100 km/h. Es wurden auch Übergänge in instabile Verkehrszustände erfasst. Die Tab. 5.7 zeigt, dass für den Einfahrtstyp E 3 lediglich eine kleine Datenbasis vorliegt.

Tab. 5.7: Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf für den Einfahrtstyp E 3

Untersuchungsstelle	$q_{E,max}$ [Pkw-E/5min]	v bei $q_{E,max}$ [km/h]	Gibt es Übergänge in den instabilen Verkehrszustand?
Wiesbadener Kreuz A 3 Fahrtrichtung Frankfurt/Main	180	60	ja

5.3.3 Einfahrtstyp E 4

Für den Einfahrtstyp E 4 lagen insgesamt vier Untersuchungsstellen vor. Drei der untersuchten Einfahrten liegen an zweistreifigen, eine an einer dreistreifigen Hauptfahrbahn. Zwei Einfahrten vom Einfahrtstyp E 4 weisen eine nicht richtlinienkonforme Ausbildung auf (vgl. Anhang 4.18 bis 4.21).

Die im **Mönchhof Dreieck** betrachtete Einfahrt vom Einfahrtstyp E 4 liegt an der A 3 in Fahrtrichtung Frankfurt/Main, die in diesem Bereich dreistreifig ausgebaut ist. Der stationäre Messquerschnitt in den Einfädelsstreifen befindet sich ca. 770 m oberhalb der Trennselnspitze. Die maximale Verkehrsstärke im Einfädelsstreifen betrug 332 Pkw-E/5min mit einer zugehörigen mittleren Geschwindigkeit von 100 km/h (vgl. Anhang 5.9). Die mittleren Geschwindigkeiten im stabilen Verkehrszustand lagen insgesamt zwischen 90 km/h und 120 km/h. Es konnten Übergänge in instabile Verkehrszustände erfasst werden.

Im **AK Neufahrn** an der A 92 in Fahrtrichtung Stuttgart wurde eine weitere Einfahrt vom Einfahrtstyp E 4 untersucht. In dieser Einfahrt befindet sich der stationäre Messquerschnitt in den Einfädelsstreifen ca. 500 m oberhalb der Trennselnspitze. Im Rahmen der empirischen Untersuchungen wurde eine maximale Einfahrverkehrsstärke von 136 Pkw-E/5min mit einer zugehörigen mittleren Geschwindigkeit von 68 km/h beobachtet (vgl. Anhang 5.10). Insgesamt lagen die Geschwindigkeiten zwischen 60 km/h und 80 km/h. Ein Übergang in den instabilen Verkehrszustand wurde nicht verzeichnet.

Die im **Mainspitz Dreieck** an der A 60 in Fahrtrichtung Rüsselsheim betrachtete Einfahrt vom Einfahrtstyp E 4 ist nicht richtlinienkonform ausgebildet. Der betrachtete stationäre Messquerschnitt in den Einfädelsstreifen befindet sich ca. 820 m oberhalb der Trennselnspitze. In dieser Einfahrt wurden Verkehrsstärken von bis zu 157 Pkw-E/5min gemessen (vgl. Anhang 5.10). Gleichzeitig konnte eine zugehörige mittlere Geschwindigkeit von 86 km/h beobachtet werden, wobei das Geschwindigkeitsniveau insgesamt zwischen 85 km/h und 100 km/h lag. Es wurden keine Übergänge in instabile Verkehrszustände beobachtet.

Im **Mainspitz Dreieck** wurde eine weitere nicht richtlinienkonform ausgebildete Einfahrt vom Einfahrtstyp E 4 betrachtet. Diese Einfahrt befindet sich an der A 671 in Fahrtrichtung Wiesbaden. Der stationäre Messquerschnitt in den Einfädelungstreifen liegt ca. 630 m oberhalb der Trenninselspitze. In den Einfädelungstreifen wurde eine maximale Verkehrsstärke von 177 Pkw-E/5min mit einer zugehörigen mittleren Geschwindigkeit von 87 km/h beobachtet (vgl. Anhang 5.11). Die mittleren Geschwindigkeiten im stabilen Verkehrszustand lagen zwischen 75 km/h und 100 km/h. Es wurden außerdem Übergänge in instabile Verkehrszustände erfasst.

Wie bereits in Ziffer 5.1 beschrieben, können für den Einfahrtstyp E 4 keine Aussagen bezüglich der Einfädelungsverkehrsstärke getroffen werden. Es wird lediglich die Einfahrverkehrsstärke betrachtet. Die Ergebnisse sind in der Tab. 5.8 zusammenfassend dargestellt. Dabei konnten in zwei der vier Untersuchungsstellen Übergänge in instabile Verkehrszustände verzeichnet werden. Die in diesen Untersuchungsstellen beobachteten maximalen Einfahrverkehrsstärken und die zugehörigen mittleren Geschwindigkeiten sind sehr unterschiedlich. In beiden Einfahrten beträgt die zulässige Höchstgeschwindigkeit in der Einfahrrampe 100 km/h. Die niedrigeren Verkehrsstärken können vermutlich auf die nicht richtlinienkonforme Ausbildung der Einfahrt im Mainspitz Dreieck zurückgeführt werden. In den weiteren Ausführungen sollen diese Untersuchungsstellen daher nicht berücksichtigt werden.

Tab. 5.8: Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf für den Einfahrtstyp E 4

Untersuchungsstelle	$q_{E,max}$ [Pkw-E/5min]	v bei $q_{E,max}$ [km/h]	Gibt es Übergänge in den instabilen Verkehrszustand?
Mönchhof Dreieck A 3 Fahrtrichtung Frankfurt/Main	332	100	ja
AK Neufahrn A 92 Fahrtrichtung Stuttgart	136	68	nein
Mainspitz Dreieck * A 60 Fahrtrichtung Rüsselsheim	157	86	nein
Mainspitz Dreieck * A 671 Fahrtrichtung Wiesbaden	177	87	ja

* Ausbildung der Einfahrt ist nicht richtlinienkonform

5.3.4 Einfahrtstyp E 5

Für den Einfahrtstyp E 5 wurden an zwei Untersuchungsstellen empirische Untersuchungen zum Verkehrsablauf durchgeführt (vgl. Anhang 4.22 und 4.23).

Die im **AK München-Nord** betrachtete Einfahrt vom Einfahrtstyp E 5 liegt an der A 9 in Fahrtrichtung Nürnberg. Der betrachtete stationäre Messquerschnitt in den Einfädelungstreifen befindet sich ca. 290 m oberhalb der Trenninselspitze. In dieser Einfahrt wurden Einfahrverkehrsstärken im stabilen Verkehrszustand von bis zu 295 Pkw-E/5min mit einer zugehörigen mittleren Geschwindigkeit von 90 km/h beobachtet (vgl. Anhang 5.11). Die

Geschwindigkeiten im stabilen Verkehrszustand lagen zwischen 80 km/h und 140 km/h. Darüber hinaus wurden zahlreiche Übergänge in instabile Verkehrszustände beobachtet.

Im **Offenbacher Kreuz** wurde eine weitere Einfahrt vom Einfahrtstyp E 5 untersucht. Diese Einfahrt liegt an der A 661 in Fahrtrichtung Bad Homburg. Der stationäre Messquerschnitt in den Einfädelungstreifen befindet sich ca. 600 m oberhalb der Trenninselspitze. In der Einfahrt wurde eine maximale Verkehrsstärke von 297 Pkw-E/5min mit einer zugehörigen mittleren Geschwindigkeit von 64 km/h beobachtet (vgl. Anhang 5.12). Die Geschwindigkeiten im stabilen Verkehrszustand lagen zwischen 50 km/h und 70 km/h. Auch in dieser Einfahrt vom Einfahrtstyp E 5 wurden Übergänge in instabile Verkehrszustände erfasst.

Die Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf für den Einfahrtstyp E 5 sind in der Tab. 5.9 zusammenfassend dargestellt. Für diesen Einfahrtstyp liegt eine umfangreiche Datenbasis mit den relevanten Daten im Bereich hoher Verkehrsstärken sowie mit Übergängen in instabile Verkehrszustände vor. Das Geschwindigkeitsniveau ist in beiden Untersuchungsstellen sehr unterschiedlich. Dies kann damit begründet werden, dass die Einfahrt im Offenbacher Kreuz innerhalb des Autobahnknotenpunkts oben liegt und eine stark ansteigende Einfahrrampe besitzt. Dennoch weisen beide Untersuchungsstellen gleich hohe Verkehrsstärken im Bereich der Kapazität auf.

Tab. 5.9: Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf für den Einfahrtstyp E 5

Untersuchungsstelle	$q_{E,max}$ [Pkw-E/5min]	v bei $q_{E,max}$ [km/h]	Gibt es Übergänge in den instabilen Verkehrszustand?
AK München-Nord A 9 Fahrtrichtung Nürnberg	295	90	ja
Offenbacher Kreuz A 661 Fahrtrichtung Homburg	297	64	ja

5.4 Fazit

In der vorliegenden Arbeit wurden empirische Untersuchungen zum Verkehrsablauf in insgesamt zwölf Ausfahrten der Ausfahrtstypen A 1 bis A 5 durchgeführt. Dabei konnte für die Ausfahrtstypen A 1, A 2 und A 4 eine umfangreiche Datenbasis geschaffen werden. Es liegen Daten im Bereich hoher Verkehrsstärken vor, sodass die geschaffene Datenbasis als Grundlage für die Überprüfung und Weiterentwicklung der Bemessungsverfahren herangezogen werden kann.

Für die Ausfahrtstypen A 3 und A 5 stand jeweils eine Untersuchungsstelle zur Verfügung. Während in der Ausfahrt vom Ausfahrtstyp A 5 die relevanten Daten im Bereich der Kapazität beobachtet werden konnten, wurden in der Ausfahrt vom Ausfahrtstyp A 3 lediglich niedrige Verkehrsstärken verzeichnet. Für diese Ausfahrtstypen können in den folgenden Untersuchungen lediglich Tendenzen aufgezeigt werden.

Darüber hinaus wurden empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf in insgesamt elf Einfahrten der Einfahrttypen E 1 bis E 5 durchgeführt. Für die Einfahrttypen E 1 / E 2, E 4 und E 5 konnte eine umfangreiche Datenbasis geschaffen werden, die die relevanten Daten im Bereich hoher Verkehrsstärken aufweist. Eine Überprüfung und Weiterentwicklung der Bemessungsverfahren anhand der Einfädelungsverkehrsstärke ist für den Einfahrttyp E 4 aufgrund der ungünstigen Lage der vorhandenen stationären Messquer-schnitte jedoch nicht möglich. Somit kann nur für die Einfahrttypen E 1 / E 2 und E 5 eine Überprüfung und Weiterentwicklung der Bemessungsverfahren erfolgen.

Für den Einfahrttyp E 3 stand eine Untersuchungsstelle zur Verfügung. Die Daten im Bereich der Kapazität wurden beobachtet, dennoch können auf der Grundlage dieser Datenbasis nur Tendenzen für die Bemessung abgeleitet werden.

6 Überprüfung der Bemessungsverfahren

6.1 Überblick

Die Überprüfung der Bemessungsverfahren für die Aus- und Einfahrten bezieht sich ausschließlich auf die im HBS 2001 [24] enthaltenen Bemessungsansätze.

Zunächst werden für die einzelnen Aus- und Einfahrtstypen die im HBS 2001 angegebenen Werte für die Kapazität mit den Ergebnissen der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf verglichen (vgl. Ziffer 5). Die im HBS 2001 angegebenen Werte für die Kapazität sind auf bereits beschriebene Forschungsarbeiten zurückzuführen [9][64]. In diesen Arbeiten wurde die Kapazität mit Hilfe von q-v-Diagrammen ermittelt. Es ist zu berücksichtigen, dass in beiden Untersuchungen bei der Ermittlung der Kapazität nicht mit einem Instationaritätsfaktor gearbeitet wurde (vgl. Ziffer 4.3).

Für die Bemessung von Einfahrten ist insbesondere die Abbildung des Einfädelungsvorgangs von Bedeutung. Die einfahrenden Kraftfahrzeuge müssen sich während des Einfädelungsvorgangs in den Verkehrsstrom im rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn einordnen. Aus diesem Grund hat die Verteilung des Kraftfahrzeugverkehrs in der Hauptfahrbahn einen entscheidenden Einfluss auf den Einfädelungsvorgang. Auch die diesbezüglich im HBS 2001 dargestellten Zusammenhänge werden in den folgenden Ausführungen überprüft.

6.2 Überprüfung der Kapazität

6.2.1 Ausfahrten

Im HBS 2001 werden für die Beurteilung der Qualität des Verkehrsablaufs in Ausfahrten drei kritische Bereiche genannt (vgl. Ziffer 3.6.1). Die maximale Ausfädelungsverkehrsstärke und die Kapazität der Ausfahrtrampe werden dabei zusammenfassend betrachtet. Für die Kapazität der Hauptfahrbahn unterhalb der Ausfahrt, die nur bei einer Fahrstreifenreduktion in der Ausfahrt von Bedeutung ist, gelten die Grundsätze der freien Strecke außerhalb der Knotenpunkte. Darüber hinaus gelten die Werte für alle Ausfahrtstypen nur für Schwerverkehrsanteile bis zu 20 %. Ist der Schwerverkehrsanteil höher, sind sämtliche Werte um 10 % zu verringern [24].

Im HBS 2001 wird davon ausgegangen, dass beim **Ausfahrtstyp A 1** ein stabiler Verkehrsablauf mit einer ausreichenden Qualität des Verkehrsablaufs bis zu einer Verkehrsstärke von 1.500 Kfz/h möglich ist. Die Tab. 6.1 zeigt, dass die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Ausfahrten vom Ausfahrtstyp A 1 eine Kapazität von maximal 1.940 Kfz/h bei

einem Schwerverkehranteil von 24 % aufweisen. Ein deutlicher Unterschied konnte bei dem Vergleich zwischen einem Ausfahrttyp A 1 in einer Anschlussstelle und einem Autobahnknotenpunkt festgestellt werden. In der untersuchten Anschlussstelle wurde eine deutlich niedrigere maximale Verkehrsstärke beobachtet. Für den Ausfahrttyp A 1 in einem Autobahnknotenpunkt ist daher anzumerken, dass die Kapazität durchaus höher als im HBS 2001 angenommen werden kann.

Tab. 6.1: Überprüfung der Kapazität für den Ausfahrttyp A 1

Untersuchungsstelle	$q_{A,max}$ [Kfz/5min]	$q_{A,max}$ [Kfz/h]	$q_{A,max}^*$ [Kfz/h]	SV-Anteil bei $q_{A,max}$ [%]
AS Friedberg A 5 Fahrtrichtung Kassel	140	1.680	1.400	10,7
Viernheimer Dreieck A 67 Fahrtrichtung Stuttgart	169	2.028	1.690	10,7
Bad Homburger Kreuz A 5 Fahrtrichtung Basel	194	2.328	1.940	24,0

* Berücksichtigung des Instationaritätsfaktors [36]

Für den **Ausfahrttyp A 2** wird im HBS 2001 eine Verkehrsstärke von 2.550 Kfz/h als Kapazität angegeben. Dieser Wert gilt jedoch nur bei richtlinienkonformer Beschilderung und bei Schwerverkehrsanteilen von weniger als 20 %. Die Auswertung der Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf in der Tab. 6.2 zeigt, dass ein stabiler Verkehrsablauf bis zu einer Verkehrsstärke von 2.940 Kfz/h beobachtet wurde. In Bezug auf die betrachtete Ausfahrt im AD Hannover-Süd wurde bereits in zurückliegenden Untersuchungen auf die nicht richtlinienkonforme Beschilderung hingewiesen [64]. In dieser Ausfahrt wurde auch in der vorliegenden Arbeit eine deutlich niedrigere maximale Verkehrsstärke beobachtet. Für die anderen beiden Untersuchungsstellen zeigt die Tab. 6.2 deutlich höhere Werte als bisher im HBS 2001 angegeben werden. Für diesen Ausfahrttyp kann die Kapazität daher gegebenenfalls höher als bisher angesetzt werden.

Tab. 6.2: Überprüfung der Kapazität für den Ausfahrttyp A 2

Untersuchungsstelle	$q_{A,max}$ [Kfz/5min]	$q_{A,max}$ [Kfz/h]	$q_{A,max}^*$ [Kfz/h]	SV-Anteil bei $q_{A,max}$ [%]
AS Hannover-Lahe A 2 Fahrtrichtung Berlin	272	3.264	2.720	7,7
AD Hannover-Süd A 7 Fahrtrichtung Hamburg	218	2.616	2.180	2,3
Mönchhof Dreieck A 67 Fahrtrichtung Frankfurt/M.	294	3.528	2.940	15,3

* Berücksichtigung des Instationaritätsfaktors [36]

Für den **Ausfahrttyp A 3** können aus den in Ziffer 5.2.3 genannten Gründen lediglich Tendenzen bezüglich der Kapazität abgeleitet werden. Im HBS 2001 wird die Kapazität für diesen Ausfahrttyp mit 3.000 Kfz/h angegeben. Im AK Neufahrn wurden Verkehrsstärken bis zu 2.556 Kfz/h bei stabilem Verkehrszustand beobachtet. Bei dieser Verkehrsstärke war bereits ein deutlicher Rückgang der Geschwindigkeiten zu verzeichnen.

Gemäß der Tab. 3.2 entspricht die beobachtete Verkehrsstärke der Qualitätsstufe D, die ebenfalls in etwa den beobachteten Verkehrszustand darstellt.

Beim **Ausfahrttyp A 4** ist gemäß dem HBS 2001 mit einer Verkehrsstärke von 3.000 Kfz/h eine ausreichende Qualität des Verkehrsablaufs zu erwarten. Die Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf in Tab. 6.3 verdeutlichen, dass im Rahmen der empirischen Untersuchungen in einer Untersuchungsstelle bei deutlich niedrigeren Verkehrsstärken und in einer Untersuchungsstelle bei etwas höheren Verkehrsstärken die Kapazität erreicht wurde. Im Vergleich zu den Ergebnissen für den Ausfahrttyp A 2 ist jedoch davon auszugehen, dass die im AK München-Nord gemessenen Verkehrsstärken als realistisch einzustufen sind. Die bisher angegebene Kapazität von 3.000 Kfz/h kann somit durchaus bestätigt werden. Eventuell kann die Kapazität sogar etwas höher eingeschätzt werden.

Tab. 6.3: Überprüfung der Kapazität für den Ausfahrttyp A 4

Untersuchungsstelle	$q_{A,max}$ [Kfz/5min]	$q_{A,max}$ [Kfz/h]	$q_{A,max}^*$ [Kfz/h]	SV-Anteil bei $q_{A,max}$ [%]
AK München-Nord A 9 Fahrtrichtung München	310	3.720	3.100	15,2
Wiesbadener Kreuz A 3 Fahrtrichtung Frankfurt/Main	226	2.712	2.260	10,6

* Berücksichtigung des Instationaritätsfaktors [36]

Für den **Ausfahrttyp A 5** können aus den in Ziffer 5.2.5 genannten Gründen lediglich Tendenzen bezüglich der Kapazität abgeleitet werden. Im HBS 2001 werden über diesen Ausfahrttyp keine Angaben gemacht. In der vorliegenden Arbeit wurde eine maximale Verkehrsstärke von 1.940 Kfz/h beobachtet, gleichzeitig konnten auch Übergänge in instabile Verkehrszustände verzeichnet werden. Die gemessene maximale Verkehrsstärke stellt im Vergleich zu den übrigen zweistreifigen Ausfahrten keine realistische Einschätzung der Kapazität für diesen Ausfahrttyp dar.

6.2.2 Einfahrten

Im HBS 2001 sind für die Beurteilung der Qualität des Verkehrsablaufs in Einfahrten zwei kritische Bereiche von Bedeutung (vgl. Ziffer 3.6.1). Dabei handelt es sich um die maximale Einfädelungsverkehrsstärke und um die Kapazität der Hauptfahrbahn unterhalb der Einfahrt. Die zulässige Einfädelungsverkehrsstärke für die Qualitätsstufe E beträgt 2.200 Pkw-E/h. Zusätzlich ist die Einfädelungsgeschwindigkeit von Bedeutung. Beträgt diese weniger als 60 km/h, wird von einer Kapazität von 2.000 Pkw-E/h ausgegangen. Für die Kapazität der Hauptfahrbahn unterhalb der Einfahrt gelten die Grundsätze der freien Strecke außerhalb der Knotenpunkte.

Die Tab. 6.4 zeigt, dass die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Einfahrten vom Einfahrttyp E 1 eine Kapazität von maximal 2.180 Pkw-E/h mit einer zugehörigen Einfäde-

lungsgeschwindigkeit von 74 km/h aufweisen. Dies entspricht der im HBS 2001 angegebenen Kapazität. Außerdem zeigt die Tab. 6.4, dass bei einer Einfädungsgeschwindigkeit von weniger als 60 km/h eine geringere Kapazität anzusetzen ist. Allerdings konnte für diesen Fall eine Einfädungsverkehrsstärke von mehr als 2.000 Pkw-E/h gemessen werden. Insgesamt können die Angaben im HBS 2001 bezüglich der maximalen Einfädungsverkehrsstärke bestätigt werden.

Tab. 6.4: Überprüfung der Kapazität für den Einfahrtstyp E 1

Untersuchungsstelle	$q_{M,max}$ [Pkw-E/5min]	$q_{M,max}$ [Pkw-E/h]	$q_{M,max}^*$ [Pkw-E/h]	v bei $q_{M,max}$ [km/h]
AS Friedberg A 5 Fahrtrichtung Kassel	209	2.508	2.090	54
AS Garching-Süd A 9 Fahrtrichtung Nürnberg	218	2.616	2.180	74

* Berücksichtigung des Instationaritätsfaktors [36]

Für den **Einfahrtstyp E 4** kann aus den in Ziffer 5.3.3 beschriebenen Gründen keine Überprüfung der Einfädungsverkehrsstärke vorgenommen werden.

Für die **Einfahrtstypen E 3, E 4 und E 5** wurden die Verkehrsstärken in den Einfahrampen empirisch ermittelt. Im HBS 2001 wird die Kapazität einer einstreifigen Verteilerfahrbahn mit 1.800 Pkw-E/h angegeben.

In der Tab. 6.5 werden die maximalen Verkehrsstärken in den Untersuchungsstellen der Einfahrtstypen E 3, E 4 und E 5 in denen die Kapazität erreicht wurde dargestellt. Das Mainspitz Dreieck wird aus den in Ziffer 5.3.3 genannten Gründen bei der Betrachtung nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse zeigen, dass in der einstreifigen Einfahrt eine niedrigere maximale Verkehrsstärke als die oben beschriebene Kapazität beobachtet wurde. Die Werte liegen jedoch deutlich unter den Verkehrsstärken, die erfahrungsgemäß abgewickelt werden können. Für die zweistreifige Verbindungsrampe ergibt sich eine maximale Verkehrsstärke von ca. 3.000 Pkw-E/h, wobei in einer Untersuchungsstelle noch deutlich höhere Werte verzeichnet werden konnten.

Tab. 6.5: Verkehrsstärken in den Einfahrampen, Einfahrttypen E 3, E 4 und E 5

Untersuchungsstelle		$q_{E,max}$ [Pkw-E/5min]	$q_{E,max}$ [Pkw-E/h]	$q_{E,max}^*$ [Pkw-E/h]
Wiesbadener Kreuz A 3 Fahrtrichtung Frankfurt/Main	E 3	180	2.160	1.800
Mönchhof Dreieck A 3 Fahrtrichtung Frankfurt/Main	E 4	332	3.984	3.320
AK München-Nord A 9 Fahrtrichtung Nürnberg	E 5	295	3.540	2.950
Offenbacher Kreuz A 661 Fahrtrichtung Homburg	E 5	297	3.564	2.970

* Berücksichtigung des Instationaritätsfaktors [36]

6.3 Überprüfung des Einfädelungsvorgangs

Die Beurteilung der Qualität des Verkehrsablaufs anhand der Einfädelungsverkehrsstärke kann lediglich vorgenommen werden, wenn fahstreifenbezogene Verkehrsstärken für die Hauptfahrbahn oberhalb der Einfahrt vorliegen. In den meisten Fällen liegen jedoch querschnittsbezogene Daten vor, sodass die Verkehrsstärke im rechten Fahstreifen der Hauptfahrbahn geschätzt werden muss. Ein funktionaler Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke in der Hauptfahrbahn und der Verkehrsstärke im rechten Fahstreifen der Hauptfahrbahn liegt den Bildern 3.8, 3.9 und 3.10 zugrunde. Diese Bemessungsdiagramme ermöglichen eine Beurteilung der Qualität des Verkehrsablaufs in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke in der Einfahrt und der Verkehrsstärke in der Hauptfahrbahn oberhalb der Einfahrt. Im Folgenden werden beide Ansätze zunächst miteinander verglichen. Anschließend werden die funktionalen Zusammenhänge zwischen der Verkehrsstärke und dem rechten Fahstreifen der Hauptfahrbahn überprüft.

Zum Vergleich der beiden Bemessungsansätze werden für die Einfahrttypen E 1 und E 2 an zwei- und dreistreifigen Hauptfahrbahnen unter Verwendung von jeweils drei Beispielen mit unterschiedlichen Verkehrsstärken in der Hauptfahrbahn und in der Einfahrt die Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs ermittelt. Die verwendeten Daten stammen aus der in Ziffer 5.3.1 beschriebenen Datenbasis aus den Untersuchungsstellen im Viernheimer Dreieck (Einfahrttyp E 2, dreistreifige Hauptfahrbahn) und in der AS Oberschleißheim (Einfahrttyp E 1, zweistreifige Hauptfahrbahn). Die Qualitätsstufe wird einerseits anhand der Bilder 3.8 und 3.9 mit den Eingangsgrößen q_H und q_E abgelesen. Andererseits wird die Einfädelungsverkehrsstärke q_M gemäß der Tab. 3.5 berechnet und die Qualitätsstufe anhand der Tab. 3.6 ermittelt. Die Ergebnisse sind in den nachfolgenden Tabellen dargestellt.

Tab. 6.6: Vergleich der Bemessungsansätze für den Einfahrtstyp E 2 (dreistreifige Hauptfahrbahn)

Eingangsparameter [Pkw-E/h]	Viernheimer Dreieck Einfahrtstyp E 2, dreistreifige Hauptfahrbahn					
	Beispiel 1		Beispiel 2		Beispiel 3	
q_H	1.872		1.932		2.554	
q_{H1}		732		732		768
q_E	1.452	1.452	1.008	1.008	1.620	1.620
q_M		2.184		1.740		2.006
Qualitätsstufe	Bild 3.7	Tab. 3.6	Bild 3.7	Tab. 3.6	Bild 3.7	Tab. 3.6
	D	E	C	D	E	E

Tab. 6.7: Vergleich der Bemessungsansätze für den Einfahrtstyp E 1 (zweistreifige Hauptfahrbahn)

Eingangsparameter [Pkw-E/h]	AS Oberschleißheim Einfahrtstyp E 1, zweistreifige Hauptfahrbahn					
	Beispiel 1		Beispiel 2		Beispiel 3	
q_H	1.332		2.076		3.540	
q_{H1}		852		732		1.272
q_E	696	696	516	516	624	624
q_M		1.548		1.248		1.896
Qualitätsstufe	Bild 3.8	Tab. 3.6	Bild 3.8	Tab. 3.6	Bild 3.8	Tab. 3.6
	C	C	C	C	E	D

Die Tab. 6.6 und die Tab. 6.7 zeigen, dass die in den einzelnen Beispielen ermittelten Qualitätsstufen in einigen Fällen nicht übereinstimmen. Für einen direkten Vergleich der beiden Bemessungsansätze muss zunächst ermittelt werden, auf welcher Grundlage die Bilder 3.8 und 3.9 erstellt wurden. Den Bemessungsdiagrammen im HBS 2001 liegt folgender funktionale Zusammenhang zugrunde:

$$q_E = q_M - q_{H1} \quad (\text{Gl. 6.1})$$

Für den Einfahrtstyp E 1 / E 2 an zwei- und dreistreifigen Hauptfahrbahnen sowie für den Einfahrtstyp E 4 an zweistreifigen Hauptfahrbahnen werden im HBS 2001 basierend auf der Gleichung 6.1 die in den Gleichungen 6.2 bis 6.4 angegebenen Funktionen zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt q_E und der Verkehrsstärke in der Hauptfahrbahn q_H genannt. Die Funktionen stellen die Grenze zwischen den Qualitätsstufen E und F dar.

Einfahrtstyp E 1 / E 2 (dreistreifige Hauptfahrbahn):

$$q_E = 2.360 - 0,248 \cdot q_H \quad (\text{Gl. 6.2})$$

Einfahrttyp E 1 / E 2 (zweistreifige Hauptfahrbahn):

$$q_E = 2.017 - 0,335 \cdot q_H \quad (\text{Gl. 6.3})$$

Einfahrttyp E 4 (zweistreifige Hauptfahrbahn):

$$q_E = 3.021 - 0,502 \cdot q_H \quad (\text{Gl. 6.4})$$

Die in den Bildern 3.7 bis 3.9 grafisch dargestellten Funktionen zur Abgrenzungen der Qualitätsstufen A bis E werden aus den zuvor dargestellten Gleichungen unter Verwendung der Auslastungsgrade für die einzelnen Qualitätsstufen (vgl. Tab. 3.1) gebildet.

Den Gleichungen 6.2 bis 6.4 liegt ein funktionaler Zusammenhang zur Beschreibung der Verkehrsstärke im rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn in Abhängigkeit von der Gesamtverkehrsstärke zugrunde. Die Gleichungen 6.5 bis 6.7 zeigen diese funktionalen Zusammenhänge für die Einfahrttypen E 1 / E 2 und E 4.

Einfahrttyp E 1 / E 2 (dreistreifige Hauptfahrbahn):

$$q_{H1} = - 160 + 0,248 \cdot q_H \quad (\text{Gl. 6.5})$$

Einfahrttyp E 1 / E 2 (zweistreifige Hauptfahrbahn):

$$q_{H1} = 183 + 0,335 \cdot q_H \quad (\text{Gl. 6.6})$$

Einfahrttyp E 4 (zweistreifige Hauptfahrbahn):

$$q_{H1} = - 821 + 0,502 \cdot q_H \quad (\text{Gl. 6.7})$$

Die Gleichungen 6.5 bis 6.7 weisen einen konstanten Anteil und einen von der Verkehrsstärke abhängigen Anteil auf. Aus diesem Grund wird die Randbedingung, dass die Verkehrsstärke im rechten Fahrstreifen gleich null sein muss, wenn die Verkehrsstärke in der Hauptfahrbahn gleich null ist, nicht erfüllt. Darüber hinaus ergibt sich aus den Gleichungen 6.5 und 6.7, dass für kleine Verkehrsstärken in der Hauptfahrbahn eine negative Verkehrsstärke im rechten Fahrstreifen ermittelt wird. Insbesondere für den Einfahrttyp E 4 liefert der im HBS 2001 verwendete Zusammenhang unplausible Ergebnisse, denn aus der Gleichung 6.7 ergibt sich erst ab einer Verkehrsstärke in der Hauptfahrbahn von ca. 1.600 Pkw-E/h ein positiver Wert für die Verkehrsstärke im rechten Fahrstreifen. Für den Einfahrttyp E 1 / E 2 an zweistreifigen Hauptfahrbahnen wird durch die Gleichung 6.6 dagegen bei sehr kleinen Verkehrsstärken in der Hauptfahrbahn (< 275 Pkw-E/h) eine Verkehrsstärke im rechten Fahrstreifen ermittelt, die größer als die Verkehrsstärke in der Hauptfahrbahn ist. Diese Unplausibilität wird jedoch für das im HBS 2001 beschriebene Bemessungsverfahren nicht relevant, da der Gültigkeitsbereich der Bemessungsdiagramme (vgl. Bild 3.7 bis 3.9) je nach Einfahrttyp und Qualitätsstufe erst bei einer Verkehrsstärke in der Hauptfahrbahn zwischen 400 und 2.200 Pkw-E/h beginnt.

Für den Einfahrtstyp E 1 / E 2 an zwei- und dreistreifigen Hauptfahrbahnen kann unter Verwendung der in Ziffer 5.3.1 beschriebenen Datenbasis überprüft werden, wie gut die Gleichungen 6.5 und 6.6 die im Rahmen der vorliegenden Arbeit gemessenen Daten repräsentieren. Für den Einfahrtstyp E 4 wird diese Überprüfung aufgrund der in Ziffer 5.1 beschriebenen Problematik nicht durchgeführt. Im Bild 6.1 und im Bild 6.2 werden die empirisch erhobenen Verkehrsstärken im rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke in der Hauptfahrbahn für den Einfahrtstyp E 1 / E 2 an zwei- und dreistreifigen Hauptfahrbahnen dargestellt. Unter Verwendung der Gleichungen 6.5 und 6.6 werden gleichzeitig die Verkehrsstärken im rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahnen berechnet und den gemessenen Daten gegenüber gestellt.

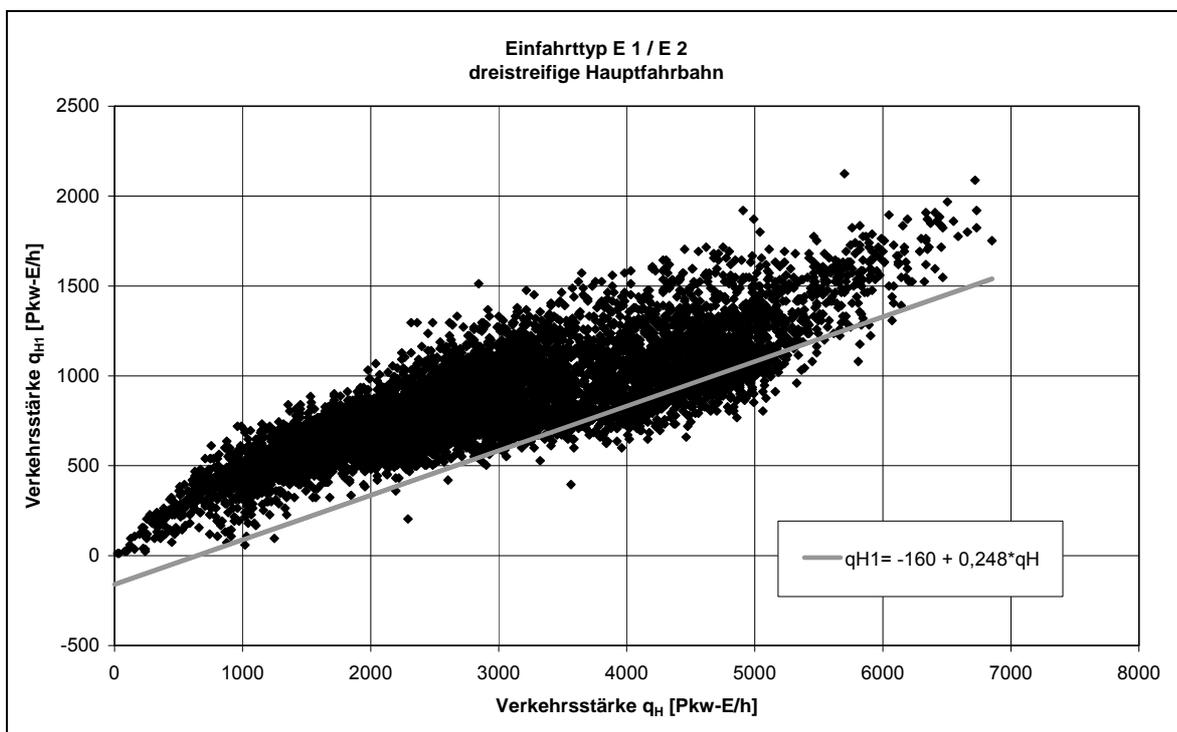


Bild 6.1: Verkehrsstärke im rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn, Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Werten (HBS 2001) für den Einfahrtstyp E 1 / E 2 an dreistreifigen Hauptfahrbahnen

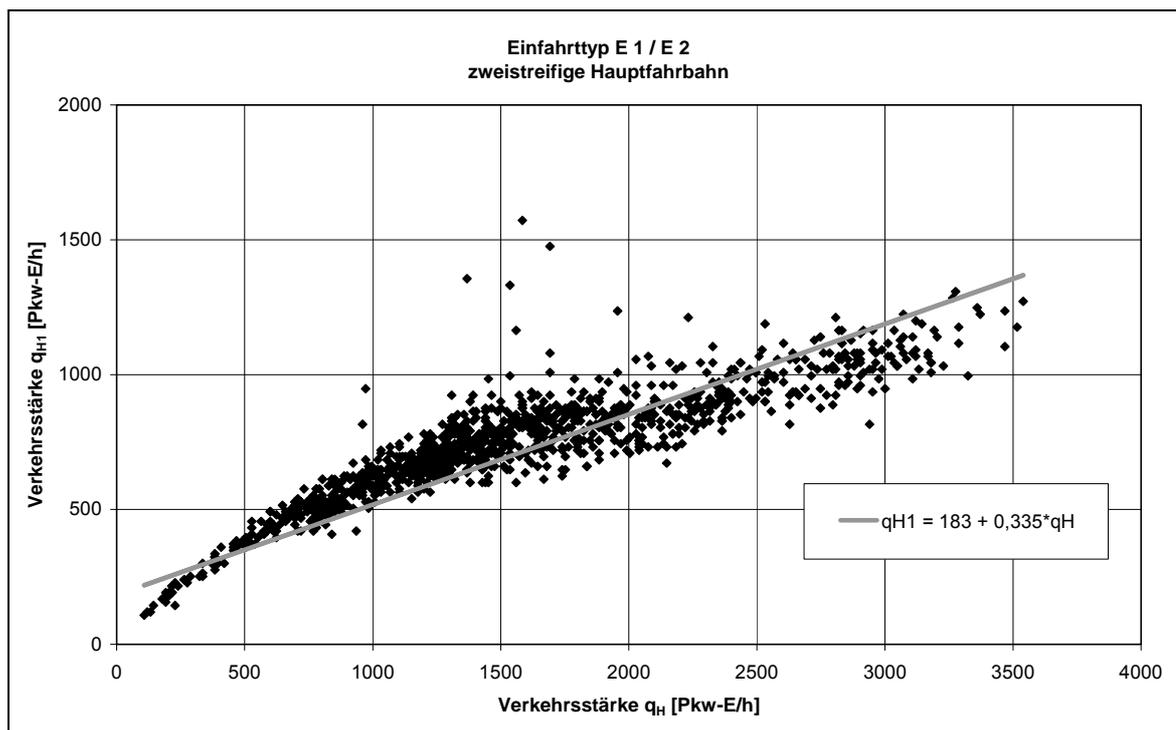


Bild 6.2: Verkehrsstärke im rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn, Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Werten (HBS 2001) für den Einfahrttyp E 1 an zweistreifigen Hauptfahrbahnen

Im Bild 6.1 wird der Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke in der Hauptfahrbahn und der Verkehrsstärke im rechten Fahrstreifen für den Einfahrttyp E 1 / E 2 an dreistreifigen Hauptfahrbahnen dargestellt. Es wird deutlich, dass der in der Gleichung 6.5 beschriebene Zusammenhang durchgängig zu niedrige Verkehrsstärken für den rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn liefert. Der im Bild 6.2 dargestellte Zusammenhang für den Einfahrttyp E 1 / E 2 an zweistreifigen Hauptfahrbahnen beschreibt die empirisch ermittelten Daten dagegen besser. Allerdings ist für diesen Zusammenhang festzuhalten, dass die Verkehrsstärke im rechten Fahrstreifen zu niedrig geschätzt wird, wenn die Verkehrsstärke in der Hauptfahrbahn kleiner als ca. 2.000 Pkw-E/h ist. Bei Verkehrsstärken von mehr als ca. 2.000 Pkw-E/h wird die Verkehrsstärke im rechten Fahrstreifen hingegen etwas zu hoch eingeschätzt.

Vergleicht man die im Bild 6.1 dargestellten Zusammenhänge mit der aus zurückliegenden Forschungsarbeiten bekannten Fahrstreifenaufteilung für dreistreifige Hauptfahrbahnen (vgl. Bild 3.6), zeigt sich, dass die von BUSCH [14] ermittelten Zusammenhänge die im Rahmen der vorliegenden Arbeit gemessenen Daten ebenfalls nur sehr ungenau wiedergeben. Bei kleinen Verkehrsstärken in der Hauptfahrbahn wird die Verkehrsstärke im rechten Fahrstreifen allerdings besser als im HBS 2001 eingeschätzt. Bei großen Verkehrsstärken in der Hauptfahrbahn wird die Verkehrsstärke im rechten Fahrstreifen von BUSCH jedoch unterschätzt. Bei der von SPARMANN [68] ermittelten Fahrstreifenaufteilung für zweistreifige Hauptfahrbahnen (vgl. Bild 3.5) wird dagegen bei

kleinen Verkehrsstärken die Verkehrsstärke im rechten Fahrstreifen unterschätzt, während sie bei großen Verkehrsstärken in der Hauptfahrbahn ungefähr den gemessenen Daten entspricht. Insgesamt kann festgestellt werden, dass die in der Literatur beschriebenen Zusammenhänge für Autobahnabschnitte außerhalb der Knotenpunkte nicht auf die Knotenpunkte übertragen werden können.

6.4 Fazit

Bei der Überprüfung der für die einzelnen Aus- und Einfahrttypen im HBS 2001 angegebenen Kapazitäten mit den Ergebnissen der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf zeigt sich, dass für den Ausfahrttyp A 1 innerhalb eines Autobahnknotenpunkts eine höhere Kapazität angenommen werden kann. Auch für den Ausfahrttyp A 2 können höhere maximale Verkehrsstärken als die im HBS 2001 angegebene Kapazität verzeichnet werden. Für den Ausfahrttypen A 3, für den nur eine Untersuchungsstelle zur Verfügung stand, können mit dem HBS 2001 vergleichbare Verkehrsstärken verzeichnet werden. Für den Ausfahrttyp A 4 liegen dagegen sehr uneinheitliche Ergebnisse vor. Die im HBS 2001 angegebene Kapazität konnte jedoch in einer Untersuchungsstelle bestätigt werden. Die Datenbasis für den Ausfahrttyp A 5 ist dagegen nicht geeignet, um Aussagen bezüglich der Kapazität zu treffen.

In Bezug auf die maximale Einfädelungsverkehrsstärke in den Einfahrttypen E 1 und E 2 kann die im HBS 2001 angegebene Kapazität bestätigt werden. Die in den Untersuchungsstellen der Einfahrttypen E 3, E 4 und E 5 gemessenen Verkehrsstärken in der Einfahrt geben Aufschluss über die Kapazität von Verteilerfahrbahnen. Für die einstreifige Verteilerfahrbahn können die im HBS 2001 angegebenen Werte in der Untersuchungsstelle nicht beobachtet werden. Für zweistreifige Verteilerfahrbahnen werden im HBS 2001 bisher keine Aussagen gemacht. Auf der Grundlage der vorliegenden Datenbasis kann jedoch eine maximale Verkehrsstärke abgeschätzt werden.

Kritisch anzumerken ist, dass die Kapazität in zurückliegenden Untersuchungen [64] [9] anhand der größten gemessenen Verkehrsstärke festgelegt wurde. Die Literaturanalyse hat jedoch gezeigt, dass in aktuellen Forschungsergebnissen neue Methoden zur Ermittlung der Kapazität entwickelt wurden (vgl. Ziffer 3.7). Es wird davon ausgegangen, dass sich die Kapazität durch die Wahrscheinlichkeit, dass es bei einer Verkehrsstärke zu einem Zusammenbruch des Verkehrsablaufs kommt besser beschreiben lässt als durch eine beobachtete maximale Verkehrsstärke. Da diese neuen Verfahren bei der Bemessung von Aus- und Einfahrten bisher nicht angewendet wurden, ist zu prüfen, ob sich die bisherigen Erkenntnisse bezüglich der Kapazität durch die Wahrscheinlichkeit, dass es zu einem Übergang in einen instabilen Verkehrszustand kommt, besser beschreiben lassen.

Weiterhin wurden die im HBS 2001 beschriebenen Zusammenhänge zur Abbildung des Einfädungsvorgangs überprüft. Ein Vergleich der verschiedenen Bemessungsansätze hat gezeigt, dass ihre praktische Anwendung begrenzt ist. Die verschiedenen Bemessungsansätze liefern zum Teil unterschiedliche Ergebnisse in der Beurteilung der Qualität des Verkehrsablaufs. Eine Abstimmung der Bemessungsansätze ist daher dringend erforderlich.

Die Überprüfung des Einfädungsvorgangs zeigt darüber hinaus, dass die im HBS 2001 angegebenen funktionalen Zusammenhänge für die Beschreibung der Verteilung des Verkehrs in der Hauptfahrbahn oberhalb der Einfahrt zum Teil nur unzureichend die empirisch ermittelten Daten repräsentieren. Im HBS 2001 wird davon ausgegangen, dass sich die Verkehrsstärke im rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke in der Hauptfahrbahn durch einen linearen Zusammenhang erklären lässt. Alle Verkehrsstärken werden dabei in Pkw-E/h umgerechnet, sodass ebenfalls der Schwerverkehrsanteil einen Einfluss auf die Bestimmung der Verkehrsstärke im rechten Fahrstreifen besitzt. Eine Abhängigkeit zwischen der Verkehrsstärke im rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn und der Verkehrsstärke in der Einfahrt sowie deren Schwerverkehrsanteil wird demnach im HBS 2001 nicht unterstellt. Dies entspricht nicht den Ergebnissen zurückliegender Forschungsarbeiten (vgl. Ziffer 3.5). BRILON und WESTPHAL [9] ermittelten einen Zusammenhang mit der Verkehrsstärke in der Hauptfahrbahn, der Verkehrsstärke in der Einfahrt und deren Schwerverkehrsanteilen. Im Rahmen der Weiterentwicklung der Bemessungsverfahren sollte daher ein verbesserter funktionaler Zusammenhang ermittelt werden.

Die Verwendung des Auslastungsgrads als Maß für die Beschreibung des Verkehrsablaufs in Aus- und Einfahrten erscheint sinnvoll. In den Untersuchungsstellen für die einzelnen Aus- und Einfahrtstypen wurden zum Teil sehr unterschiedliche Ausfahr-, Einfahr- und Einfädungsgeschwindigkeiten beobachtet. Eine Beurteilung des Verkehrsablaufs anhand dieser Größen wird deshalb nicht als zweckmäßig erachtet. In den weiteren Betrachtungen soll deshalb der Auslastungsgrad weiterhin als Maß für die Beschreibung des Verkehrsablaufs verwendet werden.

7 Weiterentwicklung der Bemessungsverfahren

7.1 Überblick

Aufbauend auf den zuvor durchgeführten Überprüfungen erfolgt nun eine Modifizierung der bisherigen Bemessungsverfahren. Dafür wird zunächst die Ermittlung der Kapazität für alle Aus- und Einfahrtstypen durchgeführt. Für die Einfahrten wird außerdem für die Verteilung der Verkehrsstärke im rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn ein neuer funktionaler Zusammenhang ermittelt und darauf aufbauend werden neue Bemessungsdiagramme für den Einfädeltvorgang entwickelt.

7.2 Ermittlung der Kapazität

7.2.1 Auswahl geeigneter Methoden

Für die Ermittlung der Kapazität stehen in der Literatur verschiedene Methoden zur Verfügung. Wie bereits in Ziffer 3.7 beschrieben, hängt die Anwendung dieser Methoden vom vorhandenen Datenmaterial ab. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden Verkehrsstärken, Geschwindigkeiten und Verkehrsdichten empirisch ermittelt. Das Bild 3.11 verdeutlicht, dass somit mehrere Methoden zur Anwendung kommen können.

Die Ergebnisse der Verfahren zur Schätzung der Kapazität mittels Verkehrsstärken (vgl. Ziffer 3.7.3) hängen sehr stark von der Verkehrsnachfrage ab. Da die empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf lediglich an ausgewählten Tagen und nicht durchgehend über einen langen Zeitraum durchgeführt wurden, werden diese Methoden als zu unsicher eingestuft und kommen daher nicht zur Anwendung.

Besser geeignet erscheinen hingegen die Verfahren zur Schätzung der Kapazität mittels Verkehrsstärken und Geschwindigkeiten (vgl. Ziffer 3.7.4). Derartige Verfahren sind die Product Limit Methode, die Breakdown Probability Methode und die Methode von ZURLINDEN, die eine Modifizierung der Product Limit Methode durch die Breakdown Probability Methode darstellt. Bei diesen drei Verfahren wird im Gegensatz zur Schätzung der Kapazität mittels Verkehrsstärken auch der Verkehrszustand in die Betrachtung einbezogen. Darüber hinaus liefern die Methoden nicht nur einen einzigen Kapazitätswert, sondern eine Kapazitätsverteilung. Da die Product Limit Methode lediglich zur Ermittlung der Kapazitätsverteilung in einem Engpass an zwei aufeinander folgenden Messquerschnitten angewendet werden kann, kommt der Einsatz dieser Methode in der vorliegenden Untersuchung nicht infrage. Die von ZURLINDEN modifizierte Product Limit Methode sowie die Breakdown Probability Methode sind jedoch geeignet. Dabei muss allerdings beachtet werden, dass diese beiden Methoden nur sinnvoll angewendet werden

können, wenn zahlreiche Übergänge von einem stabilen in einen instabilen Verkehrszustand vorliegen. Da diese Beobachtung nicht bei allen Untersuchungsstellen gemacht werden konnte, können die beiden Methoden nur in ausgewählten Untersuchungsstellen angewendet werden.

Weiterhin kann für die Schätzung der Kapazität die Analyse von Fundamentaldiagrammen zur Anwendung kommen. Trotz der in Ziffer 3.7.5 beschriebenen Schwächen dieser Methode erscheint eine Anwendung sinnvoll, da somit auch für die Untersuchungsstellen Aussagen bezüglich der Kapazität getroffen werden können, bei denen keine Übergänge von einem stabilen in einen instabilen Verkehrszustand vorliegen. Zur mathematischen Beschreibung der Zusammenhänge zwischen den Kenngrößen des Verkehrsablaufs wird das Modell von VAN AERDE gewählt. Wie bereits in Ziffer 3.8.3 beschrieben, wurden bei der Anwendung dieses makroskopischen Verkehrsflussmodells ebenfalls gute Ergebnisse erzielt, wenn ausschließlich Wertepaare im stabilen Bereich des Verkehrsflusses vorlagen [57]. Dieses Modell erscheint daher als gut geeignet, obwohl die bisherigen Erfahrungen lediglich spekulativen Charakter besitzen.

7.2.2 Anwendung der Breakdown Probability Methode

Bei der Breakdown Probability Methode werden die Übergänge von einem stabilen in einen instabilen Verkehrszustand betrachtet. Zunächst muss dafür die Grenzgeschwindigkeit zwischen dem stabilen und dem instabilen Verkehrszustand festgelegt werden. Dies kann einerseits durch die Analyse der q-v-Diagramme erfolgen. Andererseits kann die Grenzgeschwindigkeit durch die Analyse des Geschwindigkeitsniveaus ermittelt werden. Im Bild 7.1 ist das Geschwindigkeitsniveau im AK München Nord (Einfahrttyp E 5) über den Zeitraum von mehreren Stunden dargestellt. Es sind deutlich zwei Übergänge in instabile Verkehrszustände zu erkennen.

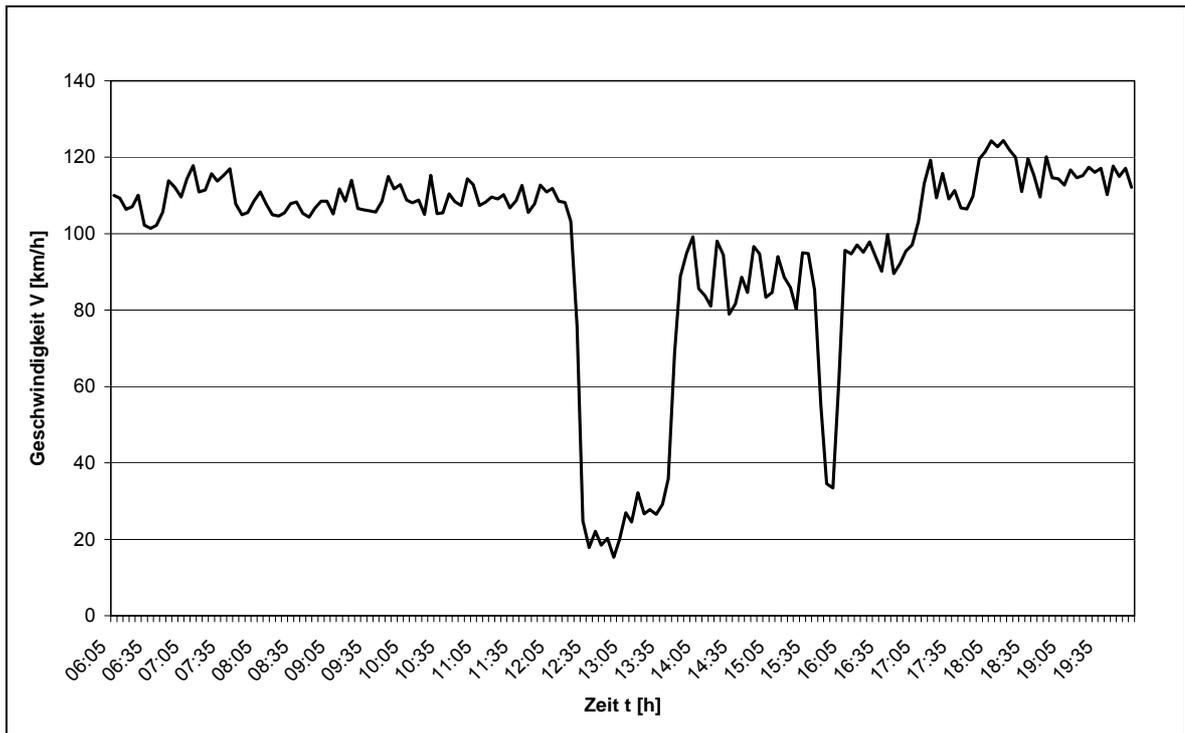


Bild 7.1: Analyse des Geschwindigkeitsniveaus, AK München Nord (Einfahrttyp E 5), 05.04.2000

Mit dem zuvor beschriebenen Vorgehen wurden für die Anwendung der Breakdown Probability Methode in der vorliegenden Untersuchung für alle Untersuchungsstellen, die Übergänge in den instabilen Verkehrszustand aufweisen, die Grenzgeschwindigkeiten ermittelt. Dabei wurden die Geschwindigkeiten in den Ausfahrrampen (A 1, A 2, A 4 und A 5), in den Einfahrrampen (E 3 und E 5) beziehungsweise die Einfädelungsgeschwindigkeit (E 1) betrachtet. Aufgrund der verschiedenen betrieblichen und zum Teil auch entwurfstechnischen Randbedingungen in den einzelnen Untersuchungsstellen sowie der unterschiedlichen Lage der zur Verfügung stehenden stationären Messquerschnitte wurden insbesondere in den Einfahrten unterschiedliche Geschwindigkeiten gemessen (vgl. Ziffer 5.3). Die Grenzgeschwindigkeit wird daher für jede Untersuchungsstelle einzeln festgelegt. Die Tab. 7.1 zeigt die für die einzelnen Untersuchungsstellen festgelegten Grenzgeschwindigkeiten.

Tab. 7.1: Untersuchungsstellen für die Anwendung der Breakdown Probability Methode und die gewählten Grenzgeschwindigkeiten v_{grenz}

Untersuchungsstelle		Grenzgeschwindigkeit v_{grenz} [km/h]	Untersuchungsstelle		Grenzgeschwindigkeit v_{grenz} [km/h]
AS Friedberg	A 1	50	AS Friedberg	E 1	50
Bad Homburger Kreuz	A 1	60	AS Garching-Süd	E 1	50
Viernheimer Dreieck	A 1	60	Wiesbadener Kreuz	E 3	60
AS Hannover-Lahe	A 2	60	AK München-Nord	E 5	70
Mönchhof Dreieck	A 2	60	Offenbacher Kreuz	E 5	50
Wiesbadener Kreuz	A 4	60			
Wiesbadener Kreuz	A 5	60			

Durch die Betrachtung des Geschwindigkeitsniveaus über den Tag kann anschließend ermittelt werden, wann die zuvor gewählte Grenzgeschwindigkeit unterschritten wurde. Die bei der Analyse des Geschwindigkeitsniveaus ermittelten Zusammenbrüche werden dann analysiert. Durch die Betrachtung eines dynamischen q-v-Diagramms (vgl. Bild 7.2) kann die Verkehrsstärke unmittelbar vor dem Übergang in den instabilen Verkehrszustand erfasst werden. Wichtig ist, dass die Verkehrsstärke unmittelbar vor dem Übergang nicht zwangsläufig die höchste des gesamten betrachteten Zeitraums ist.

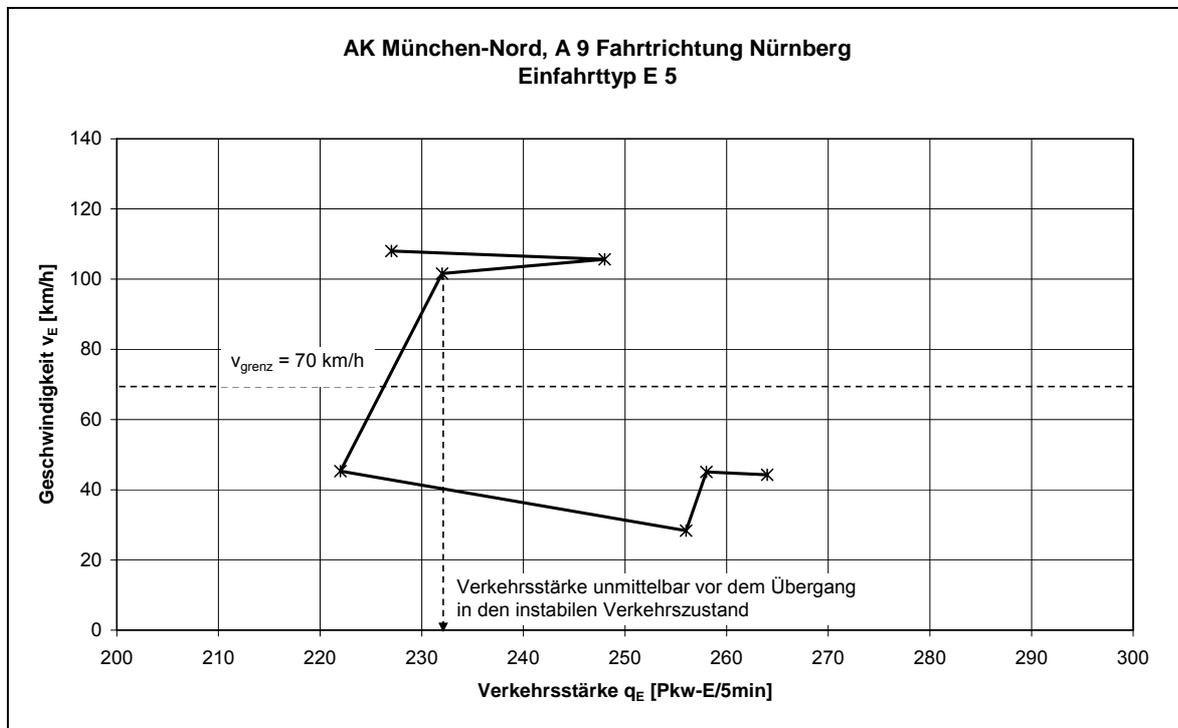


Bild 7.2: Dynamisches q-v-Diagramm, AK München Nord (Einfahrttyp E 5)

Im Bild 7.3 sind in einem q-v-Diagramm basierend auf Daten von der Untersuchungsstelle im AK München-Nord (Einfahrtstyp E 5) alle Messwerte gekennzeichnet, die einen Übergang in den instabilen Verkehrszustand nach sich zogen. Es ist zu erkennen, dass sich diese Messwerte über ein breites Verkehrsstärkespektrum erstrecken. Es ist weiterhin zu beobachten, dass in dem dargestellten Beispiel die maximal gemessene Verkehrsstärke einen Übergang in einen instabilen Verkehrszustand nach sich zog. Im Anhang 7.1 bis 7.7 sind für alle Untersuchungsstellen die entsprechenden q-v-Diagramme dargestellt, in denen die Messwerte, die einen Übergang von einem stabilen in einen instabilen Verkehrszustand darstellen, hervorgehoben werden. Bei der Anwendung dieses Verfahrens in den Einfahrten ist darüber hinaus darauf zu achten, dass die ermittelten Übergänge nicht durch einen Rückstau aus der Hauptfahrbahn unterhalb der Einfahrt resultieren. Für die Ausfahrten kann diese Überprüfung nicht durchgeführt werden, da in den betrachteten Ausfahrrampen lediglich ein Messquerschnitt zur Verfügung steht.

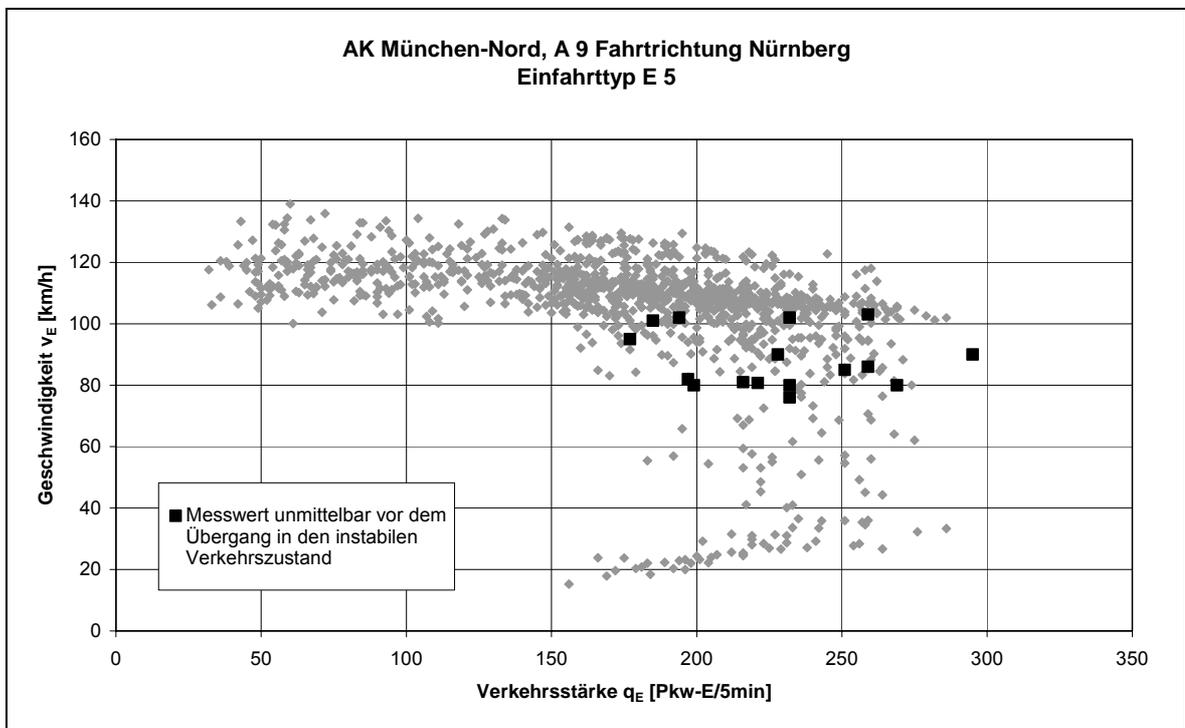


Bild 7.3: q-v-Diagramm AK München-Nord mit Kennzeichnung der Messwerte unmittelbar vor dem Übergang in einen instabilen Verkehrszustand

Aus den im Anhang 7.1 bis 7.7 dargestellten Diagrammen ist zu erkennen, dass in den Untersuchungsstellen zum Teil nur einzelne Übergänge in einen instabilen Verkehrszustand beobachtet werden konnten. Diese Untersuchungsstellen eignen sich nicht für die Ermittlung einer Verteilungsfunktion der Kapazität. Die weitere Anwendung der Break-down Probability Methode wird aus diesem Grund nur für Untersuchungsstellen vorgenommen, bei denen eine gewisse Anzahl an Übergängen in einen instabilen Verkehrszustand beobachtet werden konnte. Die Mindestanzahl wird im Rahmen der vorliegenden

Arbeit auf zehn Übergänge festgelegt. Es muss jedoch angemerkt werden, dass mit einer derart geringen Anzahl an Übergängen nur eine grobe Annäherung der Verteilungsfunktion ermittelt werden kann. Die Breakdown Probability Methode wird an den in der Tab. 7.2 dargestellten Untersuchungsstellen durchgeführt.

Tab. 7.2: Untersuchungsstellen für die Breakdown Probability Methode

Untersuchungsstelle		Anzahl der Übergänge
Bad Homburger Kreuz	A 1	71
Mönchhof Dreieck	A 2	10
Wiesbadener Kreuz	A 4	27
Wiesbadener Kreuz	A 5	25
AS Friedberg	E 1	33
Wiesbadener Kreuz	E 3	31
AK München-Nord	E 5	16

Um die Wahrscheinlichkeit für einen Übergang in einen instabilen Verkehrszustand bei einer bestimmten Verkehrsstärke zu ermitteln, ist es zweckmäßig die Verkehrsstärken in Klassen einzuteilen. Hierfür wird eine Klassenbreite von 10 Pkw-E/5min bzw. 10 Kfz/5min gewählt. Aus der Anzahl der Übergänge in einen instabilen Verkehrszustand in einer Verkehrsstärkeklasse und der Anzahl aller Messwerte in dieser Verkehrsstärkeklasse wird die Wahrscheinlichkeit berechnet, dass ein Übergang in den instabilen Verkehrszustand zu erwarten ist. Diese Wahrscheinlichkeit wird im Bild 7.4 beispielhaft für die Untersuchungsstelle im AK München-Nord (Einfahrttyp E 5) dargestellt.

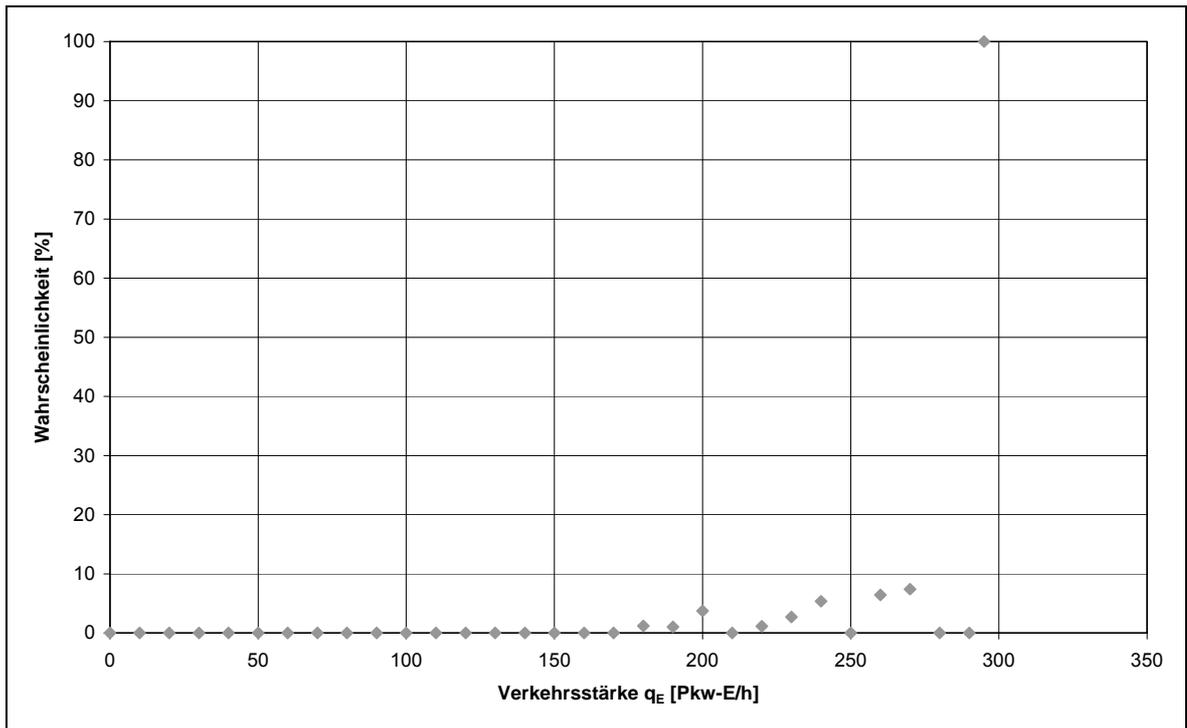


Bild 7.4: Wahrscheinlichkeit für einen Übergang in den instabilen Verkehrszustand für q_E , AK München-Nord, Einfahrttyp E 5

Aus den im Bild 7.4 dargestellten Wahrscheinlichkeiten für den Übergang in einen instabilen Verkehrszustand in den einzelnen Verkehrsstärkeklassen kann nun eine Verteilungsfunktion für die Zufallsgröße q_E ermittelt werden. Das Bild 7.5 zeigt die auf diese Weise geschätzte Verteilungsfunktion der Kapazität für die Untersuchungsstelle im AK München-Nord (Einfahrttyp E 5).

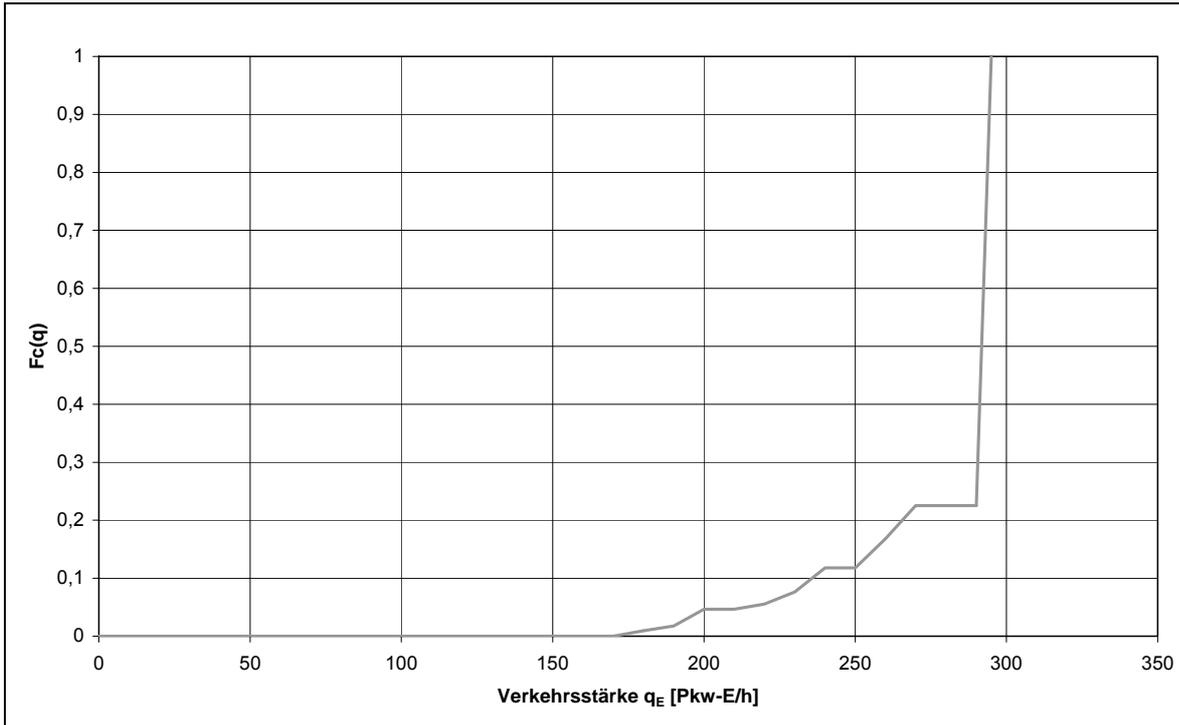


Bild 7.5: Geschätzte Verteilungsfunktion der Kapazität für q_E mit der Breakdown Probability Methode, AK München-Nord, Einfahrttyp E 5

Die Ergebnisse der Anwendung der Breakdown Probability Methode für alle übrigen Untersuchungsstellen werden im Anhang 7.8 bis 7.11 dargestellt. Es ist jedoch anzumerken, dass die mit der Breakdown Probability Methode ermittelten Verteilungsfunktionen auf einer sehr kleinen Datengrundlage basieren. Bereits bei kleinen Veränderungen der Datengrundlage, z. B. bei dem Vorhandensein eines einzigen zusätzlichen Übergangs in den instabilen Verkehrszustand, würden die Verteilungsfunktionen einen anderen Verlauf einnehmen. Dies ist bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen. Dennoch wird die Abschätzung eines Kapazitätswerts vorgenommen, der jedoch nur einen groben Anhaltswert darstellen kann. Als mittlere Kapazität wird hierbei der Median der Verteilungsfunktion ($F_c(q)=0,5$) betrachtet. Die Ergebnisse sind in der Tab. 7.3 dargestellt.

Tab. 7.3: Ergebnisse der Kapazitätsermittlung mit der Breakdown Probability Methode

Untersuchungsstelle		Anzahl der Übergänge	Mittlere Kapazität	Mittlere Kapazität
Bad Homburger Kreuz	A 1	71	154 Kfz/5min	1.848 Kfz/h
Mönchhof Dreieck	A 2	10	250 Kfz/5min	3.000 Kfz/h
Wiesbadener Kreuz	A 4	27	210 Kfz/5min	2.520 Kfz/h
Wiesbadener Kreuz	A 5	25	160 Kfz/5min	1.920 Kfz/h
AS Friedberg	E 1	33	128 Pkw-E/5min	1.536 Pkw-E/h
Wiesbadener Kreuz	E 3	31	131 Pkw-E/5min	1.572 Pkw-E/h
AK München-Nord	E 5	16	294 Pkw-E/5min	3.528 Pkw-E/h

Zur Breakdown Probability Methode ist anzumerken, dass durch diese Methode lediglich die Verkehrsstärkekassen bei der Ermittlung der Verteilungsfunktion berücksichtigt werden, in denen mindestens ein Übergang in einen instabilen Verkehrszustand aufgetreten ist. Alle übrigen Verkehrsstärkekassen werden nicht berücksichtigt. Im betrachteten Beispiel im AK München-Nord wurde auch die maximal gemessene Verkehrsstärken berücksichtigt, da sie einen Übergang in einen instabilen Verkehrszustand nach sich zog. Dies trifft jedoch nicht auf alle Untersuchungsstellen zu. In der Untersuchungsstelle im Bad Homburger Kreuz (vgl. Anhang 7.2) werden zum Beispiel zahlreiche hohe Verkehrsstärken gemessen, die nicht in die Betrachtung einfließen, da sie keinen Übergang in einen instabilen Verkehrszustand nach sich ziehen. Es ist deshalb davon auszugehen, dass die mit der Breakdown Probability Methode ermittelte Kapazitätsverteilung die tatsächliche Kapazitätsverteilung unterschätzt. ZURLINDEN [87] entwickelte aus diesem Grund eine durch die Product Limit Methode erweiterte Breakdown Probability Methode. Durch diesen Ansatz wird erreicht, dass auch diejenigen Messwerte berücksichtigt werden, die keinen Übergang in einen instabilen Verkehrszustand nach sich ziehen. Die Anwendung dieser Methode wird im Folgenden beschrieben.

7.2.3 Anwendung der Methode von ZURLINDEN

Bei der Anwendung der Methode von ZURLINDEN werden zunächst die Grenzgeschwindigkeit und die Verkehrsstärken unmittelbar vor dem Übergang in einen instabilen Verkehrszustand ermittelt. Hierfür können die mit der Breakdown Probability Methode ermittelten Übergänge verwendet werden (vgl. Ziffer 7.2.2). Auch die Methode von ZURLINDEN wird ausschließlich an den in der Tab. 7.2 dargestellten Untersuchungsstellen mit mindestens zehn Übergängen angewendet. Die Verkehrsstärken, die einen Übergang in den instabilen Verkehrszustand nach sich ziehen, werden bei der Methode von ZURLINDEN als Zustand des Typs „C“ gewertet (vgl. Ziffer 3.7.4). Diese Verkehrsstärken gehen als Kapazitätswert in die Betrachtung ein. Alle übrigen Verkehrsstärken werden dem Zustand des Typs „Q“ (fließender Verkehr) zugeordnet. Jeder dieser Zustände vom Typ „Q“ weist darauf hin, dass die Kapazität größer als die beobachtete Verkehrsstärke

ist. Für die Anwendung der Methode von ZURLINDEN sind jedoch nur die Messwerte im Zustand des Typs „Q“ relevant, deren Verkehrsstärke größer als der kleinste beobachtete Kapazitätswert ist, da die Überlebens- und die Verteilungsfunktion nur für diese Messwerte berechnet werden kann.

Anschließend werden alle Messwerte in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke in eine Rangfolge gebracht. Die größte gemessene Verkehrsstärke erhält den Rang 1, unabhängig davon ob es sich um einen Q-Zustand oder einen C-Zustand handelt. Es werden jedoch nur diejenigen Messwerte in die Betrachtung einbezogen, die eine Geschwindigkeit aufweisen, die größer oder gleich der Grenzgeschwindigkeit ist. Der Rang k_i gibt Auskunft über die Anzahl der Messwerte (Q- und C-Zustände), bei denen die Verkehrsstärke größer (oder gleich) als die Verkehrsstärke des betrachteten Messwerts ist. Nach der Zuordnung einer Rangfolge kann die Überlebensfunktion $G(q)$ (vgl. Gleichung 3.8) und die Verteilungsfunktion $F_c(q)$ ermittelt werden.

Für die Untersuchungsstelle im Mönchhof Dreieck (Ausfahrttyp A 2) wird in der Tab. 7.4 beispielhaft die Anwendung der Methode von ZURLINDEN im Rahmen der vorliegenden Arbeit dargestellt.

Tab. 7.4: Anwendung der Methode von ZURLINDEN in der Untersuchungsstelle im Mönchhof Dreieck (Ausfahrttyp A 2)

Intervall	q_i [Pkw-E/h]	Zustand [-]	k_i [-]	$G(q)$ [-]	$F_c(q)$ [-]
22.3.00 9:40	143	C	330	0,997	0,003
18.2.00 8:45	145	C	318	0,994	0,006
22.2.00 8:05	204	C	188	0,989	0,011
12.1.00 9:00	225	C	113	0,980	0,020
22.3.00 8:05	238	C	75	0,967	0,033
12.1.00 9:20	240	C	66	0,952	0,048
28.3.00 7:10	247	C	47	0,932	0,068
18.5.00 6:45	247	C	44	0,911	0,089
23.5.00 6:30	259	C	24	0,873	0,127
15.2.00 7:50	288	C	6	0,727	0,273

Die Tab. 7.4 zeigt, dass der Kapazitätswert, der die größte Verkehrsstärke aufweist, lediglich Rang 6 aller Messwerte einnimmt. Dies bedeutet, dass es 5 Messwerte gibt, die eine größere Verkehrsstärke aufweisen, jedoch keinen Übergang in den instabilen Verkehrszustand nach sich ziehen. Die Verteilungsfunktion $F_c(q)$ kann in diesem Fall nicht vollständig geschätzt werden, da die Product Limit Methode nur bis zum letzten be-

obachteten Kapazitätswert definiert ist. Im Bild 7.6 ist die geschätzte Verteilungsfunktion für die Untersuchungsstelle im Mönchhof Dreieck (Ausfahrttyp A 2) grafisch dargestellt. Für alle anderen in der Tab. 7.2 genannten Untersuchungsstellen werden die mit der Methode von ZURLINDEN geschätzten Verteilungsfunktionen im Anhang 7.8 bis 7.11 gezeigt.

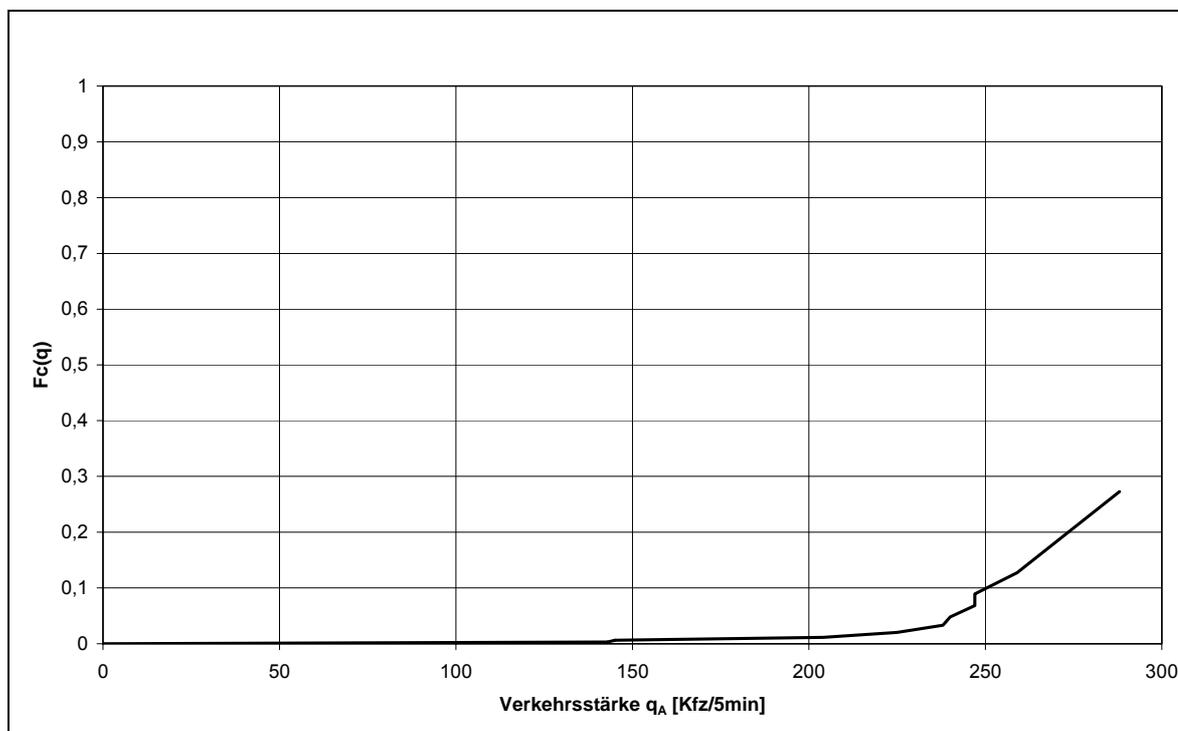


Bild 7.6: Geschätzte Verteilungsfunktion der Kapazität mit der Methode von ZURLINDEN, Mönchhof Dreieck (Ausfahrttyp A 2)

Bei der Anwendung der Methode von ZURLINDEN wird abschließend als mittlere Kapazität näherungsweise die Verkehrsstärke angesehen, bei der die Verteilungsfunktion $F_c(q)$ den Wert 0,5 (Median) annimmt. Für die im Beispiel dargestellte Untersuchungsstelle im Mönchhof Dreieck bedeutet dies, dass die mittlere Kapazität mit dem vorgestellten Verfahren nicht ermittelt werden kann. Dies gilt für fünf der insgesamt sieben betrachteten Untersuchungsstellen. Lediglich für die in der Tab. 7.5 dargestellten Untersuchungsstellen kann die mittlere Kapazität mit der Methode von ZURLINDEN ermittelt werden.

Tab. 7.5: Ergebnisse der Kapazitätsermittlung mit der Methode von ZURLINDEN

Untersuchungsstelle		Median der Verteilungsfunktion	Median der Verteilungsfunktion
Wiesbadener Kreuz	A 4	210 Kfz/5min	2.520 Kfz/h
AK München-Nord	E 5	279 Pkw-E/5min	3.348 Pkw-E/h

Neben der Breakdown Probability Methode und der Methode von ZURLINDEN wurde eingangs auch die Ermittlung der Kapazität durch das Fundamentaldiagramm vorge-

schlagen. Zur mathematischen Beschreibung der Zusammenhänge zwischen den Kenngrößen des Verkehrsablaufs wird das Modell von VAN AERDE gewählt, da dieses Modell auch für die Anwendung in Untersuchungsstellen, in denen keine Übergänge in instabile Verkehrszustände vorliegen, geeignet ist. Die Anwendung des Modells von VAN AERDE wird im Folgenden beschrieben.

7.2.4 Anwendung des Modells von VAN AERDE

Zur Ermittlung der Kapazität mit dem Modell von VAN AERDE (vgl. Ziffer 3.8.3) müssen zunächst die Modellparameter v_0 , c_1 , c_2 und c_3 bestimmt werden. Die Kurvenanpassung erfolgt über die Minimierung der Fehlerquadrate. Bei der Ermittlung der Fehlerquadrate wird in der Regel jeder Wert gleich gewichtet. Für die Anpassung der k - v -Funktion bedeutet dies, dass bei einer ungleichen Verteilung der Messwerte, z. B. wenn viele Messwerte im Bereich geringer Verkehrsdichten und wenige Messwerte im Bereich großer Verkehrsdichten vorliegen, der Verlauf der Funktion im Wesentlichen von dem Bereich bestimmt wird, der die größte Wertepaarichte aufweist. Diese ungewollte Gewichtung kann durch eine Klasseneinteilung vermieden werden. Dafür werden die Messwerte in Verkehrsdichteklassen mit der Klassenbreite 1 Kfz/km bzw. 1 Pkw-E/km eingeteilt. Für jede Verkehrsdichteklasse wird die mittlere Geschwindigkeit bestimmt, sodass die Messwerte mit hohen Verkehrsdichten den Verlauf der Funktion ebenso mitbestimmen wie die Messwerte mit niedrigen Verkehrsdichten. Dieses Vorgehen hat zur Folge, dass eine Verkehrsdichteklasse, die lediglich aus einem Wertepaar besteht genauso stark gewertet wird wie eine Verkehrsdichteklasse die aus sehr vielen Wertepaaren besteht. Für die Ermittlung der Kapazität ist dies von Vorteil, da im Bereich der Kapazität in der Regel nur sehr wenige Wertepaare vorliegen. Für die auf diese Weise errechneten Wertepaare wird anschließend die Regressionsfunktion $v(k)$ ermittelt (vgl. Gleichung 3.12).

Da das Modell von VAN AERDE auch in Untersuchungsstellen angewendet werden kann, in denen keine Übergänge in instabile Verkehrszustände beobachtet wurden, kann auch für Untersuchungsstellen die Kapazität abgeschätzt werden, bei denen die Breakdown Probability Methode und die Methode von ZURLINDEN nicht zur Anwendung kommen konnten. Es ist dennoch notwendig, dass eine ausreichende Datenbasis für den stabilen Bereich des Verkehrsflusses vorhanden ist. Dies trifft jedoch nicht auf alle Untersuchungsstellen zu (vgl. Anhang 5.1 bis 5.16). Aus diesem Grund wird das Modell von VAN AERDE nicht in Untersuchungsstellen angewendet, die lediglich ein kleines Verkehrsdichtespektrum aufweisen. Es werden daher nur die in der Tab. 7.6 dargestellten Untersuchungsstellen in den weiteren Betrachtungen berücksichtigt.

Tab. 7.6: Untersuchungsstellen für die Anwendung des Modells von VAN AERDE

Untersuchungsstelle		Untersuchungsstelle	
Viernheimer Dreieck	A 1	AS Friedberg	E 1
Bad Homburger Kreuz	A 1	AS Garching-Süd	E 1
AS Hannover-Lahe	A 2	Wiesbadener Kreuz	E 3
Dreieck Mönchhof	A 2	AK München-Nord	E 5
Wiesbadener Kreuz	A 4	Offenbacher Kreuz	E 5
Wiesbadener Kreuz	A 5		

Um mit dem Modell von VAN AERDE eine gute Schätzung der Kapazität zu erhalten, ist es von Vorteil, die maximale Verkehrsdichte als Randbedingung vorzugeben [57]. In der Literatur wird ein Richtwert von 150 Pkw/km für die maximale Verkehrsdichte eines Fahrstreifens angegeben [44]. Geht man davon aus, dass ein Lkw doppelt so viel Platz benötigt wie ein Pkw, kann die maximale Verkehrsdichte mit der Gleichung 7.1 berechnet werden.

$$k_{\max} = \frac{\text{Fahrstreifenanzahl} \cdot 150}{1 + \frac{\text{Lkw - Anteil}}{100}} \quad [\text{Kfz/km}] \quad (\text{Gl. 7.1})$$

Für die untersuchten Ausfahrten ergeben sich aus der Gleichung 7.1 und unter Berücksichtigung des mittleren Schwerverkehranteils sowie der jeweiligen Fahrstreifenanzahl die in der Tab. 7.7 angegebenen maximalen Verkehrsdichten als Randbedingung für eine Optimierung des Modells. Für die Einfahrten kann je Fahrstreifen eine maximale Verkehrsdichte von 150 Pkw-E/km nach diesem Ansatz angenommen werden.

Tab. 7.7: Maximale Verkehrsdichten k_{\max} als Randbedingung für die Optimierung des Modells von VAN AERDE

Untersuchungsstelle		Mittlerer Lkw-Anteil [%]	k_{\max} [Kfz/km]
Viernheimer Dreieck	A 1	20,3	125
Bad Homburger Kreuz	A 1	14,7	131
AS Hannover-Lahe	A 2	9,2	275
Dreieck Mönchhof	A 2	20,6	249
Wiesbadener Kreuz	A 4	12,7	266
Wiesbadener Kreuz	A 5	12,8	266

Im Bild 7.7 wird beispielhaft die Anpassung einer Regressionsfunktion nach dem Modell von VAN AERDE für die Untersuchungsstelle in der AS Hannover-Lahe (Ausfahrttyp A2) dargestellt. Die Summe der Fehlerquadrate wurde unter Verwendung des Tabellenkal-

kulationsprogramms Excel minimiert. Die entsprechenden k-v-Diagramme mit der Regressionsfunktion nach dem Modell von VAN AERDE wird für alle in der Tab. 7.6 genannten Untersuchungsstellen im Anhang 7.12 bis 7.17 dargestellt.

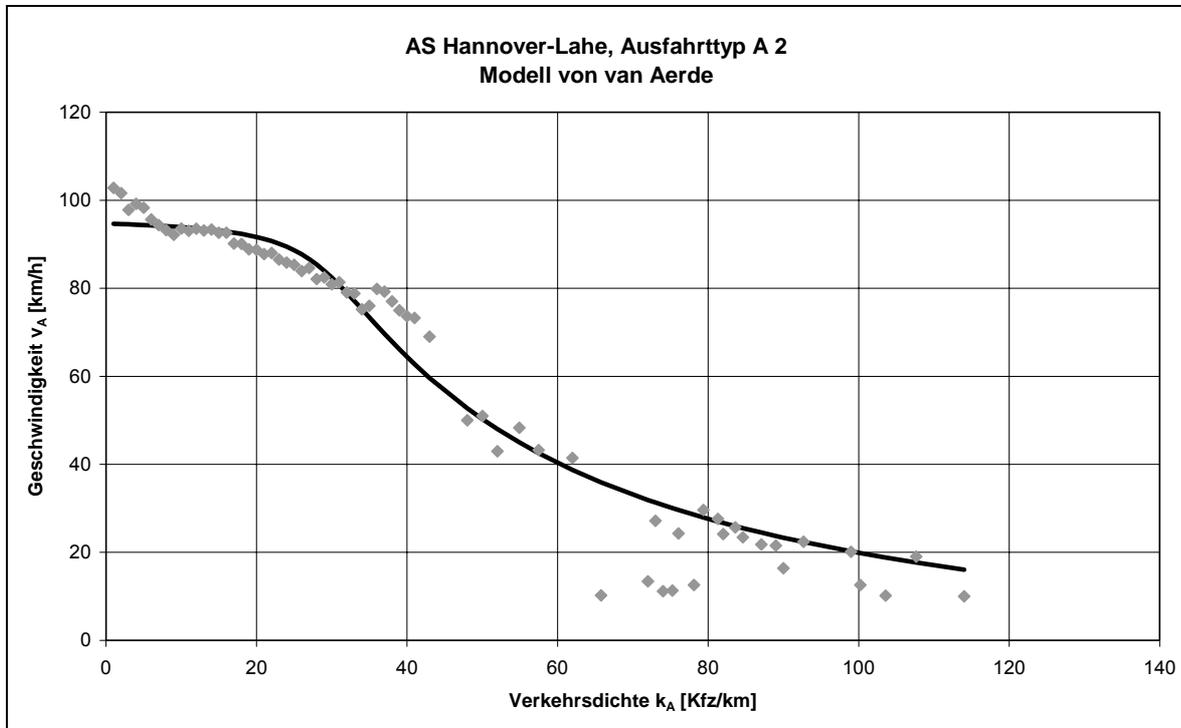


Bild 7.7: Anwendung des Modells von VAN AERDE, AS Hannover-Lahe (Ausfahrttyp A 2)

Um die maximale Verkehrsstärke zu bestimmen, muss die Regressionsfunktion $v(k)$ umgeformt werden. Die maximale Verkehrsstärke kann dann mit Gleichung 3.17 berechnet werden. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in der Tab. 7.8 dargestellt.

Tab. 7.8: Ergebnisse der Kapazitätsermittlung mit dem Modell von VAN AERDE

Untersuchungsstelle		Kapazität
Viernheimer Dreieck	A 1	1.784 Kfz/h
Bad Homburger Kreuz	A 1	1.716 Kfz/h
AS Hannover-Lahe	A 2	2.579 Kfz/h
Dreieck Mönchhof	A 2	2.897 Kfz/h
Wiesbadener Kreuz	A 4	2.000 Kfz/h
Wiesbadener Kreuz	A 5	1.850 Kfz/h
AS Friedberg	E 1	1.870 Pkw-E/h
AS Garching-Süd	E 1	2.228 Pkw-E/h
Wiesbadener Kreuz	E 3	1.563 Pkw-E/h
AK München-Nord	E 5	2.974 Pkw-E/h
Offenbacher Kreuz	E 5	2.602 Pkw-E/h

7.2.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Auf der Grundlage der in Ziffer 5 beschriebenen Datenbasis wurden im Rahmen der Weiterentwicklung der Bemessungsverfahren für Aus- und Einfahrten in elf der insgesamt 23 Untersuchungsstellen verschiedene Methoden zur Ermittlung der Kapazität bzw. der Kapazitätsverteilung angewendet. Dabei konnten aus den genannten Gründen nicht in jeder Untersuchungsstelle alle Methoden zur Anwendung kommen. Dies betrifft insbesondere die Methoden, die auf der Analyse von Übergängen vom stabilen in den instabilen Verkehrszustand beruhen. Alle ermittelten Ergebnisse werden in der Tab. 7.9 zusammenfassend dargestellt.

Tab. 7.9: Ergebnisse der Kapazitätsermittlung

Untersuchungsstelle		Breakdown Probability Methode	Methode von ZURLINDEN	Modell von VAN AERDE
Viernheimer Dreieck	A 1	-	-	1.784 Kfz/h
Bad Homburger Kreuz	A 1	1.848 Kfz/h	-	1.716 Kfz/h
AS Hannover-Lahe	A 2	-	-	2.579 Kfz/h
Dreieck Mönchhof	A 2	3.000 Kfz/h	-	2.897 Kfz/h
Wiesbadener Kreuz	A 4	2.520 Kfz/h	2.520 Kfz/h	2.000 Kfz/h
Wiesbadener Kreuz	A 5	1.920 Kfz/h	-	1.850 Kfz/h
AS Friedberg	E 1	1.536 Pkw-E/h	-	1.870 Pkw-E/h
AS Garching-Süd	E 1	-	-	2.228 Pkw-E/h
Wiesbadener Kreuz	E 3	1.572 Pkw-E/h	-	1.563 Pkw-E/h
AK München-Nord	E 5	3.528 Pkw-E/h	3.348 Pkw-E/h	2.974 Pkw-E/h
Offenbacher Kreuz	E 5	-	-	2.602 Pkw-E/h

Da die einzelnen Methoden zur Bestimmung der Kapazität bzw. der Kapazitätsverteilung nur Tendenzen für die einzelnen Aus- und Einfahrtstypen darstellen können, werden im Folgenden die Ergebnisse der verschiedenen Verfahren miteinander verglichen, um eventuelle Zusammenhänge aufzuzeigen. Somit können gegebenenfalls auch für die Untersuchungsstellen, in denen nicht alle Verfahren angewendet werden konnten, Aussagen bezüglich der Kapazität getroffen werden.

Betrachtet man zunächst die beiden Untersuchungsstellen, in denen alle Verfahren zur Ermittlung der Kapazität angewendet werden konnten, so ist festzustellen, dass mit der Breakdown Probability Methode und mit der Methode von ZURLINDEN annähernd gleich hohe Kapazitäten verzeichnet werden konnten, während mit dem Modell von VAN AERDE deutlich niedrigere Kapazitäten ermittelt wurden. Auch ein Vergleich der übrigen Untersuchungsstellen, in denen die Breakdown Probability Methode und das Modell von VAN AERDE zur Anwendung kamen, deutet darauf hin, dass mit dem Modell von VAN AERDE in der Regel niedrigere Kapazitäten ermittelt werden. Die einzige Ausnahme bildet die AS Friedberg (Einfahrtstyp E 1). Hier wurde mit dem Modell von VAN AERDE eine höhere Kapazität als mit der Breakdown Probability Methode berechnet. Allerdings weist die mit der Breakdown Probability Methode ermittelte Verteilungsfunktion der Kapazität einen ungewöhnlichen Verlauf auf, weil sehr viele Übergänge in den instabilen Verkehrszustand bei niedrigen Verkehrsstärken beobachtet wurden (vgl. Anhang 7.10).

Aus der Literatur ist bekannt, dass mit der Breakdown Probability Methode die tatsächliche Kapazität unterschätzt wird [87], da nicht zwangsläufig die höchsten gemessenen Verkehrsstärken in die Betrachtung einfließen. Auch die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung mit der Breakdown Probability Methode ermittelten Kapazitäten

liegen zum Teil unter den Verkehrsstärken, die erfahrungsgemäß abgewickelt werden können. In anderen Untersuchungsstellen werden jedoch deutlich höhere Kapazitäten verzeichnet.

Da aus den in der Tab. 7.9 dargestellten Ergebnissen keine eindeutigen Festlegungen bezüglich der Kapazität erfolgen können, wird im Folgenden für die einzelnen Aus- und Einfahrttypen auf der Grundlage der tatsächlich abgewickelten Verkehrsstärken (vgl. Ziffer 5) und unter Berücksichtigung einer Zusammenbruchswahrscheinlichkeit ein sinnvoller Wert für die Kapazität gewählt:

- Für den **Ausfahrttyp A 1** wird bei einer geringen Ausfahrgeschwindigkeit die bisher im HBS 2001 angegebene Kapazität von 1.500 Kfz/h bestätigt. Befindet sich dieser Ausfahrttyp jedoch innerhalb eines Autobahnknotenpunkts mit direkt geführten Verbindungsrampen, kann eine Kapazität von 1.700 Kfz/h angenommen werden.
- Der **Ausfahrttyp A 2** hat sich bis zu einer Verkehrsstärke von 2.600 Kfz/h als ausreichend leistungsfähig erwiesen. Dieser Wert gilt jedoch wie bereits im HBS 2001 beschrieben nur bei richtlinienkonformer Beschilderung.
- Für den **Ausfahrttyp A 3** und **Ausfahrttyp A 4** kann die im HBS 2001 angegebene Kapazität von 3.000 Kfz/h bestätigt werden.
- Für Einfahrten des **Einfahrttyps E 1 / E 2** wird die im HBS 2001 angegebene maximale Einfädelungsverkehrsstärke von 2.200 Pkw-E/h bestätigt. Bei niedrigen Einfädelungsgeschwindigkeiten, die kleiner sind als 60 km/h kann noch eine Kapazität von 2.100 Pkw-E/h erreicht werden (vgl. Ziffer 5.3.1).
- Bezüglich der Kapazität von **Verteilerfahrbahnen** kann für zweistreifige Verteilerfahrbahnen eine Kapazität von 3.000 Pkw-E/h angenommen werden.

7.3 Beschreibung des Einfädelungsvorgangs

7.3.1 Ermittlung der Verkehrsstärke im rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn

Die Verteilung des Verkehrs in der Hauptfahrbahn hat einen großen Einfluss auf die Bemessung von Einfahrten. Die Überprüfung des im HBS 2001 beschriebenen Bemessungsverfahrens für Einfahrten hat ergeben, dass die angegebenen funktionalen Zusammenhänge für die Beschreibung der Verteilung des Verkehrs in der Hauptfahrbahn oberhalb der Einfahrt zum Teil ungenau sind (vgl. Ziffer 6.3). In den folgenden Ausführungen soll daher analysiert werden, ob unter Verwendung eines modifizierten Ansatzes die Zusammenhänge besser beschrieben werden können. Dafür ist zunächst zu klären, welche Zufallsgrößen einen Einfluss auf die Verkehrsstärke im rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn oberhalb der Einfahrt besitzen. Die Abhängigkeit der Verkehrsstärke im rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn von der Verkehrsstärke in der

Hauptfahrbahn, der Verkehrsstärke in der Einfahrt und der Schwerverkehrsstärke in der Hauptfahrbahn sowie in der Einfahrt kann mit dem Korrelationskoeffizienten r untersucht werden. Der Korrelationskoeffizient r ist ein Maß für die Güte der Beziehung zwischen einem Datenpaar. Je näher der Korrelationskoeffizient an ± 1 liegt, um so enger ist der lineare Zusammenhang. Es ist jedoch zu beachten, dass mit der Korrelationsanalyse lediglich festgestellt werden kann, ob ein linearer Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke in der Hauptfahrbahn oberhalb der Einfahrt und den einzelnen unabhängigen Variablen besteht. Es können zunächst keine Aussagen über einen funktionalen Zusammenhang getroffen werden. Mit der Korrelationsanalyse soll geklärt werden, ob zwischen der Verkehrsstärke im rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn q_{H1} und

- der Verkehrsstärke in der Hauptfahrbahn oberhalb der Einfahrt q_H ,
- der Schwerverkehrsstärke in der Hauptfahrbahn oberhalb der Einfahrt $q_{H,Lkw}$,
- der Verkehrsstärke in der Einfahrt q_E oder
- der Schwerverkehrsstärke in der Einfahrt $q_{E,Lkw}$

eine Abhängigkeit besteht. Die Tab. 7.10 zeigt die ermittelten Korrelationskoeffizienten.

Tab. 7.10: Ergebnisse der Korrelationsanalyse hinsichtlich der Verkehrsstärke auf dem rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn

Untersuchungsstelle		Korrelationskoeffizient r			
		q_H	$q_{H,Lkw}$	q_E	$q_{E,Lkw}$
AS Friedberg	E 1	0,761	0,257	0,379	0,155
AS Garching-Süd	E 1	0,841	0,458	0,442	0,185
AS Oberschleißheim	E 1	0,605	0,307	0,073	0,102
Viernheimer Dreieck	E 2	0,692	0,545	0,282	0,131

Die in der Tab. 7.10 dargestellten Ergebnisse der Korrelationsanalyse zeigen deutlich, dass zwischen der Verkehrsstärke im rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn und der Verkehrsstärke in der Hauptfahrbahn ein Zusammenhang besteht. Auch zwischen der Verkehrsstärke im rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn und der Verkehrsstärke in der Einfahrt sowie der Schwerverkehrsstärke in der Hauptfahrbahn bestehen Abhängigkeiten, die jedoch weniger eng ausgeprägt sind. Darüber hinaus sind diese beiden Zusammenhänge nicht in allen Untersuchungsstellen gleich stark ausgeprägt. In einigen Untersuchungsstellen besteht ein stärkerer Zusammenhang mit der Verkehrsstärke in der Einfahrt, in den anderen Untersuchungsstellen ist dagegen der Zusammenhang mit der Schwerverkehrsstärke in der Hauptfahrbahn enger. Der Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke im rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn und der Schwerverkehrsstärke in der Einfahrt ist in fast allen Untersuchungsstellen am schwächsten ausgeprägt.

Insgesamt zeigt die Korrelationsanalyse, dass bei allen Untersuchungsstellen eine starke Abhängigkeit zwischen der Verkehrsstärke im rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn und der Verkehrsstärke in der Hauptfahrbahn besteht.

Für die Bestimmung eines neuen funktionalen Zusammenhangs ist die Korrelationsanalyse nicht geeignet, da sie lediglich Aufschluss darüber gibt, ob ein Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke in der Hauptfahrbahn oberhalb der Einfahrt und den einzelnen unabhängigen Variablen besteht. Durch eine Kombination der einzelnen unabhängigen Variablen im Rahmen einer Mehrfachregressionsrechnung kann dagegen der funktionale Zusammenhang beschrieben werden. Somit kann bestimmt werden, welche Kombinationen der unabhängigen Variablen die beste Erklärung der abhängigen Variable liefert. Schließlich kann eine mathematische Funktion für den Zusammenhang angegeben werden. Aus diesem Grund werden im Folgenden Mehrfachregressionsrechnungen mit unterschiedlichen Kombinationen der abhängigen Variablen vorgenommen. Neben linearen werden auch nichtlineare Regressionsansätze betrachtet.

Zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen der Verkehrsstärke im rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn q_{H1} durch die Verkehrsstärke in der Hauptfahrbahn q_H , die Verkehrsstärke in der Einfahrt q_E sowie den Schwerverkehrsstärken in der Hauptfahrbahn $q_{H,Lkw}$ und in der Einfahrt $q_{E,Lkw}$ werden insgesamt zehn Ansätze für die lineare Einfach- und Mehrfachregression gewählt. Diese ergeben sich aus einer sinnvollen Kombination der unabhängigen Variablen unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus der Korrelationsanalyse. Darüber hinaus werden sechs Ansätze für die nichtlineare Regression gewählt, die sich aus Polynomen 2. und 3. Grades zusammensetzen. Bei einigen der 16 genannten Regressionsansätze werden die verwendeten Verkehrsstärken in die Pkw-Einheiten umgerechnet. Dabei wird einerseits der Gleichwert von 2,0 Pkw-Einheiten je Schwerverkehrsfahrzeug angesetzt [24], andererseits wird vergleichend dazu eine Umrechnung mit einem Gleichwert von 3,0 Pkw-Einheiten je Schwerverkehrsfahrzeug vorgenommen.

Tab. 7.11: Regressionsansätze für die Ermittlung einer Funktion zur Bestimmung der Verkehrsstärke im rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn

Ansatz	Gleichung	Einheit	Pkw-Gleichwert
1	$q_{H1} = a + b_1 \cdot q_H + b_2 \cdot q_{H,Lkw}$	Kfz/h	-
2	$q_{H1} = a + b_1 \cdot q_H + b_2 \cdot q_{H,Lkw} + b_3 \cdot q_E$	Kfz/h	-
3	$q_{H1} = a + b_1 \cdot q_H + b_2 \cdot q_{H,Lkw} + b_3 \cdot q_E + b_4 \cdot q_{E,Lkw}$	Kfz/h	-
4	$q_{H1} = a + b_1 \cdot q_H + b_3 \cdot q_E + b_4 \cdot q_{E,Lkw}$	Kfz/h	-
5	$q_{H1} = a + b_1 \cdot q_H + b_3 \cdot q_E$	Kfz/h	-
6	$q_{H1} = a + b_1 \cdot q_H + b_3 \cdot q_E$	Pkw-E/h	2,0
7	$q_{H1} = a + b_1 \cdot q_H + b_3 \cdot q_E$	Pkw-E/h	3,0
8	$q_{H1} = a + b_1 \cdot q_H$	Kfz/h	-
9	$q_{H1} = a + b_1 \cdot q_H$	Pkw-E/h	2,0
10	$q_{H1} = a + b_1 \cdot q_H$	Pkw-E/h	3,0
11	$q_{H1} = a \cdot q_H^2 + b \cdot q_H$	Kfz/h	-
12	$q_{H1} = a \cdot q_H^2 + b \cdot q_H$	Pkw-E/h	2,0
13	$q_{H1} = a \cdot q_H^2 + b \cdot q_H$	Pkw-E/h	3,0
14	$q_{H1} = a \cdot q_H^3 + b \cdot q_H^2 + c \cdot q_H$	Kfz/h	-
15	$q_{H1} = a \cdot q_H^3 + b \cdot q_H^2 + c \cdot q_H$	Pkw-E/h	2,0
16	$q_{H1} = a \cdot q_H^3 + b \cdot q_H^2 + c \cdot q_H$	Pkw-E/h	3,0

Mit den zuvor beschriebenen Ansätzen werden Regressionsrechnungen mit den empirisch gewonnenen Daten für alle Einfahrten vom Einfahrtstyp E 1 und E 2 durchgeführt. Zusätzlich werden Regressionsrechnungen für den Einfahrtstyp E 1 / E 2 an dreistreifigen Hauptfahrbahnen zusammenfassend für alle erhobenen Daten durchgeführt. Dabei kommt das Statistikprogramm ORIGIN und das Tabellenkalkulationsprogramm EXCEL zur Anwendung. Neben der Bestimmung der Regressionskoeffizienten für die linearen Regressionsansätze und den Parametern für die nichtlinearen Regressionsansätze wird das Bestimmtheitsmaß und der Standardschätzfehler bestimmt. Das Bestimmtheitsmaß B ist ein Maß für die Güte der Anpassung der beobachteten Messwerte durch die Regressionsgleichung. Sofern sämtliche Messwerte auf der Regressionskurve liegen, ist $B = 1$. Je stärker die Messwerte jedoch von der Regressionskurve abweichen, um so geringer ist der Wert für das Bestimmtheitsmaß. Die Güte der Anpassung kann durch den Standardschätzfehler $s_{Y,X}$ beurteilt werden. Der Standardschätzfehler ist ein Maß für die Abweichung der beobachteten Messwerte von der Regressionskurve. Bei einem Vergleich der Standardschätzfehler ist darauf zu achten, dass die in den einzelnen Ansätzen verwendeten Verkehrsstärken unterschiedliche Einheiten aufweisen (vgl. Tab. 7.11). Eine Übersicht über die ermittelten Bestimmtheitsmaße und Standardschätzfehler zeigt die

Tab. 7.12. Eine ausführliche Darstellung der Regressionsrechnungen ist im Anhang 7.18 bis 7.22 zu finden.

Tab. 7.12: Ergebnisse der Regressionsrechnungen zur Ermittlung der Verkehrsstärke im rechten Fahrstreifen von dreistreifigen Hauptfahrbahnen

Ansatz	Bestimmtheitsmaß B Standardabweichung $S_{y,x}$	AS Friedberg Einfahrttyp E 1 (dreistreifige Hauptfahrbahn)	AS Garching-Süd Einfahrttyp E 1 (dreistreifige Hauptfahrbahn)	AS Oberschleißheim, Einfahrttyp E 1 (zweistreifige Hauptfahrbahn)	Vierheimer Dreieck Einfahrttyp E 2 (dreistreifige Hauptfahrbahn)	Einfahrttyp E 1 / E 2 dreistreifige Hauptfahrbahn gesamt
1	B	0,616	0,720	0,679	0,581	0,709
	$S_{y,x}$	79,022	118,520	81,094	49,774	91,565
2	B	0,662	0,720	0,679	0,594	0,712
	$S_{y,x}$	74,147	118,466	81,048	48,997	91,196
3	B	0,662	0,724	0,683	0,595	0,719
	$S_{y,x}$	74,137	117,746	80,659	48,972	90,000
4	B	0,621	0,712	0,682	0,525	0,712
	$S_{y,x}$	78,543	120,227	80,767	52,991	91,173
5	B	0,614	0,712	0,675	0,506	0,699
	$S_{y,x}$	79,197	120,173	81,524	54,011	93,118
6	B	0,596	0,721	0,790	0,501	0,706
	$S_{y,x}$	158,701	188,571	94,110	91,997	158,664
7	B	0,622	0,733	0,818	0,539	0,710
	$S_{y,x}$	243,013	275,298	122,803	132,455	237,146
8	B	-0,030	0,706	-0,235	-0,253	0,401
	$S_{y,x}$	129,444	121,294	158,840	85,971	131,450
9	B	0,351	0,692	0,325	0,114	0,543
	$S_{y,x}$	201,289	198,187	168,382	122,539	197,786
10	B	0,522	0,697	0,592	0,363	0,631
	$S_{y,x}$	273,078	293,056	183,775	155,691	267,323
11	B	0,597	0,707	0,607	0,490	0,599
	$S_{y,x}$	80,985	121,159	89,643	54,863	107,506
12	B	0,621	0,692	0,796	0,487	0,676
	$S_{y,x}$	153,881	198,068	92,730	93,277	166,590
13	B	0,639	0,706	0,839	0,519	0,631
	$S_{y,x}$	237,275	288,899	115,583	135,336	241,116
14	B	0,632	0,725	0,733	0,518	0,743
	$S_{y,x}$	77,422	117,297	73,951	53,376	86,195
15	B	0,627	0,694	0,844	0,503	0,723
	$S_{y,x}$	152,541	197,682	81,170	91,868	154,119
16	B	0,640	0,706	0,853	0,533	0,718
	$S_{y,x}$	237,024	288,898	110,395	133,338	233,586

Bei der Durchführung der linearen Einfach- und Mehrfachregressionen (Ansätze 1 bis 10) ist zu überprüfen, ob alle Regressionskoeffizienten in den gewählten Ansätzen einen

signifikanten Beitrag zur Bestimmung der abhängigen Variablen liefern. Hierfür wird ein Test mit der Nullhypothese durchgeführt. Als Prüfverteilung wird die t-Verteilung verwendet [55]. Falls \hat{t} größer als t ist, kann angenommen werden, dass der Regressionskoeffizient im Zusammenwirken mit den anderen Regressionskoeffizienten einen signifikanten Beitrag zur Bestimmung der abhängigen Variablen liefert. Bei der Durchführung des Test wurde eine Signifikanzzahl von $\alpha=0,025$ gewählt, damit ergibt sich für alle Untersuchungsstellen für t ein Wert von 1,96 [55], der nicht unterschritten werden darf. Die Ergebnisse des Tests sind im Anhang 7.18 bis 7.22 dargestellt. Weiterhin ist zu überprüfen, ob in der Grundgesamtheit tatsächlich eine Abhängigkeit besteht, die durch die Form des gewählten Ansatzes beschrieben werden kann. Aus diesem Grund muss ein Signifikanztest mit der Nullhypothese durchgeführt werden, bei dem die F-Verteilung zur Anwendung kommt [55]. Aufgrund der umfangreichen Datenbasis ergeben die Berechnungen, dass bei allen Regressionsansätzen in allen Untersuchungsstellen in der Grundgesamtheit eine Abhängigkeit besteht.

Aus dem Anhang 7.18 bis 7.22 werden für die einzelnen Untersuchungsstellen sowie die zusammenfassende Betrachtung des Einfahrtstyps E 1 / E 2 an dreistreifigen Hauptfahrbahnen die im Folgenden beschriebenen Ergebnisse erzielt.

Die Regressionsrechnungen für die **AS Friedberg** (Einfahrtstyp E 1) weisen für die Ansätze 2 und 3 die höchsten Bestimmtheitsmaße auf. Allerdings ist der Ansatz 3 unbrauchbar, da die Schwerverkehrsstärke in der Einfahrt in diesem Ansatz keinen signifikanten Beitrag liefert (vgl. Anhang 7.18). Die übrigen Ansätze der linearen Mehrfachregression und der nichtlinearen Regression liefern dagegen brauchbare Ergebnisse mit Bestimmtheitsmaßen, die Werte von mehr als 0,6 aufweisen. Lediglich die Ansätze der linearen Einfachregression (Ansätze 8 bis 10) weisen sehr niedrige Bestimmtheitsmaße auf und sind daher für die Beschreibung des Zusammenhangs nicht geeignet.

Die Regressionsrechnungen für die **AS Garching-Süd** (Einfahrtstyp E 1) weisen für alle Ansätze Bestimmtheitsmaße von ca. 0,7 oder höher auf. Die Ansätze 2 und 4 sind jedoch unbrauchbar, da jeweils eine Variable keinen signifikanten Beitrag zur Beschreibung des Zusammenhangs liefert. Das höchste Bestimmtheitsmaß von 0,733 weist der Ansatz 7 auf.

In der **AS Oberschleißheim** (Einfahrtstyp E 1) weisen die Regressionsrechnungen für den Ansatz 16 das höchste Bestimmtheitsmaß auf. Die Bestimmtheitsmaße liegen insgesamt ca. zwischen 0,6 und 0,85. Lediglich die Ansätze für die lineare Einfachregression weisen, wie es bereits in der AS Friedberg zu beobachten war, deutlich niedrigere Bestimmtheitsmaße auf. Die Ansätze 2, 3 und 4 sind jedoch unbrauchbar, da die Verkehrsstärke in der Einfahrt in diesen drei Ansätzen keinen signifikanten Beitrag zur Beschreibung des Zusammenhangs liefert. Die AS Oberschleißheim ist die einzige Einfahrt des Einfahrtstyps

E 1 an einer zweistreifigen Hauptfahrbahn die im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersucht wurde. Da durch die Regressionsrechnungen signifikante Zusammenhänge ermittelt werden konnten, kann auf der Grundlage des vorhandenen Datenmaterials ein allgemeingültiger Zusammenhang formuliert werden.

Bei den Regressionsrechnungen für das **Viernheimer Dreieck** (Einfahrttyp E 2) weist zwar Ansatz 3 das höchste Bestimmtheitsmaß auf, dennoch ist dieser Ansatz als unbrauchbar einzustufen, da eine Variable keinen signifikanten Beitrag zur Beschreibung des Zusammenhangs liefert. Wie bereits in den Untersuchungsstellen in der AS Friedberg und in der AS Oberschleißheim beobachtet, weisen auch im Viernheimer Dreieck die Ansätze für die lineare Einfachregression die niedrigsten Bestimmtheitsmaße auf. Alle übrigen Ansätze weisen Bestimmtheitsmaße zwischen ca. 0,50 und 0,60 auf.

Insgesamt ist zu erkennen, dass in den Einfahrten des Einfahrttyps E 1 / E 2 an dreistreifigen Hauptfahrbahnen die Ansätze der linearen Mehrfachregression (Ansätze 1 bis 7) sowie die Ansätze der nichtlinearen Regression mit dem Polynom 3. Grades (Ansätze 14 bis 16) die höchsten Bestimmtheitsmaße und gleichzeitig die niedrigsten Standard-schätzfehler aufweisen. Dennoch sind die Ansätze der linearen Mehrfachregression für einzelne Untersuchungsstellen als unbrauchbar einzustufen.

Um eine Funktion zu erhalten, die für alle Untersuchungsstellen geeignet ist, werden alle Daten für den Einfahrttyp E 1 / E 2 an dreistreifigen Hauptfahrbahnen zusammengefasst und erneut Regressionsrechnungen durchgeführt. Die zusammenfassende Betrachtung (vgl. Anhang 7.22) zeigt, dass die bei der nichtlinearen Regression (Ansätze 14 und 15) die höchsten Bestimmtheitsmaße zu beobachten sind. Auch die linearen Regressionsansätze 2, 3 und 4 weisen vergleichsweise hohe Bestimmtheitsmaße auf. Diese drei Ansätze sind jedoch in den einzeln betrachteten Untersuchungsstellen als unbrauchbar eingestuft worden und sollen daher nicht für die Bestimmung eines allgemeingültigen Zusammenhangs herangezogen werden.

Bei der endgültigen Wahl einer geeigneten Funktion für die Bestimmung der Verkehrsstärke im rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn sollte nach Möglichkeit für den Einfahrttyp E 1 / E 2 an zwei- und dreistreifigen Hauptfahrbahnen der gleiche Ansatz gewählt werden, um für alle betrachteten Einfahrttypen einheitliche Bemessungsdiagramme zu entwickeln. Darüber hinaus muss der gewählte Zusammenhang in ein praktikables Bemessungsverfahren eingearbeitet werden können.

Die Ergebnisse der Regressionsrechnungen (vgl. Anhang 7.18 bis 7.22) zeigen, dass mit einem Polynom 3. Grades für alle Untersuchungsstellen sehr hohe Bestimmtheitsmaße erzielt werden konnten. Dies gilt für den Einfahrttyp E 1 / E 2 an zwei- sowie an dreistreifigen Hauptfahrbahnen. Insbesondere in den zusammenfassenden Betrachtungen

der Einfahrtstypen E 1 / E 2 an dreistreifigen Hauptfahrbahnen wurden mit diesen Ansätzen hohe Bestimmtheitsmaße ermittelt. Unterschiedliche Ergebnisse erweisen sich jedoch bei der Wahl der am besten geeigneten Pkw-Gleichwerts. Während bei der zweistreifigen Hauptfahrbahn bei einer Umrechnung der Verkehrsstärken mit einem Pkw-Gleichwert von 3,0 das höchste Bestimmtheitsmaß erzielt wurde, erweist sich bei der dreistreifigen Hauptfahrbahn keine Umrechnung in Pkw-Einheiten als am besten geeignet. Bei allen Einfahrten stellen sich ebenfalls hohe Bestimmtheitsmaße bei einer Umrechnung der Verkehrsstärken in Pkw-Einheiten mit einem Gleichwert von 2,0 ein (Ansatz 15). Aus diesem Grund wird abschließend als neuer Zusammenhang für die Bestimmung der Verkehrsstärke im rechten Fahrstreifen von zwei- und dreistreifigen Hauptfahrbahnen oberhalb von Einfahrten vom Einfahrtstyp E 1 / E 2 ein Polynom 3. Grades gewählt. In den Gleichungen 7.2 und 7.3 sind die im Rahmen der Regressionsrechnungen ermittelten Funktionen zur Bestimmung der Verkehrsstärke im rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn beschrieben. Darüber hinaus werden im Bild 7.8 und im Bild 7.9 die ermittelten Zusammenhänge den gemessenen Daten gegenüber gestellt.

Einfahrtstyp E 1 / E 2, dreistreifige Hauptfahrbahn (vgl. Bild 7.8):

$$q_{H1} = 0,126 \cdot 10^{-7} \cdot q_H^3 - 0,124 \cdot 10^{-3} \cdot q_H^2 + 0,552 \cdot q_H \quad (\text{Gl. 7.2})$$

Einfahrtstyp E 1 / E 2, zweistreifige Hauptfahrbahn (vgl. Bild 7.9):

$$q_{H1} = 0,539 \cdot 10^{-7} \cdot q_H^3 - 0,348 \cdot 10^{-3} \cdot q_H^2 + 0,912 \cdot q_H \quad (\text{Gl. 7.3})$$

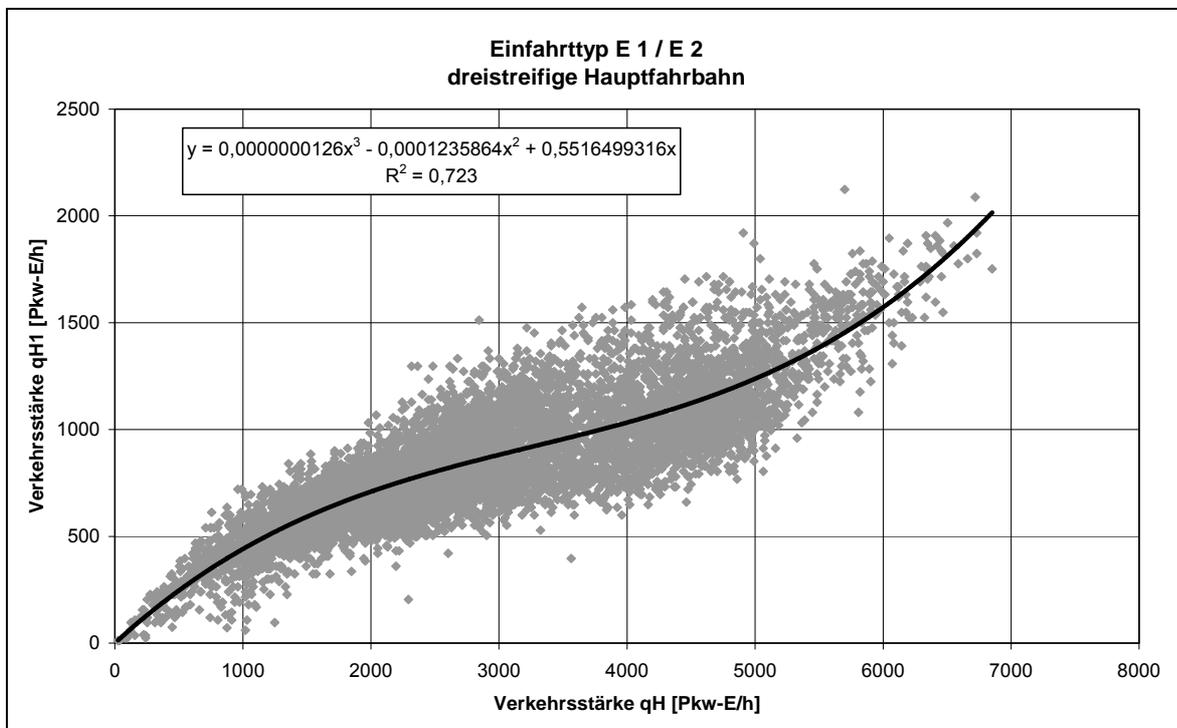


Bild 7.8: Funktionaler Zusammenhang zwischen q_{H1} und q_H für den Einfahrtstyp E 1 / E 2 an dreistreifigen Hauptfahrbahnen

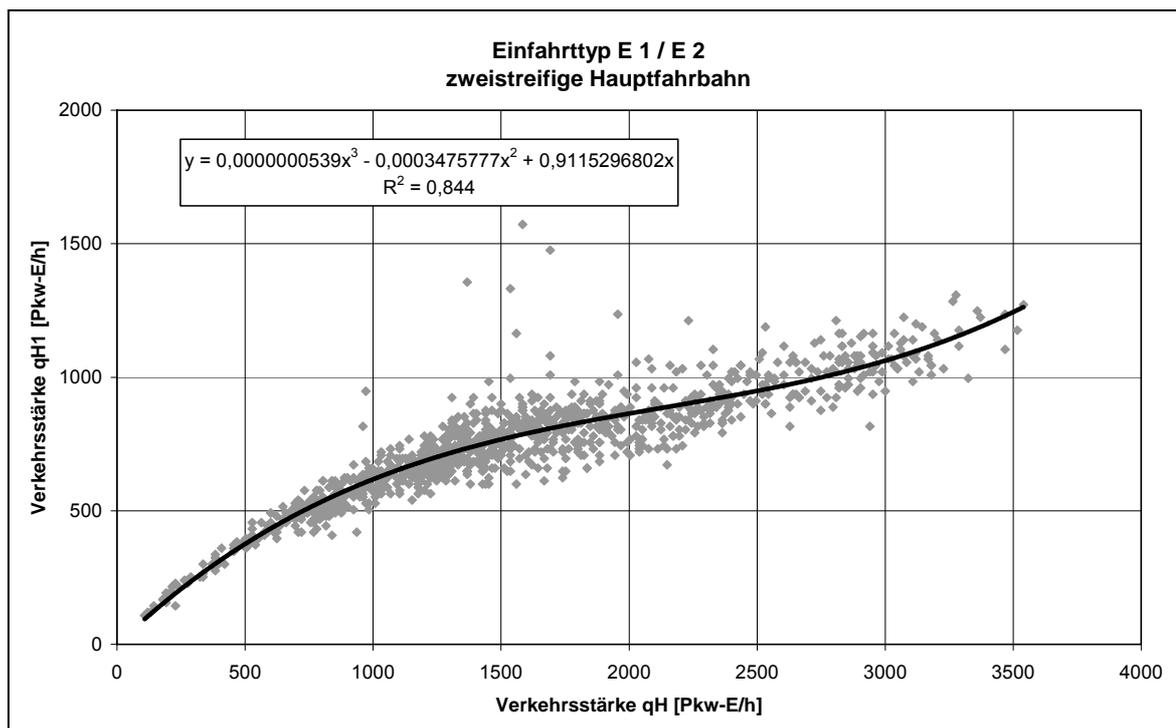


Bild 7.9: Funktionaler Zusammenhang zwischen q_{H1} und q_H für den Einfahrttyp E 1 / E 2 an zweistreifigen Hauptfahrbahnen

Ein Vergleich zwischen den in den Bildern 7.8 und 7.9 dargestellten funktionalen Zusammenhängen zur Beschreibung der Verkehrsstärke im rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn und den im HBS 2001 verwendeten Zusammenhängen (vgl. Bild 6.1 und Bild 6.2) macht deutlich, dass mit den Gleichungen 7.2 und 7.3 eine deutlich bessere Anpassung an die empirisch erhobenen Daten erreicht wird. Darüber hinaus erfüllen die Gleichungen 7.2 und 7.3 die Randbedingung, dass die Verkehrsstärke im rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn gleich null ist, wenn die Verkehrsstärke in der Hauptfahrbahn gleich null ist. Somit stellen die Gleichungen 7.2 und 7.3 einen plausiblen Zusammenhang zwischen den beiden betrachteten Größen her.

Der Verlauf der gewählten Funktionen macht deutlich, dass sich bei niedrigen Verkehrsstärken in der Hauptfahrbahn ein vergleichsweise großer Anteil der Verkehrsstärke auf dem rechten Fahrstreifen befindet. Bei ansteigender Verkehrsstärke wird der Verlauf der Funktion flacher. Dies bedeutet, dass der Anteil der Fahrzeuge, der sich auf dem rechten Fahrstreifen befindet bei weiter ansteigender Verkehrsstärke in der Hauptfahrbahn nur noch leicht zunimmt. Bei sehr hohen Verkehrsstärken in der Hauptfahrbahn wird der Verlauf der Funktion wieder steiler. Es befindet sich dann wieder ein größerer Anteil der Verkehrsstärke auf dem rechten Fahrstreifen. Die Funktionen stellen somit über das gesamte Verkehrsstärkespektrum in der Hauptfahrbahn einen plausiblen Zusammenhang dar.

7.3.2 Weiterentwickelte Bemessungsdiagramme für den Einfädungsvorgang

Unter Berücksichtigung der in Ziffer 7.3.1 ermittelten funktionalen Zusammenhänge zur Bestimmung der Verkehrsstärke im rechten Fahrstreifen von drei- und zweistreifigen Hauptfahrbahnen sowie der im HBS 2001 angegebenen Kapazität für den Einfahrtstyp E 1 / E 2 (vgl. Tab. 3.6) und der Auslastungsgrade für die einzelnen Stufen der Qualität des Verkehrsablaufs (vgl. Tab. 3.1) werden abschließend Bemessungsdiagramme für den Einfädungsvorgang erstellt. Den Bemessungsdiagrammen liegt die Gleichung 6.1 zugrunde.

Bei der Darstellung der Bemessungsdiagramme ist als Randbedingung für den Einsatzbereich die zulässige Verkehrsstärke in der einstreifigen Verteilerfahrbahn zu berücksichtigen, die im HBS 2001 mit 1.800 Pkw-E/h angegeben wird [24]. Dieser Wert dient als Grenze für den in den Bemessungsdiagrammen dargestellten Einsatzbereich, da die Verkehrsstärke in der Einfahrt nicht größer sein kann als die zulässige Verkehrsstärke in der oberhalb liegenden Verteilerfahrbahn. Die Einsatzgrenze der Bemessungsdiagramme liegt daher bei einer Verkehrsstärke in der Einfahrt (q_E) von 1.800 Pkw-E/h (vgl. Bild 7.10 und Bild 7.11). Der Einsatzbereich der übrigen Qualitätsstufen wird dieser Einsatzgrenze angepasst.

Darüber hinaus muss als weitere Randbedingung die zulässige Verkehrsstärke in der drei- bzw. zweistreifigen Hauptfahrbahn berücksichtigt werden (vgl. Tab. 3.3 und Tab. 3.4). Ist die Verkehrsstärke in der Einfahrt (q_E) sehr klein, wird für die Ermittlung der Qualitätsstufe des Verkehrsablaufs in der Einfahrt die Verkehrsstärke in der Hauptfahrbahn (q_H) maßgebend. Für die Bemessung der Hauptfahrbahn gelten die im HBS 2001 aufgeführten zulässigen Verkehrsstärken für Autobahnabschnitte außerhalb der Knotenpunkte [24]. Die zulässigen Verkehrsstärken hängen dabei von der Längsneigung, der Funktion und der Lage des Autobahnabschnitts, dem Schwerverkehrsanteil und den Steuerungsbedingungen ab. Bei der Bemessung von planfreien Knotenpunkten wird die Längsneigung vernachlässigt, weil davon ausgegangen wird, dass sich die Knotenpunkte in der Regel an Abschnitten mit geringer Längsneigung befinden. Als Grenze für den Einsatzbereich der Bemessungsdiagramme für Einfahrten wird die maximal zulässige Verkehrsstärke in der Hauptfahrbahn gewählt. Diese maximal zulässige Verkehrsstärke ergibt sich für Autobahnabschnitte innerhalb von Ballungsräumen (ohne Geschwindigkeitsbeschränkung) mit einem Schwerverkehrsanteil von 20 %. Die Verkehrsstärken werden mit diesem Schwerverkehrsanteil in die Einheit Pkw-E/h umgerechnet. Für dreistreifige Hauptfahrbahnen ergibt sich somit als Einsatzgrenze im Bemessungsdiagramm eine Verkehrsstärke von 6.120 Pkw-E/h (vgl. Tab. 3.4). Für zweistreifige Hauptfahrbahnen ergibt sich unter den gleichen Randbedingungen eine Verkehrsstärke von 4.320 Pkw-E/h als Einsatzgrenze. Die Einsatzbereiche der übrigen Qualitätsstufen werden diesen Einsatzgrenzen angepasst.

Unter Berücksichtigung der zuvor beschriebenen Grenzen für den Einsatzbereich ergeben sich für den Einfahrtstyp E 1 / E 2 an drei- und an zweistreifigen Hauptfahrbahnen die in den Bildern 7.10 und 7.11 dargestellten weiterentwickelten Bemessungsdiagramme.

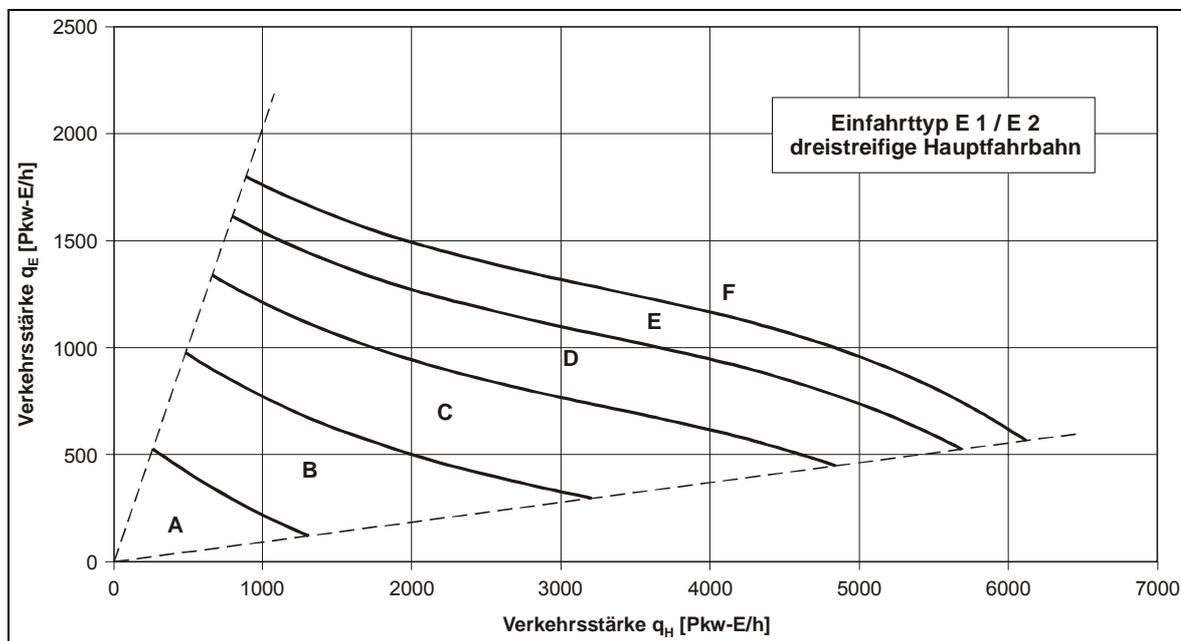


Bild 7.10: Bemessungsdiagramm für den Einfädelungsvorgang für den Einfahrtstyp E 1 / E 2 an dreistreifigen Hauptfahrbahnen

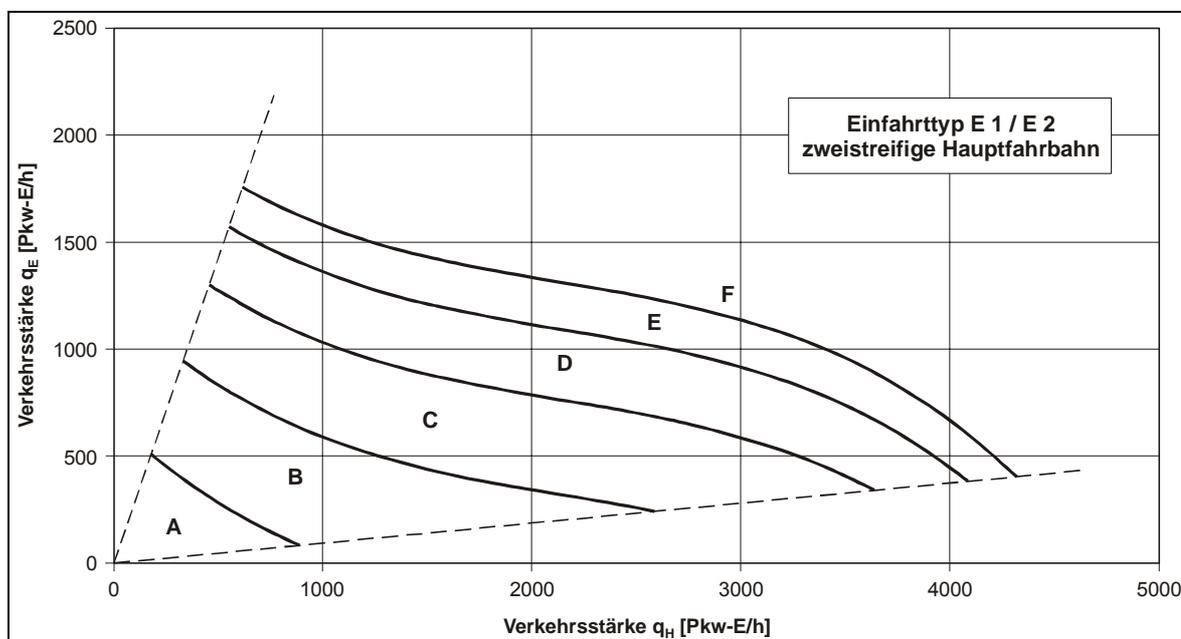


Bild 7.11: Bemessungsdiagramm für den Einfädelungsvorgang für den Einfahrtstyp E 1 / E 2 an zweistreifigen Hauptfahrbahnen

Ein Vergleich der weiterentwickelten Bemessungsdiagramme (vgl. Bild 7.10 und Bild 7.11) mit den entsprechenden Bemessungsdiagrammen des HBS 2001 (vgl. Bild 3.7 und Bild 3.8) wird in den folgenden Bildern grafisch dargestellt.

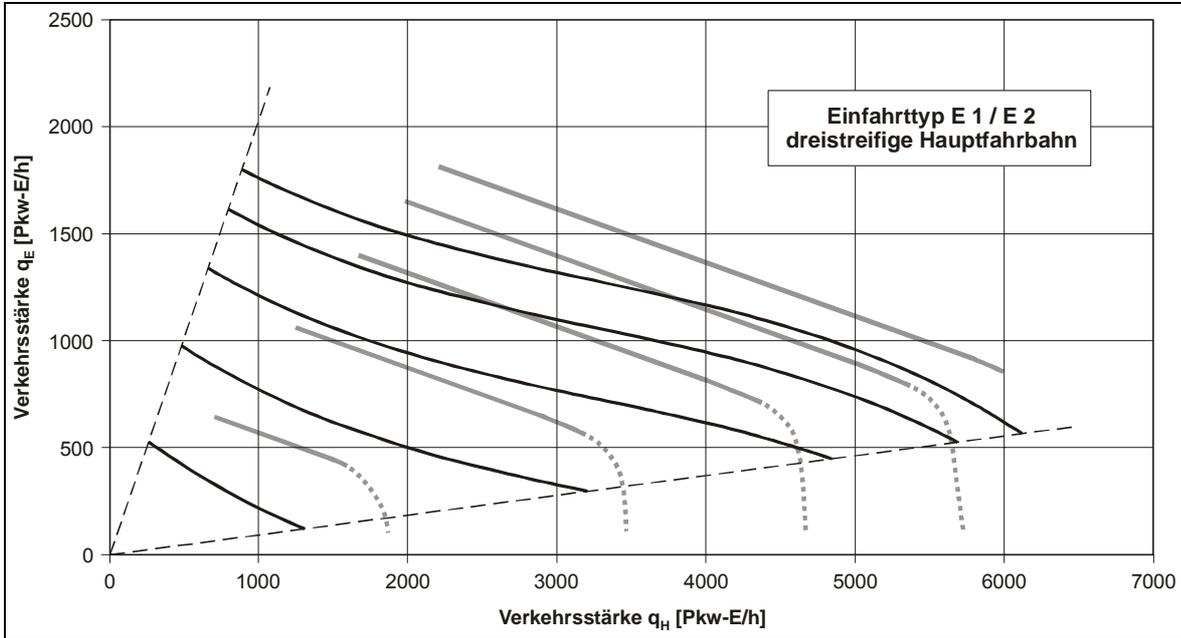


Bild 7.12: Vergleich des weiterentwickelten Bemessungsdiagramms mit dem Bemessungsdiagramm des HBS 2001 für den Einfahrtstyp E 1 / E 2 an dreistreifigen Hauptfahrbahnen

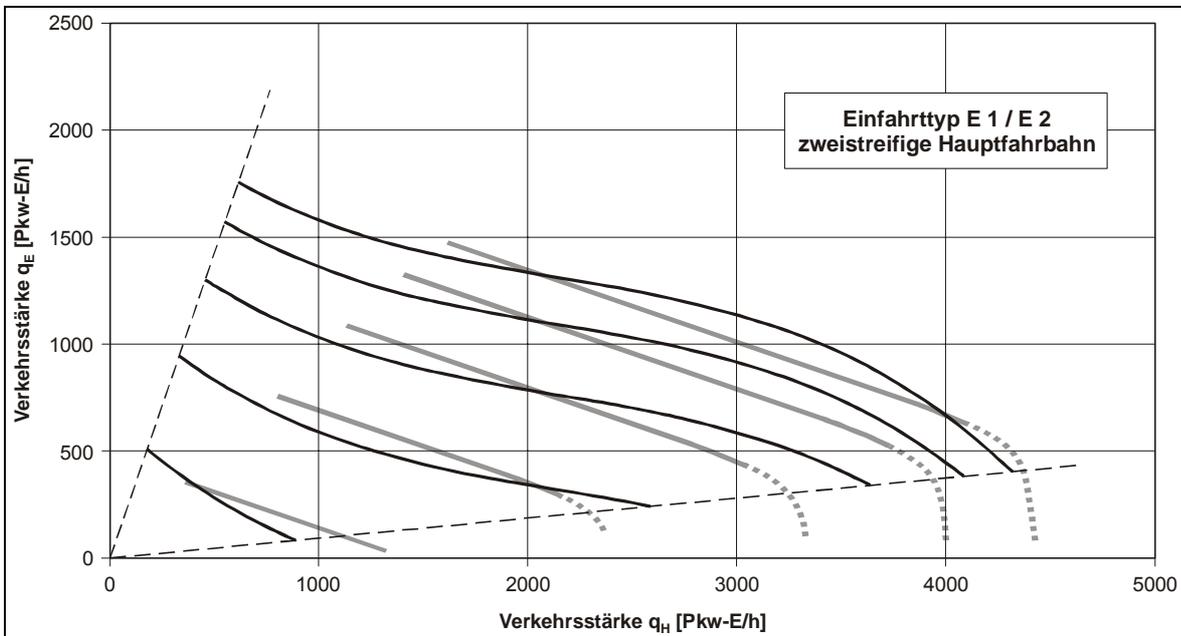


Bild 7.13: Vergleich des weiterentwickelten Bemessungsdiagramms mit dem Bemessungsdiagramm des HBS 2001 für den Einfahrtstyp E 1 / E 2 an zweistreifigen Hauptfahrbahnen

Das Bild 7.12 zeigt, dass das weiterentwickelte Bemessungsdiagramm für dreistreifige Hauptfahrbahnen im Vergleich zum Bemessungsdiagramm des HBS 2001 deutliche Unterschiede aufweist. Bei der Bemessung der Qualitätsstufe A ist die Differenz mit mehr als 600 Pkw-E/h am größten. Bis zur Qualitätsstufe E wird der Unterschied zwischen den beiden Bemessungsfunktionen immer geringer. Bei der Qualitätsstufe E liegt die Differenz zwischen 160 Pkw-E/h und 370 Pkw-E/h.

Bezüglich der zweistreifigen Hauptfahrbahnen weist das weiterentwickelte Bemessungsdiagramm im Vergleich zum Bemessungsdiagramm des HBS 2001 hingegen geringe Differenzen zwischen den einzelnen Qualitätsstufen auf (vgl. Bild 7.13). Hier weichen die Funktionen für die Bemessung der Qualitätsstufen maximal 130 Pkw-E/h voneinander ab. Diese Differenzen resultieren vor allem aus dem linearen bzw. nichtlinearen funktionalen Zusammenhang der Bemessungsfunktionen.

Darüber hinaus zeigen die Bilder 7.12 und 7.13, dass die weiterentwickelten Bemessungsdiagramme eine Erweiterung des Einsatzbereichs für geringe Verkehrsstärken in der Hauptfahrbahn ermöglichen. Insbesondere für diese Verkehrsstärken lag eine umfangreiche Datenbasis vor.

Aufgrund der geringen Anzahl an Untersuchungsstellen ist jedoch zu empfehlen, die Erkenntnisse insbesondere für die zweistreifigen Hauptfahrbahnen weiter zu verdichten. Der in den Bildern 7.12 und 7.13 dargestellte Vergleich der im Rahmen der vorliegenden Arbeit erstellten Bemessungsdiagramme mit den gültigen Bemessungsdiagrammen des HBS 2001.

7.4 Fazit

Im Rahmen der Weiterentwicklung der Bemessungsverfahren wurden einzelne Bemessungsansätze weiterentwickelt. Die Kapazität der Aus- und Einfahrtstypen wurde durch die Anwendung verschiedener Verfahren und damit unter Berücksichtigung neuer Erkenntnisse aus der Literatur bestimmt. Für einige Aus- und Einfahrtstypen, für die bislang lediglich eine unzureichende Datenbasis zur Ermittlung der Kapazität vorlag, konnten zusätzliche Erkenntnisse gewonnen werden. Die Methoden, die auf der Analyse von Zusammenbrüchen des Verkehrsablaufs beruhen, konnten jedoch nur in einzelnen Untersuchungsstellen angewendet werden und auch für diese Untersuchungsstellen war die Datenbasis aufgrund der geringen Anzahl verzeichneter Zusammenbrüche sehr klein. Die mit diesen Verfahren ermittelten Ergebnisse können deshalb lediglich Tendenzen darstellen.

Für die Bemessung von Einfahrten wurde auf der Grundlage der empirisch erhobenen Daten ein funktionaler Zusammenhang für die Bestimmung der Verkehrsstärke im rechten

Fahrstreifen der Hauptfahrbahn ermittelt. Unter Verwendung der zulässigen Einfädelungsverkehrsstärken für die einzelnen Stufen der Qualität des Verkehrsablaufs und des funktionalen Zusammenhangs für die Bestimmung der Verkehrsstärke im rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn wurden die Bemessungsdiagramme für den Einfädelungsvorgang weiterentwickelt. Die weiterentwickelten Bemessungsdiagramme bilden einen plausiblen Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt und der Verkehrsstärke in der Hauptfahrbahn ab, da die Verkehrsstärke im rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn nicht als prozentualer Anteil der Gesamtverkehrsstärke angenommen wird. Gleichzeitig erfolgt eine Abstimmung mit den zulässigen Einfädelungsverkehrsstärken. Darüber hinaus werden die Einsatzbereiche der Bemessungsdiagramme für kleine Verkehrsstärken in der Hauptfahrbahn erweitert. Dabei wurde das Verfahren so angelegt, dass es die im HBS 2001 angegebenen Randbedingungen aufgreift. Aufgrund der geringen Anzahl an Untersuchungsstellen für einzelne Einfahrtstypen ist jedoch zu empfehlen, die Erkenntnisse insbesondere für zweistreifigen Hauptfahrbahnen weiter zu verdichten.

8 Zusammenfassung

Für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen ist die Kenntnis der Kapazität von großer Bedeutung, da durch eine den verkehrlichen Randbedingungen angepasste Bemessung Kapazitätsengpässe vermieden werden können. In der vorliegenden Arbeit werden die bisherigen Erkenntnisse bezüglich der Kapazität und der Qualität des Verkehrsablaufs in planfreien Knotenpunkten überprüft und weiterentwickelt. Aus- und Einfahrten stehen dabei im Mittelpunkt.

Die bisherigen Untersuchungen über die Bemessung von Aus- und Einfahrten sowie über die Bemessungsverfahren, die daraus entwickelt wurden, bilden die Grundlage für die Überprüfung und die Weiterentwicklung der derzeit in Deutschland gültigen Bemessungsansätze. Die Literaturanalyse zeigt, dass die Kapazität nur zuverlässig bestimmbar ist, wenn wiederholte Überlastungen beobachtet werden können. Da der Verkehrsablauf im Bereich der Kapazität jedoch sehr instabil ist, geht man inzwischen davon aus, dass die Kapazität besser durch eine Kapazitätsverteilung und nicht durch einen festen Wert beschrieben werden kann. Die Kapazität ist dann eine Verkehrsstärke, die mit einer bestimmten Zusammenbruchswahrscheinlichkeit erreicht werden kann. Diese Erkenntnisse wurden in Bezug auf die Ermittlung der Kapazität in Aus- und Einfahrten bisher nicht berücksichtigt.

Zur Überprüfung und zur Weiterentwicklung der Bemessungsverfahren für planfreie Knotenpunkte werden umfangreiche empirische Untersuchungen zum Verkehrsablauf durchgeführt. Um Aussagen über die Kapazität treffen zu können, ist es erforderlich, die empirische Untersuchungen in hoch belasteten Aus- und Einfahrten durchzuführen. Aus diesem Grund wurden insgesamt 23 Untersuchungsstellen in den durch hohe Verkehrsstärken geprägten Ballungsräumen Hannover, München, Frankfurt/Main und Mannheim ausgewählt. Für die Erhebung der Daten wurden in Zusammenarbeit mit den zuständigen Behörden ausschließlich vorhandene stationäre Messquerschnitte verwendet. Insgesamt wurden zwölf Ausfahrten der Ausfahrtstypen A 1 bis A 5 und elf Einfahrten der Einfahrtstypen E 1 bis E 5 untersucht. Die relevanten Daten im Bereich hoher Verkehrsstärken konnten in zahlreichen Untersuchungsstellen beobachtet werden, sodass die geschaffene umfangreiche Datenbasis als Grundlage für die Überprüfung und Weiterentwicklung der Bemessungsverfahren herangezogen werden konnte.

Im nächsten Schritt wurden die Bemessungsverfahren des HBS 2001 anhand der Datenbasis überprüft. Die Überprüfung zeigt, dass eine Weiterentwicklung der im HBS 2001 angegebenen Kapazitäten für die einzelnen Aus- und Einfahrtstypen notwendig ist. Insbesondere die in der Literaturanalyse beschriebenen neuen Erkenntnisse bezüglich der Ermittlung der Kapazität sind dabei zu berücksichtigen. Die Verwendung des Aus-

lastungsgrads als Maß für die Beschreibung des Verkehrsablaufs in Aus- und Einfahrten erweist sich hingegen als zweckmäßig. Die Überprüfung der Bemessungsverfahren für Einfahrten zeigt außerdem, dass die verschiedenen Bemessungsansätze des HBS 2001 nicht aufeinander abgestimmt sind. Das Bemessungsverfahren ist daher für die praktische Anwendung nur bedingt geeignet. Auch der im Bemessungsverfahren für Einfahrten angesetzte funktionale Zusammenhang zur Beschreibung der Verteilung des Verkehrs in der Hauptfahrbahn oberhalb der Einfahrt spiegelt die empirisch ermittelten Daten nur ungenau wider.

Aufbauend auf der Überprüfung der Bemessungsverfahren wurden die einzelnen Bemessungsansätze weiterentwickelt. Dafür wurde zunächst die Ermittlung der Kapazität für alle Aus- und Einfahrtstypen mit verschiedenen Verfahren durchgeführt. Einerseits wurden Verfahren zur Schätzung der Kapazität mittels Verkehrsstärken und Geschwindigkeiten eingesetzt, bei denen Übergänge vom stabilen in den instabilen Verkehrszustand betrachtet werden. Andererseits wurde die Kapazität durch die Analyse von Fundamentaldiagrammen unter Anwendung eines makroskopischen Verkehrsflussmodells ermittelt. Die Methoden, die auf der Analyse von Zusammenbrüchen des Verkehrsablaufs beruhen, konnten jedoch nur in einzelnen Untersuchungsstellen angewendet werden und auch für diese Untersuchungsstellen war die Datenbasis aufgrund der geringen Anzahl verzeichneter Zusammenbrüche sehr klein. Die mit diesen Verfahren ermittelten Ergebnisse können deshalb lediglich Tendenzen darstellen.

Für die Bemessung von Einfahrten wurde darüber hinaus ein funktionaler Zusammenhang für die Verteilung des Verkehrs in der Hauptfahrbahn oberhalb der Einfahrt ermittelt. Es wurde zunächst überprüft, welche Zufallsgrößen einen Einfluss auf die Verkehrsstärke im rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn oberhalb der Einfahrt besitzen. Darauf aufbauend wurden 16 verschiedene lineare und nichtlineare Regressionsansätze formuliert. Die Regressionsrechnungen konnten aufgrund der Lage der stationären Messquerschnitte jedoch nur für die Einfahrtstypen E 1 und E 2 durchgeführt werden. Für den Einfahrtstyp E 1 an zweistreifigen Hauptfahrbahnen lag dabei eine Untersuchungsstelle und für die Einfahrtstypen E 1 und E 2 an dreistreifigen Hauptfahrbahnen insgesamt drei Untersuchungsstellen vor. Nach der Durchführung der Regressionsrechnungen erwies sich eine Funktion in Form eines Polynoms 3. Grades für die genannten Einfahrtstypen sowohl an zwei- als auch an dreistreifigen Hauptfahrbahnen als sehr gut geeignet. Auf der Grundlage dieses neu ermittelten funktionalen Zusammenhangs wurden die bestehenden Bemessungsdiagramme für den Einfädeltvorgang weiterentwickelt. Im Vergleich zum Bemessungsdiagramm des HBS 2001 weist das weiterentwickelte Bemessungsdiagramm für dreistreifige Hauptfahrbahnen deutliche Unterschiede auf. Bei der Bemessung der Qualitätsstufe A ist die Differenz mit mehr als 600 Pkw-E/h am größten. Bis zur Qualitätsstufe E wird der Unterschied zwischen den beiden Bemessungsfunktionen immer geringer. Bei der Qualitätsstufe E liegt die Differenz zwischen 160 Pkw-E/h und 370 Pkw-

E/h. Im Bezug auf die zweistreifigen Hauptfahrbahnen weist das weiterentwickelte Bemessungsdiagramm im Vergleich zum entsprechenden Bemessungsdiagramm des HBS 2001 hingegen geringe Differenzen zwischen den einzelnen Qualitätsstufen auf. Hier weichen die Bemessungsfunktionen aller Qualitätsstufen maximal 130 Pkw-E/h voneinander ab. Diese Differenzen resultieren vor allem aus dem linearen bzw. nichtlinearen funktionalen Zusammenhang der Bemessungsfunktionen. Die weiterentwickelten Bemessungsdiagramme stellen einen plausiblen Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt und der Verkehrsstärke in der Hauptfahrbahn dar. Gleichzeitig wird der Einsatzbereich für geringe Verkehrsstärken in der Hauptfahrbahn erweitert. Aufgrund der geringen Anzahl an Untersuchungsstellen ist jedoch zu empfehlen, die Erkenntnisse insbesondere für zweistreifigen Hauptfahrbahnen zu verdichten.

9 Literaturverzeichnis

- [1] AASHTO
A Policy on Geometric Design of Highways and Streets.
Washington D. C. 1990
- [2] ADAMS, C.
Überprüfung der Bemessungsverfahren für Ausfahrten an Richtungsfahrbahnen.
Studienarbeit am Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau,
Universität Hannover 2002
- [3] AERDE, M. VAN
A Single Regime Speed-Flow-Density Relationship for Freeways and Arterials.
Preprint for the 74th Annual Meeting of the Transportation Research Board,
Washington 1995
- [4] BECKER, H.; SCHMUCK, A.
Verkehrsablauf an Autobahnbaustellen.
Informationen Verkehrsplanung und Straßenwesen, Heft 14, München 1983
- [5] BISCHOFBERGER, N.; KELLERHALS, CH.
Leistungsfähigkeit von Einfahrten in Hochleistungsstraßen.
Heft 333 der Schriftenreihe des Eidgenössischen Verkehrs- und Energiewirtschafts-
departments, herausgegeben vom Bundesamt für Straßenbau, Zürich 1995
- [6] BRANSTON, D.
Models of single lane headway distributions.
in: Transportation Science, Vol. 10, Nr. 2, 1976
- [7] BREITENSTEIN, J.
Analyse und Weiterverfolgung gemessener Zeitreihen als Entscheidungsgrundlage
für Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen.
Heft 247 der Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“,
herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr, Bonn 1978
- [8] BREUER, F.J.
Elemente des Verkehrsablaufs an kreuzungsfreien Straßenknoten.
Heft 88 der Schriftenreihe „Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, heraus-
gegeben vom Bundesminister für Verkehr, Bonn 1969
- [9] BRILON, W.; WESTPHAL, S.
Bemessung von Einfahrten an planfreien Knotenpunkten.
Heft 671 der Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“,
herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr, Bonn 1994
- [10] BRILON, W.; U. A.
Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen.
Forschungsauftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, Lehrstuhl für Verkehrs-
wesen der Ruhr-Universität Bochum, Stand: Januar 2001

- [11] BRILON, W.; U. A.
Verfahren für die Berechnung der Kapazität und Qualität des Verkehrsablaufes auf Straßen.
Heft 669 der Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr, Bonn 1994
- [12] BUCKLEY, D.
A semi-Poisson model of traffic flow.
in: Transportation Science, Vol. 2, S. 107-133, 1968
- [13] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU- UND WOHNUNGSWESEN
StVO - Straßenverkehrs-Ordnung, Bonn 2000
- [14] BUSCH, F.
Spurbelastungen und Häufigkeiten von Spurwechseln auf einer dreispurigen BAB-Richtungsfahrbahn.
In: Straßenverkehrstechnik, Heft 6/1984, S. 228-231
- [15] COHEN, S.
Capacité des autoroutes – Concept et méthodes d'évaluation.
in: TEC, Nr. 52, S. 30-32, 1982
- [16] COHEN, S.
Méthodes d'estimation de la capacité des autoroutes.
Institut National de Recherche sur les Transports et leur sécurité (INRETS), rapport de recherche 62, Arcueil 1983
- [17] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN
Richtlinien für die Anlage von Straßen (RAS), Teil: Querschnitte (RAS-Q), Köln 1996
- [18] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN
Richtlinien für die Anlage von Straßen (RAS), Teil: Leitfaden für die funktionale Gliederung des Straßennetzes (RAS-N), Köln 1988
- [19] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN
Richtlinien für die Anlage von Straßen (RAS), Teil: Linienführung (RAS-L), Köln 1995
- [20] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN
Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL), Teil III: Knotenpunkte (RAL-K), Abschnitt 2: Planfreie Knotenpunkte (RAL-K-2), Köln 1976
- [21] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN
Aktuelle Hinweise zur Gestaltung planfreier Knotenpunkte außerhalb bebauter Gebiete – Ergänzung zu den RAL-K-2 (AH-RAL-K-2), Köln 1993
- [22] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN
Entwurfshinweise für planfreie Knotenpunkte an Straßen der Kategoriengruppe B – Ergänzungen zu den RAL-K-2 (RAS-K-2-B), Köln 1995
- [23] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN
Merkblatt über Detektoren im Straßenverkehr, Köln 1991

-
- [24] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN
Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS), Köln 2001
- [25] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN
Begriffsbestimmungen, Teil: Verkehrsplanung, Straßenentwurf und Straßenbetrieb,
Köln 2001
- [26] GRIMM, A.
Einfluss variabler Aggregierungsintervalle auf Fundamentaldiagramme von Auto-
bahnen.
Diplomarbeit am Fachgebiet Verkehrstechnik, Universität Gesamthochschule Kassel
2001
- [27] GREENSHIELDS, B. D.
Study in Highway Capacity.
Proceedings of the Highway Research Board, Vol. 14, 1935
- [28] HALL, F.; BRILON, W.
Comparison of Uncongested Speed-flow Relationships Using Data from German
Autobahns and North American Freeways.
Transportation Research Record 1457, TRB, National Research Council,
Washington D.C. 1991
- [29] HERZ, R.; SCHLICHTER, H. G.; SIEGENER, W.
Angewandte Statistik für Verkehrs- und Regionalplaner.
2. Auflage, Werner-Ingenieur-Texte, Düsseldorf 1992
- [30] HOFFMANN, S.
Einsatzbereiche betrieblicher Maßnahmen in planfreien Knotenpunkten.
Heft 22 der Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und
Städtebau, Universität Hannover, Hannover 1999
- [31] HOTOP, R.
Untersuchungen zum Rechtsfahrgebot auf Bundesautobahnen.
In: Straßenverkehrstechnik, Heft 1/1997, S. 1-7
- [32] HYDE, T.; WRIGHT, C.
Extreme value methods for estimating road traffic capacity.
Transportation Research Board, Vol. 20, Nr. 2, S. 125-138, 1986
- [33] JACOBS, F.
Ein Stationaritätstest für Zeitlückenfolgen.
Arbeitsblätter zum Straßen- und Verkehrswesen, Heft 1, Universität Stuttgart,
Stuttgart 1979
- [34] JURVILLIER, J.-C.
Capacité des autoroutes – Restriction en cas d'incident.
in: TEC, Nr. 53/54, S. 33-35, 1982

- [35] KAPLAN, E.L.; MEIER, P.
Nonparametric estimation from incomplete observation.
in: Journal of the American Statistical Association, Vol. 53, S. 457-481, Alexandria 1958
- [36] KELLER, H.; SACHSE, T.
Einfluss des Bezugsintervalls in Fundamentaldiagrammen auf die zutreffende Beschreibung der Leistungsfähigkeit von Straßenabschnitten.
Heft 614 der Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr, Bonn 1992
- [37] KELLER, H.; SACHSE, T.
Zum Einfluß konstanter und stationärer Bezugsintervalle auf die Gestalt des Fundamentaldiagramms.
In: Straßenverkehrstechnik, Heft 10/1995, S. 467-475
- [38] KERNER, B.S.; REHBORN, H.
Messungen des Verkehrsflusses: Charakteristische Eigenschaften von Staus auf Autobahnen.
In: Internationales Verkehrswesen, Heft 5/1998, S. 196-203
- [39] KIM, Y.; KELLER, H.
Zur Dynamik zwischen Verkehrszuständen im Fundamentaldiagramm.
in: Straßenverkehrstechnik 9/2001, S. 433-442
- [40] KORTE, J. W.
Grundlagen der Straßenverkehrsplanung in Stadt und Land.
Bauverlag GmbH, Wiesbaden 1960
- [41] KOESTER, H.
Ausgestaltung der Anschluss-, Abzweig- und Kreuzungsstellen der Reichsautobahn.
in: Die Straße 3, Nr. 13, S. 420-424, 1936
- [42] KRASSER, G.
Entwurfsgrundsätze für planfreie städtische Knotenpunkte.
Heft 164 der Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr, Bonn 1974
- [43] LAWLESS, J.F.
Statistical Models and Methods for Lifetime Data.
Verlag Wiley & Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, 1982
- [44] LEUTZBACH, W.
Einführung in die Theorie des Verkehrsflusses.
Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 1972

-
- [45] LEUTZBACH, W.; NEUHERZ, M.
Auswertung bisheriger deutscher praktischer und theoretischer Untersuchungen zum Verkehrsablauf auf mehrstreifigen Richtungsfahrbahnen mit Berücksichtigung unterschiedlicher Verkehrsvorschriften.
Heft 662 der Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr, Bonn 1993
- [46] LIGER, M.
Capacité des autoroutes – Premiers résultats.
in: TEC, Nr. 52, S. 33-36, 1982
- [47] LISTL, G.
Anwendung neuer Technologien zur Erfassung des Verkehrsablaufs.
Heft 14 der Schriftenreihe „Verkehr“ der Universität Kassel, 2003
- [48] LORENZ, M.; ELEFTERIADOU, L.
Defining Freeway Capacity as Function of Breakdown Probability.
Transportation Research Record 1776, TRB, National Research Council, Washington D.C. 2001
- [49] MEINEFELD, P.
Untersuchungen des Verkehrsablaufs an Ausfahrten mit Spursubtraktion.
Heft 213 der Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr, Bonn 1976
- [50] MEINEFELD, P.; SCHNÜLL, R.
Untersuchungen des Verkehrsablaufs an Ausfahrten mit Spursubtraktion – Kontrollmessungen an einer Variante mit Ausfädelungsspur.
Heft 383 der Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr, Bonn 1983
- [51] MINDERHOUD, M.M.; BOTMA, H. BOVY, P.H.L.
Assessment of Roadway Capacity Estimation Methods.
Transportation Research Record 1572, TRB, National Research Council, Washington D.C. 1997
- [52] MINDERHOUD, M.M.; BOTMA, H. BOVY, P.H.L.
The Product Limit Method to estimate Roadway Capacity.
in: Motorway Traffic Flow Analysis – New Methodologies and recent empirical Findings, Delft University of Technology, Delft 1998
- [53] MÜCK, J.
Ein mikroskopisches Simulationsmodell für den Verkehr auf Autobahneinfahrten.
Diplomarbeit am Institut für Systemdynamik und Regelungstechnik, Universität Stuttgart 1994

- [54] OKAMURA, H.; WATANABE, S.; WATANABE, T.
An Empirical Study on the Capacity of Bottlenecks on the Basic Suburban Expressways Sections in Japan.
Proceedings of the 4th International Symposium on Highway Capacity, Transportation Research Board, S. 120-129, Washington D.C., 2000
- [55] PLATE, E. J.
Statistik und angewandte Wahrscheinlichkeitslehre für Bauingenieure.
Ernst, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin 1993
- [56] PONZLET, M.
Auswirkungen von zeitlich befristeten Leistungsfähigkeiten.
Heft 718 der Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr, Bochum 1996
- [57] PONZLET, M.
Auswirkungen von systematischen und umfeldbedingten Schwankungen des Geschwindigkeitsverhaltens und deren Beschreibung in Verkehrsflussmodellen.
Heft 16 der Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum, Bochum 1996
- [58] RETZKO, H.-G.; BRÜHL, F.; KÜCHLER, R.
Planung- und Entwurfsgrundsätze für umweltgerechte Stadtautobahnen.
Heft 97 der Schriftenreihe „Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen“ der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Kirschbaum Verlag, Bonn 1982
- [59] ROESS, R.P.
Efforts towards the Third Edition of the “Highway Capacity Manual”.
in: Traffic Engineering & Control 24, Heft8/1983, S. 351-355
- [60] SACHS, L.
Statistische Auswertemethoden. Dritte, neubearbeitete und erweiterte Auflage.
Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 1971
- [61] SCHNÜLL, R.
Untersuchungen über die Gestaltung der Ausfahrten an planfreien Knotenpunkten.
Heft 107 der Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr, Bonn 1970
- [62] SCHNÜLL, R.; DAMMANN, W.; HOFFMANN, S.
Überführung der bisherigen sektoralen Entwurfsrichtlinien RAS-L, RAS-Q, RAL-K-2 und RAS-K-2-B zu ganzheitlichen Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA).
Schlussbericht zum FE 02.199/2000 im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, Hannover 2002

-
- [63] SCHNÜLL, R.; FRIEDRICH, B.; DAMMANN, W.
Erforschung des Verkehrsablaufs an Knotenpunkten unter Dauerhochlast während der EXPO 2000 in Hannover.
Schlussbericht zum Forschungsauftrag der Deutschen Forschungsgemeinschaft, Hannover 2002
- [64] SCHNÜLL, R.; HOFFMANN, S.; IRZIK, M.
Ausfahrten an Richtungsfahrbahnen.
Schlussbericht zum FE 02.195/1999/ARB im Auftrag des Bundesministers für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Hannover 2000
- [65] SCHNÜLL, R.; HOFFMANN, S.; KÖLLE, M.; MENNICKEN, C.
Leistungsfähigkeit von Verflechtungsstrecken an planfreien Knotenpunkten.
Heft 796 der Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr, Bonn 2001
- [66] SCHNÜLL, R.; LENART, R.
Anpassung der Entwurfsrichtlinien für planfreie Knotenpunkte (RAL-K-2 1976) an jüngere Entwurfsrichtlinien.
Heft 589 der Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr, Bonn 1990
- [67] SCHRÖDER, A.
Überprüfung der Bemessungsverfahren für Einfahrten an Richtungsfahrbahnen.
Diplomarbeit am Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Universität Hannover 2002
- [68] SPARMANN, U.
Spurwechselforgänge auf zweispurigen BAB-Richtungsfahrbahnen.
Heft 263 der Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr, Bonn 1978
- [69] STUWE, B.
Leistungsfähigkeit von Autobahneinfahrten.
in: Straßenverkehrstechnik, Heft 1/1989, S. 20-24, 1989
- [70] THEIS, C.
Modellierung des Fahrverhaltens an Autobahnanschlußstellen.
Veröffentlichung des Instituts für Verkehrswesen, Universität Karlsruhe 1997
- [71] TOORENBURG, J. VAN
Praktijkwaarden voor de capaciteit (Practical empirical values for capacity).
Rijkswaterstaat Dients Verkeerskunde, Rotterdam, 1986
- [72] TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (TRB)
Highway Capacity Manual (HCM), Special Report 209.
TRB, National Research Council, Washington D.C., 1985
- [73] TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (TRB)
Highway Capacity Manual (HCM), Special Report 209.
TRB, National Research Council, Washington D.C., 1994

- [74] TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (TRB)
Highway Capacity Manual (HCM), Special Report 209.
TRB, National Research Council, Washington D.C., 1997
- [75] TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (TRB)
Highway Capacity Manual (HCM), Special Report 209.
TRB, National Research Council, Washington D.C., 2000
- [76] TRAPP, K.-H.
Leistungsfähigkeit von Einfahrten in planfreien Knotenpunkten.
Heft 174 der Schriftenreihe „Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr, Bonn 1974
- [77] TRAPP, K.-H.
Untersuchung des baulichen Aufwandes und der Leistungsfähigkeit von Autobahnknoten.
Heft 230 der Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr, Bonn 1977
- [78] TRAPP, K.-H.
Untersuchungen über die Verkehrssicherheit im Einfahrbereich planfreier Knotenpunkte.
Heft 302 der Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr, Bonn 1980
- [79] UHFELDER, H.
Richtlinien für die technische Anlage von Autobahnen.
in: HAFRABA – Mitteilungsblatt 3, Nr. 11, S. 2-7 (später: Die Autobahn), 1931
- [80] VAUBEL, U. O.
Verkehrsablauf an Autobahneinfahrten in Ballungsräumen.
Heft 167 der Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr, Bonn 1974
- [81] WETTERLING, K.
Mehrspuriger Richtungsverkehr bei unterschiedlichen Fahrvorschriften.
Heft 292 der Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr, Bonn 1980
- [82] WIEDEMANN, R.
Simulation des Verkehrsflusses.
Heft 8 der Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen, Universität Karlsruhe, 1974
- [83] WIRTH, W.; STAUFER, M.
Überarbeitung des Kapitels 4 (Einfahrten) des Entwurfs für ein Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen.
Entwurf des Schlussberichts zum Forschungsauftrag 02.194/1999/ARB des Bundesministers für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, München 2000

-
- [84] WU, N.
Verkehr auf Schnellstraßen im Fundamentaldiagramm – Ein neues Modell und seine Anwendungen.
in: Straßenverkehrstechnik, Heft 8/2000, S. 378-388
- [85] ZACKOR, H.; KÜHNE, R.; BALZ, W.
Untersuchungen des Verkehrsablaufs im Bereich der Leistungsfähigkeit und bei instabilem Fluß.
Heft 524 der Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr, Bonn 1988
- [86] ZACKOR, H.; MÖLLER, B.; RHEINLÄNDER, J.-H.
Strategien zur Verkehrssteuerung an hochbelasteten BAB-Anschlussstellen.
Heft 803 der Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn 2001
- [87] ZURLINDEN, H.
Ganzjahresanalyse des Verkehrsflusses auf Straßen und Verkehrsleistung.
Heft 26 der Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrswesen (geplant), Ruhr-Universität Bochum, Bochum 2003

10 Abbildungsverzeichnis

Bild 2.1: Theoretischer Zusammenhang zwischen Verkehrsstärke, Verkehrsdichte und mittlerer momentaner Geschwindigkeit (Fundamentaldiagramm)	5
Bild 2.2: Übergänge zwischen den Verkehrszuständen im Fundamentaldiagramm [39]	7
Bild 3.1: Zweistreifige Ausfahrt mit Fahrstreifensubtraktion, Standard vor 1977 [49]	11
Bild 3.2: Zweistreifige Ausfahrt (Ausfahrttyp A 4) nach den RAL-K-2 [20]	11
Bild 3.3: Ausfahrttypen an Hauptfahrbahnen [20][21][22]	11
Bild 3.4: Einfahrttypen E 1 bis E 5 an Hauptfahrbahnen [20]	13
Bild 3.5: Abhängigkeit der Fahrstreifenaufteilung von der Verkehrsstärke (1-Minuten-Intervall), nach SPARMANN [67]	17
Bild 3.6: Mittlere Fahrstreifenaufteilung in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke (1-Minuten-Intervalle) nach BUSCH [14]	17
Bild 3.7: Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs für den Einfädelungsvorgang in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke der Hauptfahrbahn und der Verkehrsstärke der Einfahrt für die Einfahrttypen E 1 und E 2 an dreistreifigen Hauptfahrbahnen [24]	25
Bild 3.8: Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs für den Einfädelungsvorgang in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke der Hauptfahrbahn und der Verkehrsstärke der Einfahrt für die Einfahrttypen E 1 und E 2 an zweistreifigen Hauptfahrbahnen [24]	25
Bild 3.9: Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs für den Einfädelungsvorgang in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke der Hauptfahrbahn und der Verkehrsstärke der Einfahrt für den Einfahrttyp E 4 an zweistreifigen Hauptfahrbahnen [24]	26
Bild 3.10: Beeinflussungsbereiche und maßgebende Kenngrößen des Verkehrsablaufs für Einfahrten und Ausfahrten [74]	27
Bild 3.11: Methoden zur Schätzung der Kapazität, nach MINDERHOUD [51]	29
Bild 3.12: Geschätzte Verteilungsfunktionen der Kapazität bei der Anwendung verschiedener Methoden [86]	37
Bild 3.13: Inverse S-Form des Modells von VAN AERDE [3]	40
Bild 3.14: Verlauf der homogenen Verkehrszustände in der k-v-Beziehung nach WU [83]42	
Bild 3.15: Verlauf der q-v-Beziehung nach WU [83]	42
Bild 4.1: Qualität einer Verkehrszustandsbeschreibung in Abhängigkeit von der Länge des Bezugsintervalls [7]	49

Bild 6.1: Verkehrsstärke im rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn, Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Werten (HBS 2001) für den Einfahrttyp E 1 / E 2 an dreistreifigen Hauptfahrbahnen	72
Bild 6.2: Verkehrsstärke im rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn, Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Werten (HBS 2001) für den Einfahrttyp E 1 an zweistreifigen Hauptfahrbahnen	73
Bild 7.1: Analyse des Geschwindigkeitsniveaus, AK München Nord (Einfahrttyp E 5), 05.04.2000	79
Bild 7.2: Dynamisches q-v-Diagramm, AK München Nord (Einfahrttyp E 5)	80
Bild 7.3: q-v-Diagramm AK München-Nord mit Kennzeichnung der Messwerte unmittelbar vor dem Übergang in einen instabilen Verkehrszustand	81
Bild 7.4: Wahrscheinlichkeit für einen Übergang in den instabilen Verkehrszustand für q_E , AK München-Nord, Einfahrttyp E 5	83
Bild 7.5: Geschätzte Verteilungsfunktion der Kapazität für q_E mit der Breakdown Probability Methode, AK München-Nord, Einfahrttyp E 5	84
Bild 7.6: Geschätzte Verteilungsfunktion der Kapazität mit der Methode von ZURLINDEN, Mönchhof Dreieck (Ausfahrttyp A 2)	87
Bild 7.7: Anwendung des Modells von VAN AERDE, AS Hannover-Lahe (Ausfahrttyp A 2)	90
Bild 7.8: Funktionaler Zusammenhang zwischen q_{H1} und q_H für den Einfahrttyp E 1 / E 2 an dreistreifigen Hauptfahrbahnen	100
Bild 7.9: Funktionaler Zusammenhang zwischen q_{H1} und q_H für den Einfahrttyp E 1 / E 2 an zweistreifigen Hauptfahrbahnen	101
Bild 7.10: Bemessungsdiagramm für den Einfädelungsvorgang für den Einfahrttyp E 1 / E 2 an dreistreifigen Hauptfahrbahnen	103
Bild 7.11: Bemessungsdiagramm für den Einfädelungsvorgang für den Einfahrttyp E 1 / E 2 an zweistreifigen Hauptfahrbahnen	103
Bild 7.12: Überlagerung modifiziertes Bemessungsdiagramm – gültiges Bemessungsdiagramm HBS 2001 für den Einfahrttyp E 1 / E 2 an dreistreifigen Hauptfahrbahnen	104
Bild 7.13: Überlagerung modifiziertes Bemessungsdiagramm – gültiges Bemessungsdiagramm HBS 2001 für den Einfahrttyp E 1 / E 2 an zweistreifigen Hauptfahrbahnen	104

11 Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1: Grenzwerte der Auslastungsgrade für die Qualitätsstufen A bis F [24]	21
Tab. 3.2: Zulässige Verkehrsstärken in der Ausfahrt für die Ausfahrttypen A 1 bis A 4 [24]	22
Tab. 3.3: Kapazitäten der Hauptfahrbahn ohne Geschwindigkeitsbeschränkung für Gefälle oder Steigungen bis 2 % [24]	23
Tab. 3.4: Kapazitäten der Hauptfahrbahn mit Geschwindigkeitsbeschränkung für Gefälle oder Steigungen bis 2 % [24]	23
Tab. 3.5: Berechnung der Einfädelungsverkehrsstärke bei fahrstreifenbezogenen Bemessungsverkehrsstärken [24]	24
Tab. 3.6: Zulässige Einfädelungsverkehrsstärken für die Einfahrttypen E 1 bis E 5 [24]	24
Tab. 3.7: Einteilung der Qualitätsstufen für Aus- und Einfahrten [74]	28
Tab. 3.8: Analogie zwischen Lebensdauer- und Kapazitätsanalyse, nach ZURLINDEN [86]	35
Tab. 3.9: Anwendung der Product Limit Methode auf den Verkehrsfluss [86]	36
Tab. 3.10: : Homogene Verkehrszustände und ihre zugehörigen Parameter [83]	42
Tab. 3.11: Formeln und Parameter des Modells von WU [83]	43
Tab. 4.1: Überblick über die Untersuchungsstellen	47
Tab. 5.1: Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf für den Ausfahrttyp A 1	54
Tab. 5.2: Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf für den Ausfahrttyp A 2	55
Tab. 5.3: Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf für den Ausfahrttyp A 3	56
Tab. 5.4: Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf für den Ausfahrttyp A 4	57
Tab. 5.5: Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf für den Ausfahrttyp A 5	58
Tab. 5.6: Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf für die Einfahrttypen E 1 und E 2	59
Tab. 5.7: Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf für den Einfahrttyp E 3	60
Tab. 5.8: Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf für den Einfahrttyp E 4	61

Tab. 5.9: Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf für den Einfahrtstyp E 5	62
Tab. 6.1: Überprüfung der Kapazität für den Ausfahrtstyp A 1	66
Tab. 6.2: Überprüfung der Kapazität für den Ausfahrtstyp A 2	66
Tab. 6.3: Überprüfung der Kapazität für den Ausfahrtstyp A 4	67
Tab. 6.4: Überprüfung der Kapazität für den Einfahrtstyp E 1	68
Tab. 6.5: Verkehrsstärken in den Einfahrrampen, Einfahrtstypen E 3, E 4 und E 5	69
Tab. 6.6: Vergleich der Bemessungsansätze für den Einfahrtstyp E 2 (dreistreifige Hauptfahrbahn)	70
Tab. 6.7: Vergleich der Bemessungsansätze für den Einfahrtstyp E 1 (zweistreifige Hauptfahrbahn)	70
Tab. 7.1: Untersuchungsstellen für die Anwendung der Breakdown Probability Methode und die gewählten Grenzhgeschwindigkeiten v_{grenz}	80
Tab. 7.2: Untersuchungsstellen für die Breakdown Probability Methode	82
Tab. 7.3: Ergebnisse der Kapazitätsermittlung mit der Breakdown Probability Methode	85
Tab. 7.4: Anwendung der Methode von ZURLINDEN in der Untersuchungsstelle im Mönchhof Dreieck (Ausfahrtstyp A 2)	86
Tab. 7.5: Ergebnisse der Kapazitätsermittlung mit der Methode von ZURLINDEN	87
Tab. 7.6: Untersuchungsstellen für die Anwendung des Modells von VAN AERDE	89
Tab. 7.7: Maximale Verkehrsdichten k_{max} als Randbedingung für die Optimierung des Modells von VAN AERDE	89
Tab. 7.8: Ergebnisse der Kapazitätsermittlung mit dem Modell von VAN AERDE	91
Tab. 7.9: Ergebnisse der Kapazitätsermittlung	92
Tab. 7.10: Ergebnisse der Korrelationsanalyse	94
Tab. 7.11: Regressionsansätze für die Ermittlung einer Funktion zur Bestimmung der Verkehrsstärke im rechten Fahrstreifen der Hauptfahrbahn	96
Tab. 7.12: Ergebnisse der Regressionsrechnungen zur Ermittlung der Verkehrsstärke im rechten Fahrstreifen von dreistreifigen Hauptfahrbahnen	97

Anhang

Anhangverzeichnis

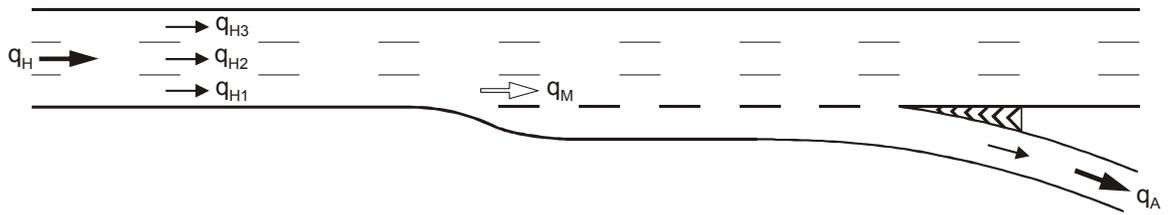
- Anhang 2.1: Ausfahrttypen A 1 bis A 4
Bezeichnung der Fahrzeugströme [24]
- Anhang 2.2: Einfahrttypen E 1 bis E 5
Bezeichnung der Fahrzeugströme [24]
- Anhang 4.1: Untersuchungsstelle in der AS Friedberg, Ausfahrttyp A 1
- Anhang 4.2: Untersuchungsstelle im Viernheimer Dreieck, Ausfahrttyp A 1
- Anhang 4.3: Untersuchungsstelle im Bad Homburger Kreuz, Ausfahrttyp A 1
- Anhang 4.4: Untersuchungsstelle in der AS Hannover-Lahe, Ausfahrttyp A 2
- Anhang 4.5: Untersuchungsstelle im AD Hannover-Süd, Ausfahrttyp A 2
- Anhang 4.6: Untersuchungsstelle im Mönchhof Dreieck, Ausfahrttyp A 2
- Anhang 4.7: Untersuchungsstelle im Viernheimer Dreieck, Ausfahrttyp A 2
- Anhang 4.8: Untersuchungsstelle im AK Neufahrn, Ausfahrttyp A 3
- Anhang 4.9: Untersuchungsstelle im AK München-Nord (Fahrtrichtung München),
Ausfahrttyp A 4
- Anhang 4.10: Untersuchungsstelle im AK München-Nord (Fahrtrichtung Nürnberg),
Ausfahrttyp A 4
- Anhang 4.11: Untersuchungsstelle im Wiesbadener Kreuz, Ausfahrttyp A 4
- Anhang 4.12: Untersuchungsstelle im Wiesbadener Kreuz, Ausfahrttyp A 5
- Anhang 4.13: Untersuchungsstelle in der AS Friedberg, Einfahrttyp E 1
- Anhang 4.14: Untersuchungsstelle in der AS Garching-Süd, Einfahrttyp E 1
- Anhang 4.15: Untersuchungsstelle in der AS Oberschleißheim, Einfahrttyp E 1
- Anhang 4.16: Untersuchungsstelle im Viernheimer Dreieck, Einfahrttyp E 2
- Anhang 4.17: Untersuchungsstelle im Wiesbadener Kreuz, Einfahrttyp E 3
- Anhang 4.18: Untersuchungsstelle im Mönchhof Dreieck, Einfahrttyp E 4
- Anhang 4.19: Untersuchungsstelle im AK Neufahrn, Einfahrttyp E 4
- Anhang 4.20: Untersuchungsstelle im Mainspitz Dreieck (Fahrtrichtung Rüsselsheim),
Einfahrttyp E 4
- Anhang 4.21: Untersuchungsstelle im Mainspitz Dreieck (Fahrtrichtung Wiesbaden),
Einfahrttyp E 4
- Anhang 4.22: Untersuchungsstelle im AK München-Nord, Einfahrttyp E 5
- Anhang 4.23: Untersuchungsstelle im Offenbacher Kreuz, Einfahrttyp E 5
- Anhang 5.1: Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf
AS Friedberg (Ausfahrttyp A 1), Viernheimer Dreieck (Ausfahrttyp A 1)
- Anhang 5.2: Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf
Bad Homburger Kreuz (Ausfahrttyp A 1), AS Hannover-Lahe (Ausfahrttyp
A 2)
- Anhang 5.3: Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf
AD Hannover-Süd (Ausfahrttyp A 2), Mönchhof Dreieck (Ausfahrttyp A 2)

Anhangverzeichnis

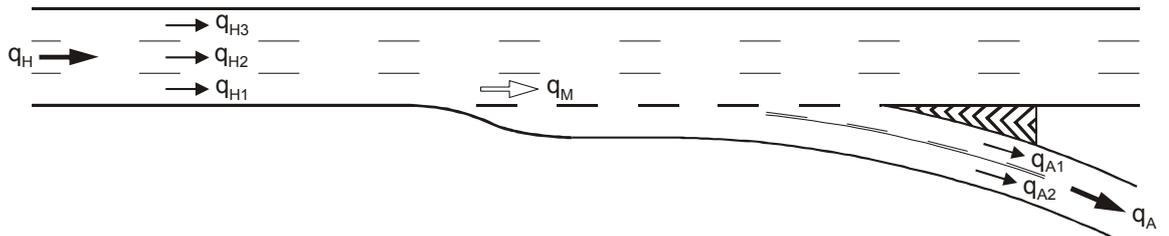
- Anhang 5.4: Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf Viernheimer Dreieck (Ausfahrttyp A 2), AK Neufahrn (Ausfahrttyp A 3)
- Anhang 5.5: Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf AK München-Nord (Fahrtrichtung München, Ausfahrttyp A 4), AK München-Nord (Fahrtrichtung Nürnberg, Ausfahrttyp A 4)
- Anhang 5.6: Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf Wiesbadener Kreuz (Ausfahrttyp A 4), Wiesbadener Kreuz (Ausfahrttyp A 5)
- Anhang 5.7: Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf AS Friedberg (Einfahrttyp E 1), AS Garching-Süd (Einfahrttyp E 1)
- Anhang 5.8: Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf AS Oberschleißheim (Einfahrttyp E 1), Viernheimer Dreieck (Einfahrttyp E 2)
- Anhang 5.9: Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf Wiesbadener Kreuz (Einfahrttyp E 3), Mönchhof Dreieck (Einfahrttyp E 4)
- Anhang 5.10: Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf AK Neufahrn (Einfahrttyp E 4), Mainspitz Dreieck (Fahrtrichtung Rüsselsheim, Einfahrttyp E 4)
- Anhang 5.11: Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf Mainspitz Dreieck (Fahrtrichtung Wiesbaden, Einfahrttyp E 4), AK München-Nord (Einfahrttyp E 5)
- Anhang 5.12: Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf Offenbacher Kreuz (Einfahrttyp E 5)
- Anhang 7.1: Übergänge vom stabilen in den instabilen Verkehrszustand AS Friedberg (Ausfahrttyp A 1), Viernheimer Dreieck (Ausfahrttyp A 1)
- Anhang 7.2: Übergänge vom stabilen in den instabilen Verkehrszustand Bad Homburger Kreuz (Ausfahrttyp A 1), AS Hannover-Lahe (Ausfahrttyp A 2)
- Anhang 7.3: Übergänge vom stabilen in den instabilen Verkehrszustand AD Hannover-Süd (Ausfahrttyp A 2), Mönchhof Dreieck (Ausfahrttyp A 2)
- Anhang 7.4: Übergänge vom stabilen in den instabilen Verkehrszustand Wiesbadener Kreuz (Ausfahrttyp A 4), Wiesbadener Kreuz (Ausfahrttyp A 5)
- Anhang 7.5: Übergänge vom stabilen in den instabilen Verkehrszustand AS Friedberg (Einfahrttyp E 1), AS Garching-Süd (Einfahrttyp E 1)
- Anhang 7.6: Übergänge vom stabilen in den instabilen Verkehrszustand Wiesbadener Kreuz (Einfahrttyp E 3), AK München-Nord (Einfahrttyp E 5)
- Anhang 7.7: Übergänge vom stabilen in den instabilen Verkehrszustand Offenbacher Kreuz (Einfahrttyp E 5)

- Anhang 7.8: Verteilungsfunktionen der Kapazität
Bad Homburger Kreuz (Ausfahrttyp A 1), Mönchhof Dreieck (Ausfahrttyp A 2)
- Anhang 7.9: Verteilungsfunktionen der Kapazität
Wiesbadener Kreuz (Ausfahrttyp A 4), Wiesbadener Kreuz (Ausfahrttyp A 5)
- Anhang 7.10: Verteilungsfunktionen der Kapazität
AS Friedberg (Einfahrttyp E 1), Wiesbadener Kreuz (Einfahrttyp E 3)
- Anhang 7.11: Verteilungsfunktionen der Kapazität
AK München-Nord (Einfahrttyp E 5)
- Anhang 7.12: Modell von VAN AERDE
Viernheimer Dreieck (Ausfahrttyp A 1), Bad Homburger Kreuz (Ausfahrttyp A 1)
- Anhang 7.13: Modell von VAN AERDE
AS Hannover-Lahe (Ausfahrttyp A 2), Mönchhof Dreieck (Ausfahrttyp A 2)
- Anhang 7.14: Modell von VAN AERDE
Wiesbadener Kreuz (Ausfahrttyp A 4), Wiesbadener Kreuz (Ausfahrttyp A 5)
- Anhang 7.15: Modell von VAN AERDE
AS Friedberg (Einfahrttyp E 1), AS Garching-Süd (Einfahrttyp E 1)
- Anhang 7.16: Modell von VAN AERDE
Wiesbadener Kreuz (Einfahrttyp E 3), AK München-Nord (Einfahrttyp E 5)
- Anhang 7.17: Modell von VAN AERDE
Offenbacher Kreuz (Einfahrttyp E 5)
- Anhang 7.18: Ergebnisse der Regressionsrechnungen
AS Friedberg (Einfahrttyp E 1), dreistreifige Hauptfahrbahn
- Anhang 7.19: Ergebnisse der Regressionsrechnungen
AS Garching-Süd (Einfahrttyp E 1), dreistreifige Hauptfahrbahn
- Anhang 7.20: Ergebnisse der Regressionsrechnungen
AS Oberschleißheim (Einfahrttyp E 1), zweistreifige Hauptfahrbahn
- Anhang 7.21: Ergebnisse der Regressionsrechnungen
Viernheimer Dreieck (Einfahrttyp E 2), dreistreifige Hauptfahrbahn
- Anhang 7.22: Ergebnisse der Regressionsrechnungen
Einfahrttyp E 1 / E 2, dreistreifige Hauptfahrbahn gesamt

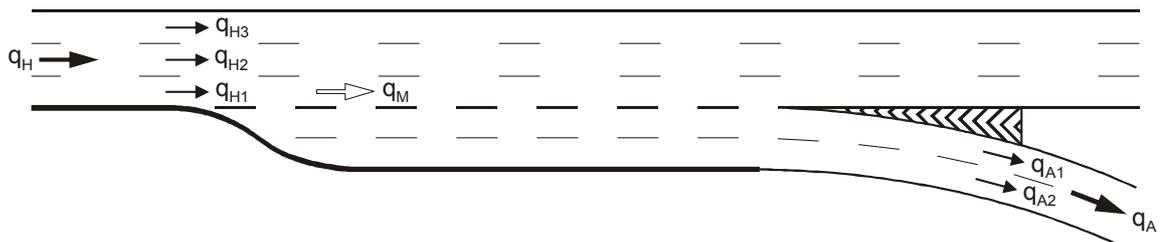
Ausfahrtstyp A 1



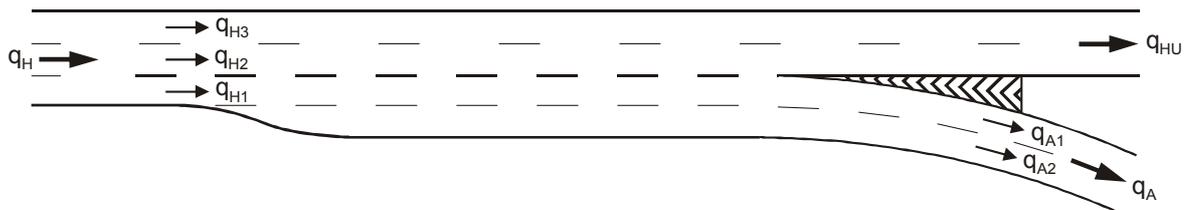
Ausfahrtstyp A 2



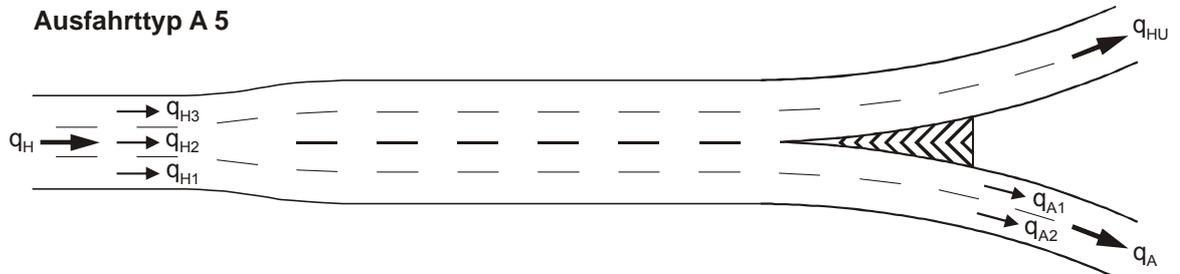
Ausfahrtstyp A 3



Ausfahrtstyp A 4

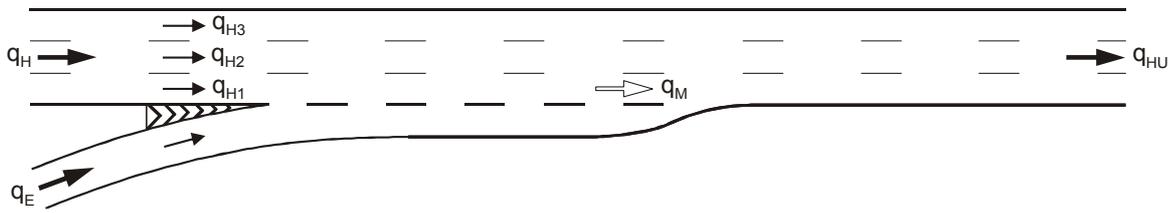


Ausfahrtstyp A 5

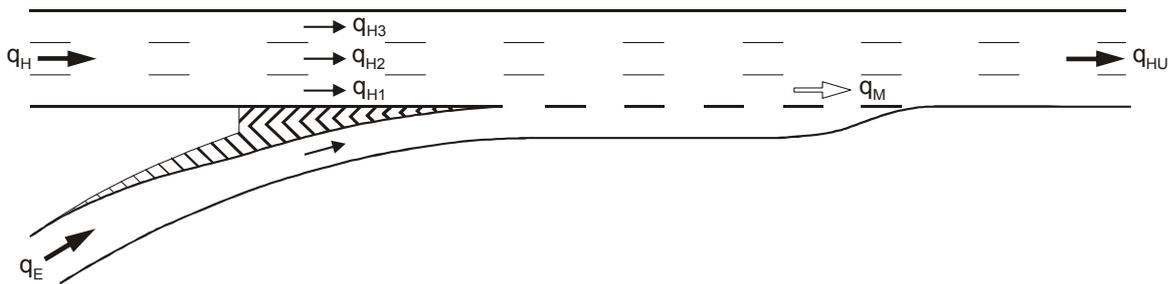


Anhang 2.2

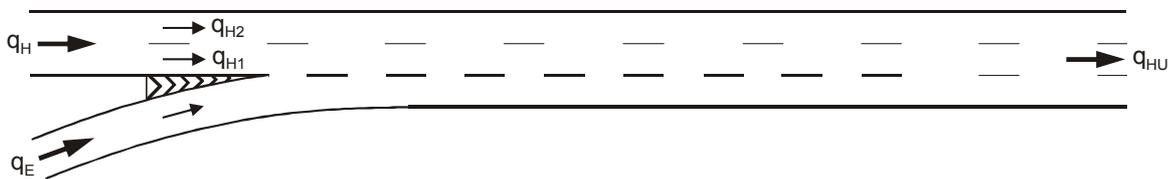
Einfahrttyp E 1



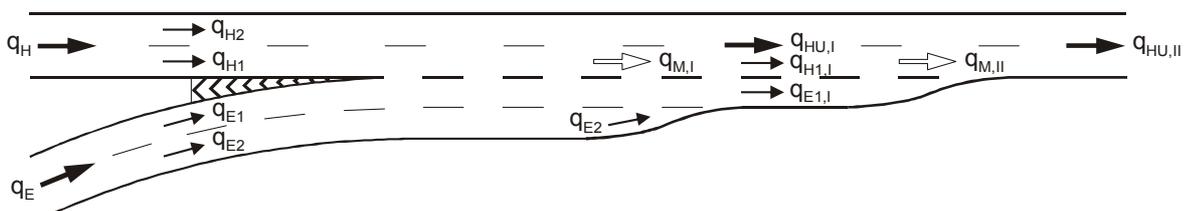
Einfahrttyp E 2



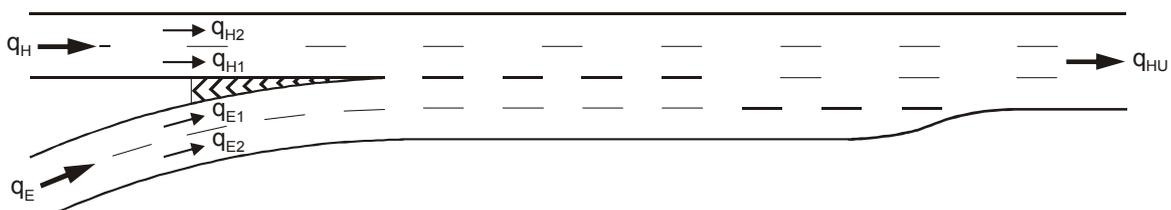
Einfahrttyp E 3



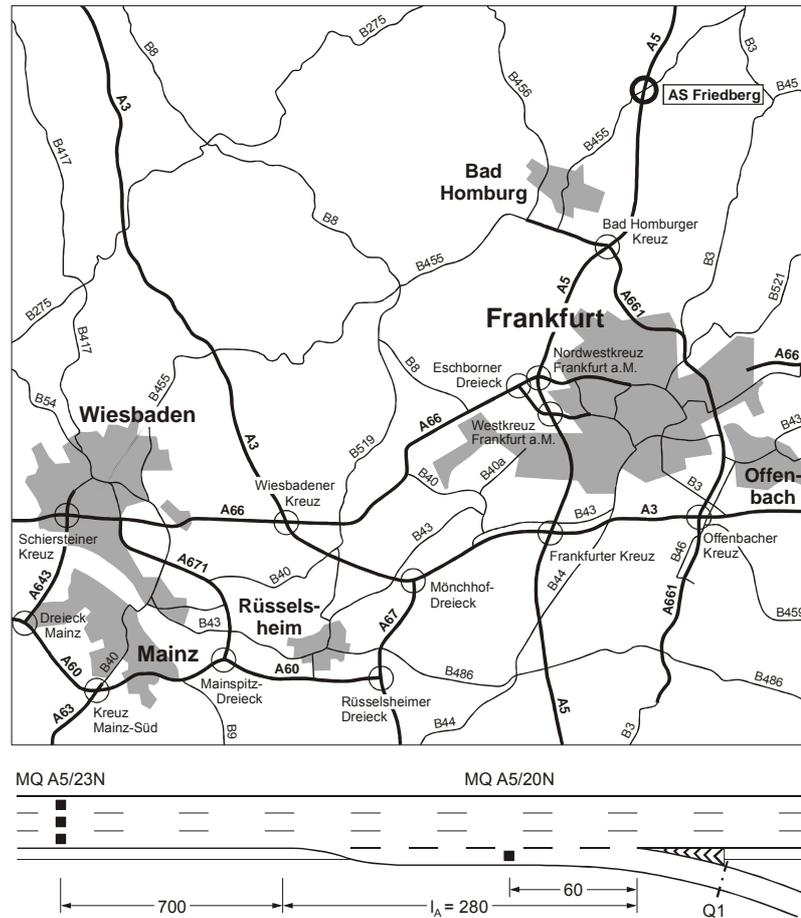
Einfahrttyp E 4



Einfahrttyp E 5



□ Lage und Abmessungen der Untersuchungsstelle



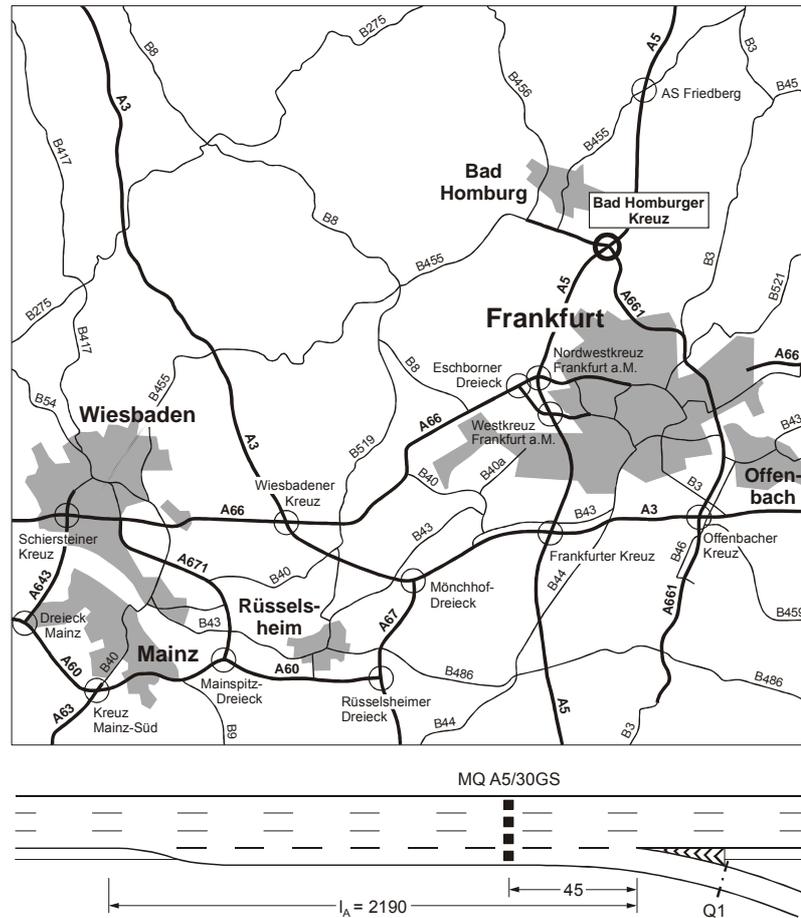
□ Charakteristika der Untersuchungsstelle

Untersuchungsstelle Autobahn und Fahrtrichtung	AS Friedberg A 5 Fahrtrichtung Kassel
Ausfahrttyp	A 1
Längsneigung in der Hauptfahrbahn	- 1,86 %
zul. Höchstgeschwindigkeit in der Ausfahrrampe	keine
zul. Höchstgeschwindigkeit in der Hauptfahrbahn	Verkehrsbeeinflussungsanlage

□ Messtage und Messdauer

Tag	Dauer	Tag	Dauer
31.01.2000	12.00 – 20.00	31.07.2000	5.30 – 20.00
04.04.2000	5.30 – 15.00	09.08.2000	5.00 – 8.00
26.06.2000	5.00 – 16.00	09.08.2000	12.00 – 20.00
26.06.2000	16.30 – 20.00	16.08.2000	5.00 – 12.00
03.07.2000	9.30 – 19.00	16.08.2000	13.00 – 16.30
24.07.2000	5.00 – 14.00	21.08.2000	5.00 – 20.00
24.07.2000	15.00 – 20.00		

□ Lage und Abmessungen der Untersuchungsstelle



□ Charakteristika der Untersuchungsstelle

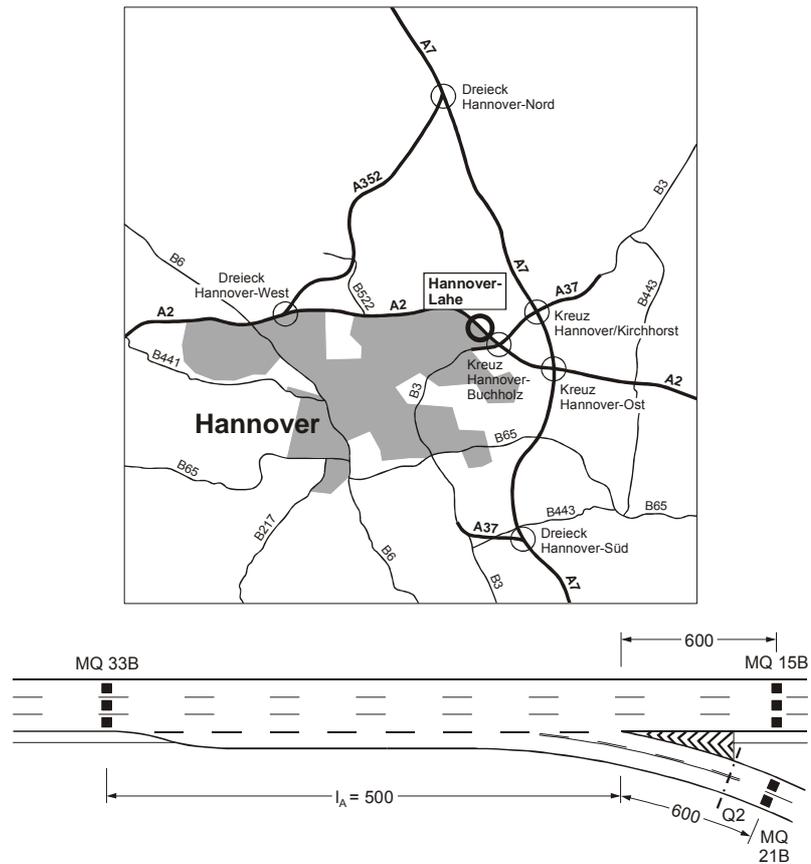
Untersuchungsstelle Autobahn und Fahrtrichtung	Bad Homburger Kreuz A 5 Fahrtrichtung Basel
Ausfahrttyp	A 1
Längsneigung in der Hauptfahrbahn	+ 2,63 %
zul. Höchstgeschwindigkeit in der Ausfahrrampe	keine
zul. Höchstgeschwindigkeit in der Hauptfahrbahn	Verkehrsbeeinflussungsanlage

Anhang 4.3b

□ **Messtage und Messdauer**

Tag	Dauer	Tag	Dauer	Tag	Dauer
19.01.2000	5.00 – 10.00	16.05.2000	5.00 – 10.00	29.08.2000	5.00 – 8.00
29.02.2000	5.00 – 10.00	17.05.2000	5.00 – 8.00	30.08.2000	5.00 – 10.00
08.03.2000	5.00 – 10.00	23.05.2000	5.00 – 10.00	31.08.2000	5.00 – 9.00
09.03.2000	5.00 – 10.00	24.05.2000	5.00 – 8.00	05.09.2000	5.00 – 10.00
22.03.2000	5.00 – 8.00	25.05.2000	5.00 – 8.00	07.09.2000	5.00 – 8.00
23.03.2000	5.00 – 10.00	06.06.2000	5.00 – 10.00	08.09.2000	5.00 – 10.00
04.04.2000	5.00 – 10.00	07.06.2000	5.00 – 10.00	12.09.2000	5.00 – 9.00
06.04.2000	5.00 – 10.00	09.06.2000	5.00 – 10.00	14.09.2000	5.00 – 10.00
11.04.2000	5.00 – 10.00	15.06.2000	5.00 – 10.00	19.09.2000	5.00 – 10.00
19.04.2000	5.00 – 10.00	10.07.2000	5.00 – 8.00	26.09.2000	5.00 – 8.00
25.04.2000	5.00 – 8.00	08.08.2000	5.00 – 10.00	27.09.2000	5.00 – 8.00
04.05.2000	5.00 – 8.00	09.08.2000	5.00 – 10.00	24.10.2000	5.00 – 10.00
05.05.2000	5.00 – 10.00	16.08.2000	5.00 – 10.00	25.10.2000	5.00 – 10.00
08.05.2000	5.00 – 10.00	17.08.2000	5.00 – 10.00	27.10.2000	5.00 – 10.00
10.05.2000	5.00 – 10.00	23.08.2000	5.00 – 10.00	01.11.2000	5.00 – 10.00
11.05.2000	5.00 – 8.30	24.08.2000	5.00 – 8.00	03.11.2000	5.00 – 10.00
12.05.2000	5.00 – 10.00	25.08.2000	5.00 – 10.00		

□ Lage und Abmessungen der Untersuchungsstelle



□ Charakteristika der Untersuchungsstelle

Untersuchungsstelle Fahrtrichtung	AS Hannover-Lahe A 2 Fahrtrichtung Berlin
Ausfahrttyp	A 2
Längsneigung in der Hauptfahrbahn	keine Angabe
Zul. Höchstgeschwindigkeit in der Ausfahrrampe	keine
Zul. Höchstgeschwindigkeit in der Hauptfahrbahn	Verkehrsbeeinflussungsanlage

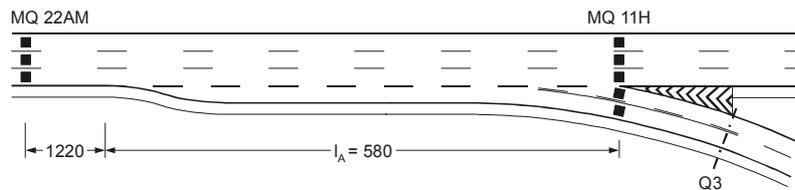
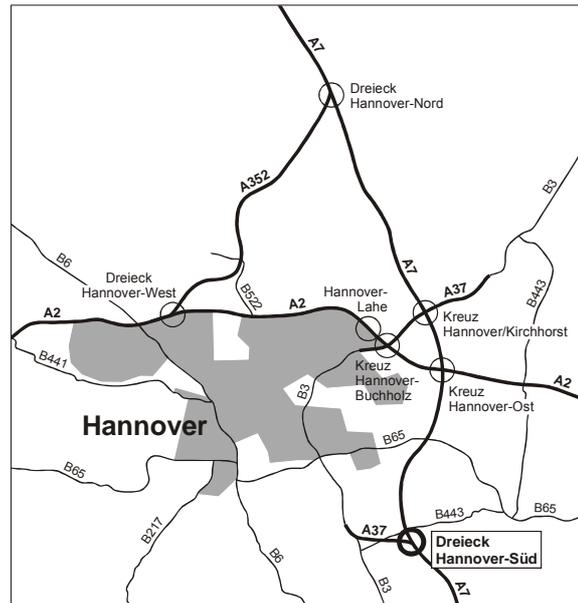
□ Messtage und Messdauer

Tag	Dauer	Tag	Dauer
22.03.2001	6.00 – 17.00	23.04.2001	6.00 – 20.00
23.03.2001	6.00 – 20.00	24.04.2001	6.00 – 20.00
24.03.2001	6.00 – 20.00	25.04.2001	6.00 – 13.30
25.03.2001	6.00 – 20.00	25.04.2001	14.00 – 20.00
26.03.2001	6.00 – 20.00	26.04.2001	6.00 – 20.00
27.03.2001	6.00 – 20.00	27.04.2001	6.00 – 20.00
28.03.2001	6.00 – 20.00	28.04.2001	6.00 – 20.00

Untersuchungsstelle in der AS Hannover-Lahe
Ausfahrttyp A 2

Anhang 4.5

□ Lage und Abmessungen der Untersuchungsstelle



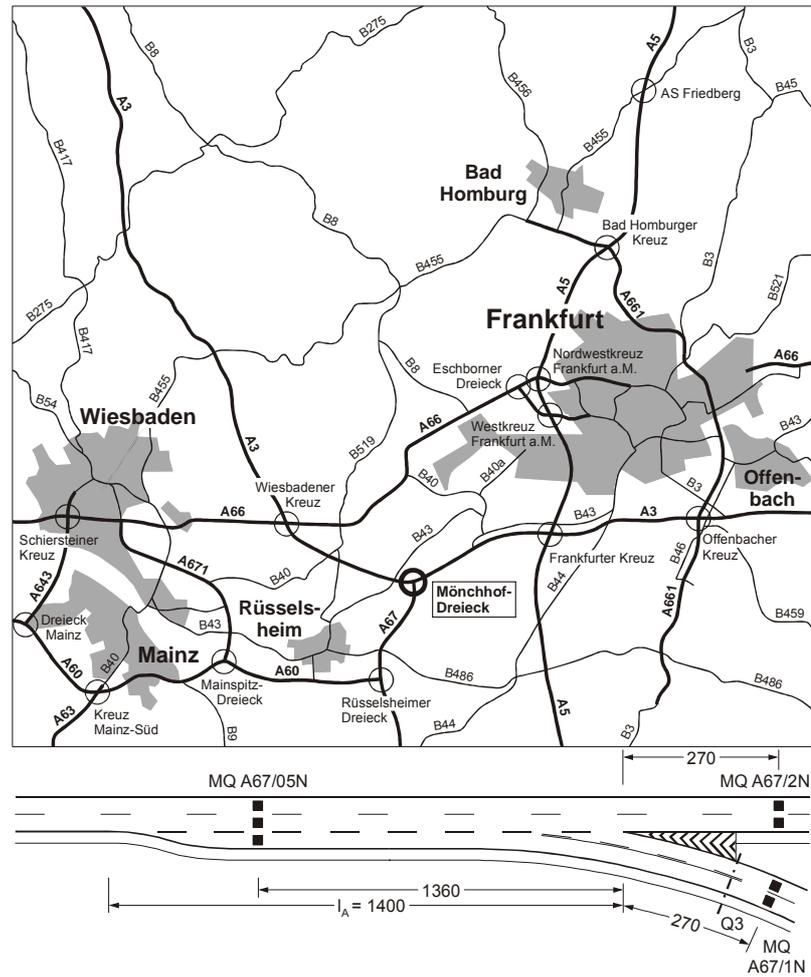
□ Charakteristika der Untersuchungsstelle

Untersuchungsstelle Fahrtrichtung	AD Hannover-Süd A 7 Fahrtrichtung Hamburg
Ausfahrttyp	A 2
Längsneigung in der Hauptfahrbahn	keine Angabe
Zul. Höchstgeschwindigkeit in der Ausfahrrampe	keine
Zul. Höchstgeschwindigkeit in der Hauptfahrbahn	Verkehrsbeeinflussungsanlage

□ Messtage und Messdauer

Tag	Dauer	Tag	Dauer
22.03.2001	6.00 – 20.00	23.04.2001	6.00 – 20.00
23.03.2001	6.00 – 20.00	24.04.2001	6.00 – 20.00
24.03.2001	6.00 – 20.00	25.04.2001	6.00 – 20.00
25.03.2001	6.00 – 20.00	26.04.2001	6.00 – 20.00
27.03.2001	6.00 – 20.00	27.04.2001	6.00 – 20.00
28.03.2001	6.00 – 20.00	28.04.2001	6.00 – 20.00

□ Lage und Abmessungen der Untersuchungsstelle



□ Charakteristika der Untersuchungsstelle

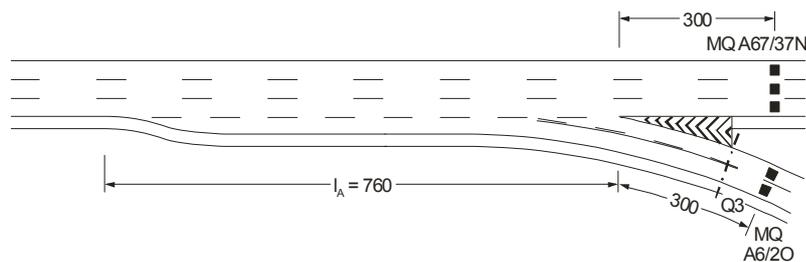
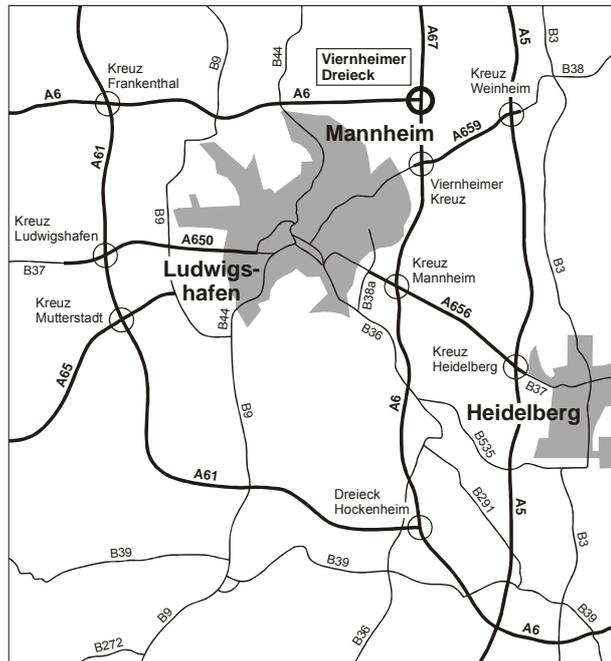
Untersuchungsstelle Autobahn und Fahrtrichtung	Mönchhof Dreieck A 67 Fahrtrichtung Frankfurt/Main
Ausfahrttyp	A 2
Längsneigung in der Hauptfahrbahn	- 0,80 %
zul. Höchstgeschwindigkeit in der Ausfahrrampe	100 km/h
zul. Höchstgeschwindigkeit in der Hauptfahrbahn	keine

□ Messtage und Messdauer

Tag	Dauer	Tag	Dauer
12.01.2000	5.00 – 13.00	03.03.2000	5.00 – 20.00
12.01.2000	14.00 – 20.00	22.03.2000	5.00 – 20.00
01.02.2000	5.00 – 20.00	28.03.2000	5.00 – 20.00
15.02.2000	5.00 – 20.00	18.05.2000	5.00 – 10.00
18.02.2000	5.00 – 20.00	18.05.2000	13.00 – 20.00
22.02.2000	5.00 – 20.00	23.05.2000	5.00 – 20.00

Anhang 4.7

□ Lage und Abmessungen der Untersuchungsstelle



□ Charakteristika der Untersuchungsstelle

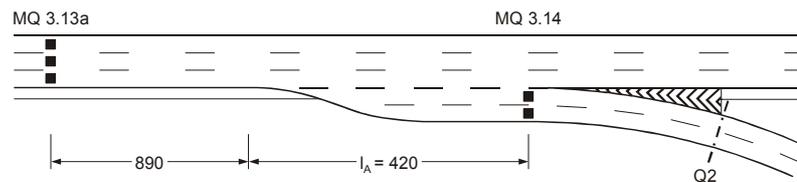
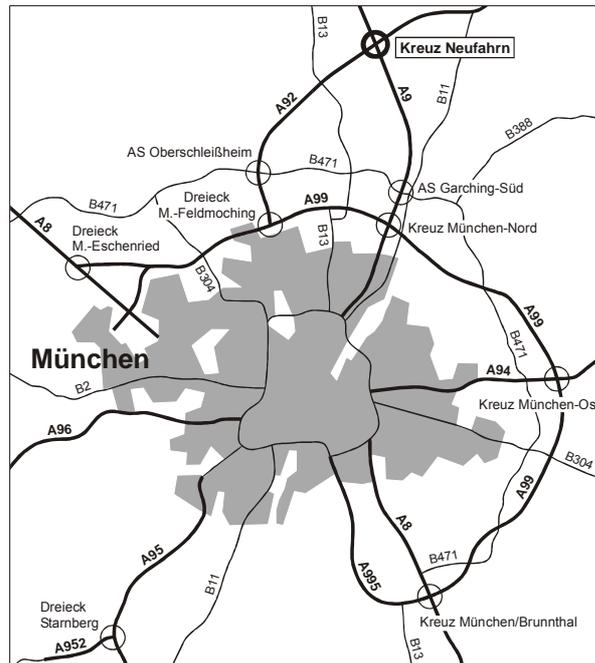
Untersuchungsstelle Fahrtrichtung	Vierheimer Dreieck A 6 Fahrtrichtung Frankfurt/Main
Ausfahrttyp	A 2
Längsneigung in der Hauptfahrbahn	- 0,01 %
Zul. Höchstgeschwindigkeit in der Ausfahrrampe	100 km/h
Zul. Höchstgeschwindigkeit in der Hauptfahrbahn	100 km/h

□ Messtage und Messdauer

Tag	Dauer	Tag	Dauer
11.01.2000	5.00 – 19.00	26.04.2000	5.00 – 20.00
14.02.2000	5.00 – 8.00	19.05.2000	5.00 – 20.00
14.02.2000	10.30 – 20.00	22.05.2000	5.00 – 20.00
27.03.2000	5.00 – 20.00	23.05.2000	15.00 – 20.00
11.04.2000	5.00 – 9.00	18.10.2000	5.00 – 20.00
11.04.2000	15.00 – 20.00	24.10.2000	5.00 – 11.00
25.04.2000	10.30 – 20.00	24.10.2000	13.00 – 20.00

Untersuchungsstelle im Vierheimer Dreieck
Ausfahrttyp A 2

□ Lage und Abmessungen der Untersuchungsstelle



□ Charakteristika der Untersuchungsstelle

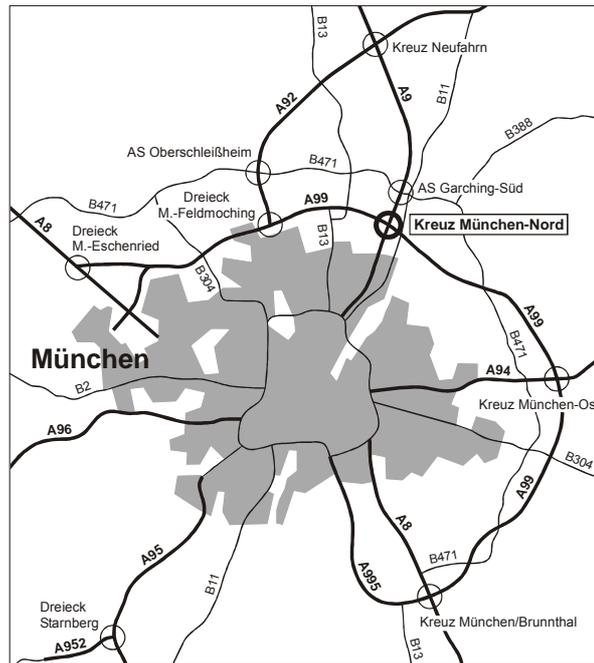
Untersuchungsstelle Autobahn und Fahrtrichtung	AK Neufahrn A 9 Fahrtrichtung Nürnberg
Ausfahrttyp	A 3
Längsneigung in der Hauptfahrbahn	- 0,80 %
zul. Höchstgeschwindigkeit in der Ausfahrrampe	80 km/h
zul. Höchstgeschwindigkeit in der Hauptfahrbahn	keine

□ Messtage und Messdauer

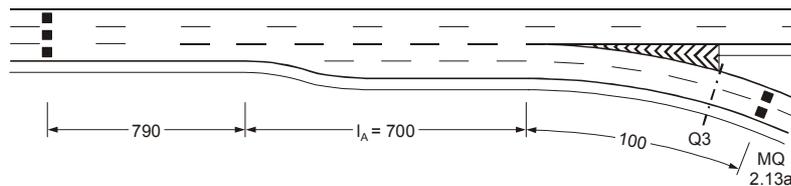
Tag	Dauer	Tag	Dauer
02.04.2001	6.00 – 20.00	05.04.2001	6.00 – 20.00
03.04.2001	6.00 – 7.30	06.04.2001	6.00 – 20.00
03.04.2001	8.30 – 20.00	07.04.2001	6.00 – 20.00
04.04.2001	6.00 – 20.00	08.04.2001	6.00 – 20.00

Anhang 4.9

□ Lage und Abmessungen der Untersuchungsstelle



MQ 2.12



□ Charakteristika der Untersuchungsstelle

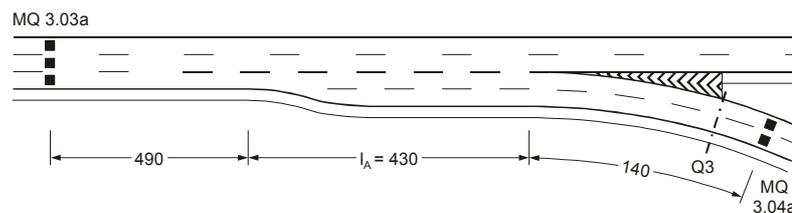
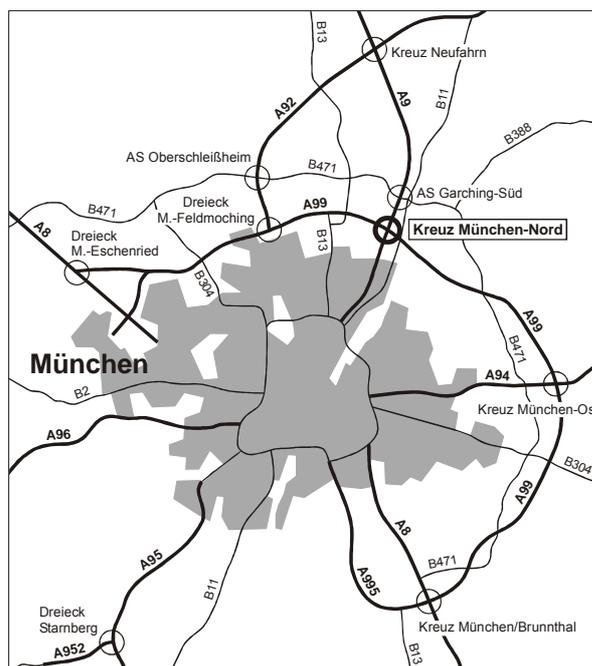
Untersuchungsstelle Autobahn und Fahrtrichtung	AK München-Nord A 9 Fahrtrichtung München
Ausfahrttyp	A 4
Längsneigung in der Hauptfahrbahn	keine Angabe
zul. Höchstgeschwindigkeit in der Ausfahrrampe	Verkehrsbeeinflussungsanlage
zul. Höchstgeschwindigkeit in der Hauptfahrbahn	Verkehrsbeeinflussungsanlage

□ Messtage und Messdauer

Tag	Dauer	Tag	Dauer
02.04.2001	6.00 – 20.00	06.04.2001	6.00 – 20.00
03.04.2001	6.00 – 20.00	07.04.2001	6.00 – 20.00
04.04.2001	6.00 – 20.00	08.04.2001	6.00 – 20.00
05.04.2001	6.00 – 20.00		

Untersuchungsstelle im AK München-Nord (Fahrtrichtung München)
Ausfahrttyp A 4

□ Lage und Abmessungen der Untersuchungsstelle



□ Charakteristika der Untersuchungsstelle

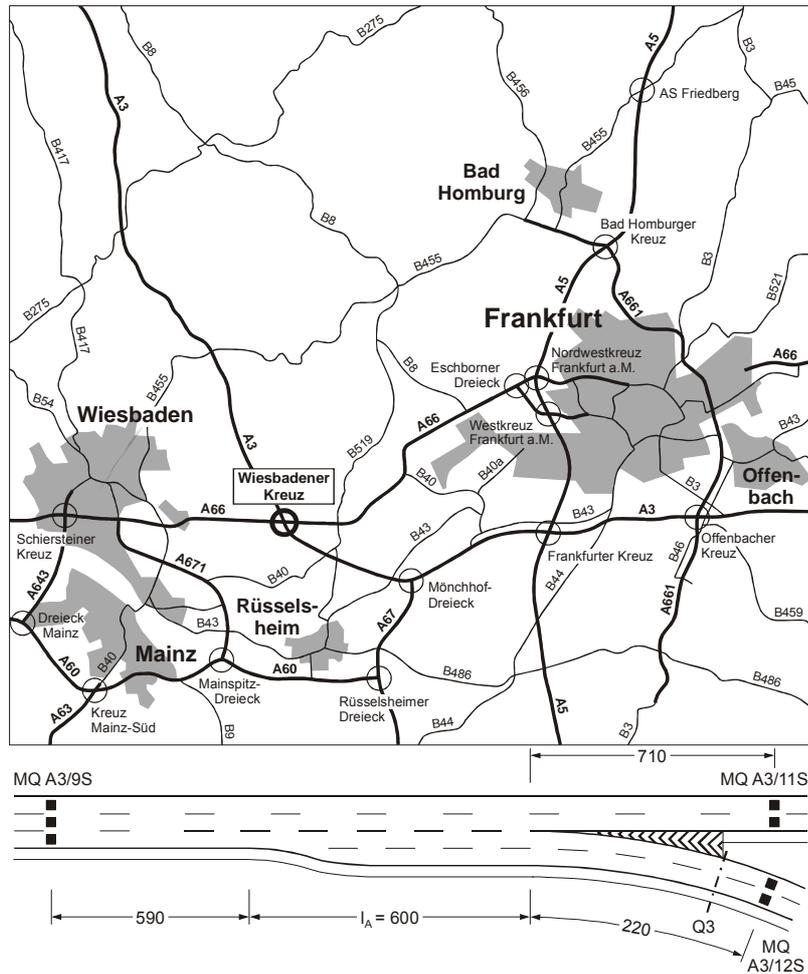
Untersuchungsstelle Autobahn und Fahrtrichtung	AK München-Nord A 9 Fahrtrichtung Nürnberg
Ausfahrttyp	A 4
Längsneigung in der Hauptfahrbahn	keine Angabe
zul. Höchstgeschwindigkeit in der Ausfahrrampe	keine
zul. Höchstgeschwindigkeit in der Hauptfahrbahn	keine

□ Messtage und Messdauer

Tag	Dauer	Tag	Dauer
02.04.2001	6.00 – 20.00	06.04.2001	6.00 – 20.00
03.04.2001	6.00 – 20.00	07.04.2001	6.00 – 20.00
04.04.2001	6.00 – 20.00	08.04.2001	6.00 – 20.00
05.04.2001	6.00 – 20.00		

Anhang 4.11

□ Lage und Abmessungen der Untersuchungsstelle



□ Charakteristika der Untersuchungsstelle

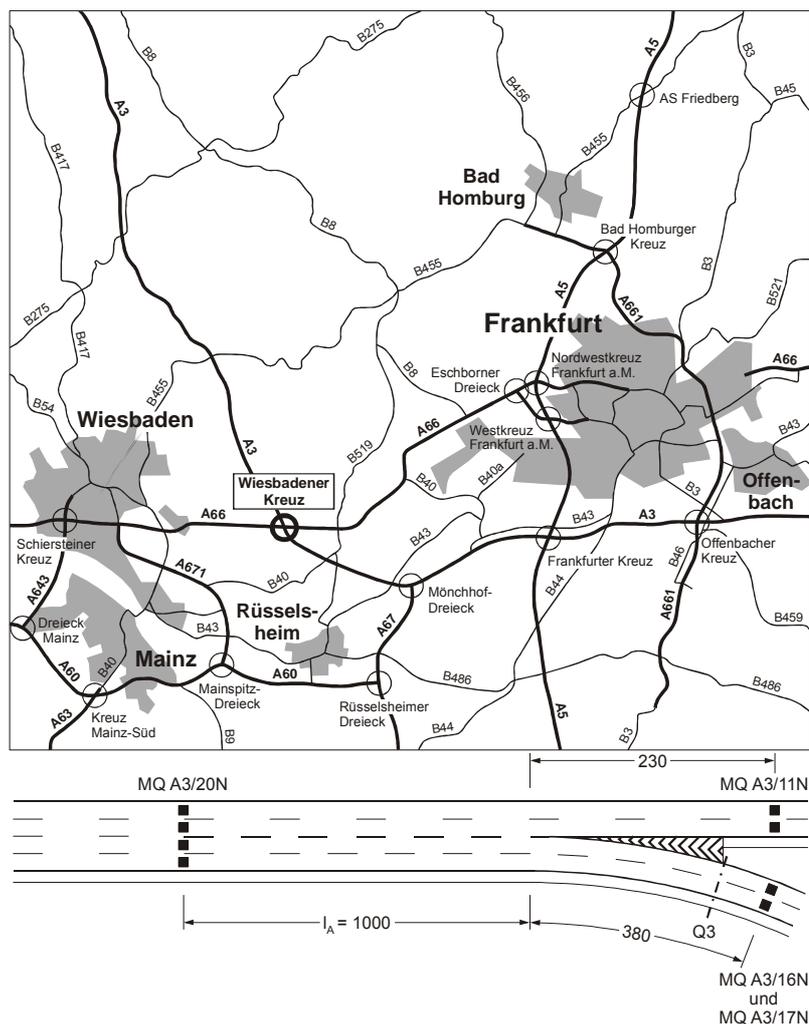
Untersuchungsstelle Fahrtrichtung	Wiesbadener Kreuz A 3 Fahrtrichtung Frankfurt/Main
Ausfahrttyp	A 4
Längsneigung in der Hauptfahrbahn	- 0,68 %
Zul. Höchstgeschwindigkeit in der Ausfahrrampe	keine Angabe
Zul. Höchstgeschwindigkeit in der Hauptfahrbahn	130 km/h

□ Messtage und Messdauer

Tag	Dauer	Tag	Dauer	Tag	Dauer
14.02.2000	5.00 – 20.00	23.05.2000	9.00 – 17.00	13.09.2000	5.00 – 20.00
28.02.2000	5.00 – 20.00	05.06.2000	9.00 – 13.30	21.09.2000	5.00 – 7:00
13.03.2000	5.00 – 20.00	24.08.2000	5.00 – 12.00	21.09.2000	9.30 – 20.00
14.03.2000	5.00 – 20.00	04.09.2000	5.00 – 16.30	27.09.2000	5.00 – 7.30
02.05.2000	5.00 – 20.00	08.09.2000	5.00 – 8.30	27.09.2000	13.00 – 20.00
23.05.2000	5.00 – 7.30	08.09.2000	15.00 – 20.00		

Untersuchungsstelle im Wiesbadener Kreuz
Ausfahrttyp A 4

□ Lage und Abmessungen der Untersuchungsstelle



□ Charakteristika der Untersuchungsstelle

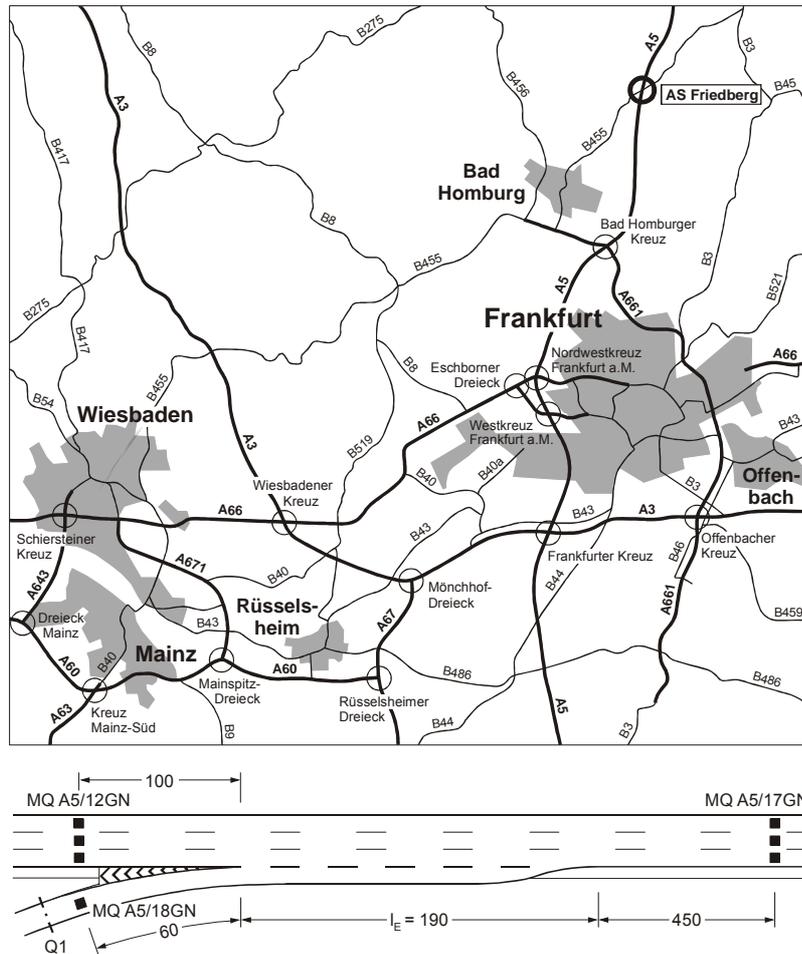
Untersuchungsstelle Fahrtrichtung	Wiesbadener Kreuz A 3 Fahrtrichtung Köln
Ausfahrttyp	A 5
Längsneigung in der Hauptfahrbahn	- 0,10 %
Zul. Höchstgeschwindigkeit in der Ausfahrrampe	keine
Zul. Höchstgeschwindigkeit in der Hauptfahrbahn	130 km/h

□ Messtage und Messdauer

Tag	Dauer	Tag	Dauer	Tag	Dauer
28.01.2000	5.00 – 20.00	03.05.2000	5.00 – 20.00	16.08.2000	5.00 – 20.00
04.02.2000	5.00 – 20.00	09.05.2000	5.00 – 20.00	21.09.2000	5.00 – 20.00
18.02.2000	13.00 – 20.00	21.06.2000	15.00 – 20.00		
10.03.2000	5.00 – 20.00	11.07.2000	7.00 – 20.00		

Anhang 4.13a

□ Lage und Abmessungen der Untersuchungsstelle



□ Charakteristika der Untersuchungsstelle

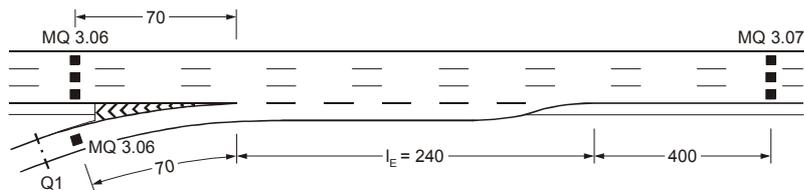
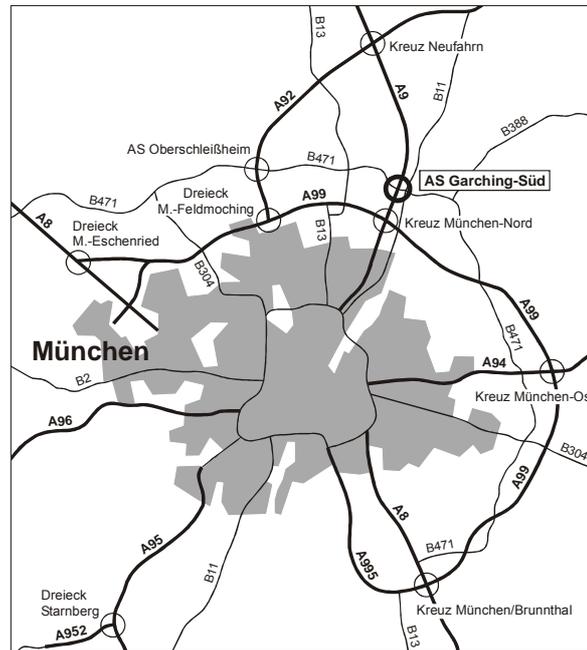
Untersuchungsstelle Autobahn und Fahrtrichtung	AS Friedberg A 5 Fahrtrichtung Kassel
Einfahrttyp	E 1
Längsneigung in der Hauptfahrbahn	- 1,86 %
zul. Höchstgeschwindigkeit in der Einfahrrampe	keine
zul. Höchstgeschwindigkeit in der Hauptfahrbahn	Verkehrsbeeinflussungsanlage

□ Messtage und Messdauer

Tag	Dauer	Tag	Dauer
17.01.2000	5.00 – 20.00	11.05.2000	5.00 – 20.00
18.01.2000	5.00 – 20.00	18.05.2000	5.00 – 20.00
23.01.2000	5.00 – 20.00	27.05.2000	10.00 – 20.00
04.02.2000	5.00 – 11.00	31.05.2000	5.00 – 11.00
04.02.2000	12.30 – 20.00	31.05.2000	12.30 – 20.00
07.02.2000	5.00 – 20.00	02.06.2000	5.00 – 20.00
08.02.2000	5.00 – 20.00	21.06.2000	5.00 – 20.00
16.02.2000	5.00 – 20.00	21.07.2000	5.00 – 20.00
07.03.2000	5.00 – 20.00	24.07.2000	5.00 – 20.00
29.03.2000	5.00 – 20.00	13.08.2000	5.00 – 20.00
31.03.2000	5.00 – 20.00	22.08.2000	5.00 – 20.00
07.04.2000	5.00 – 20.00	17.09.2000	5.00 – 20.00
10.04.2000	5.00 – 20.00	18.09.2000	7.00 – 20.00
13.04.2000	5.00 – 20.00	19.09.2000	5.00 – 20.00
14.04.2000	5.00 – 20.00	27.09.2000	5.00 – 20.00
23.04.2000	5.00 – 20.00	07.10.2000	5.00 – 20.00
04.05.2000	5.00 – 20.00	17.10.2000	5.00 – 15.00

Anhang 4.14

□ Lage und Abmessungen der Untersuchungsstelle



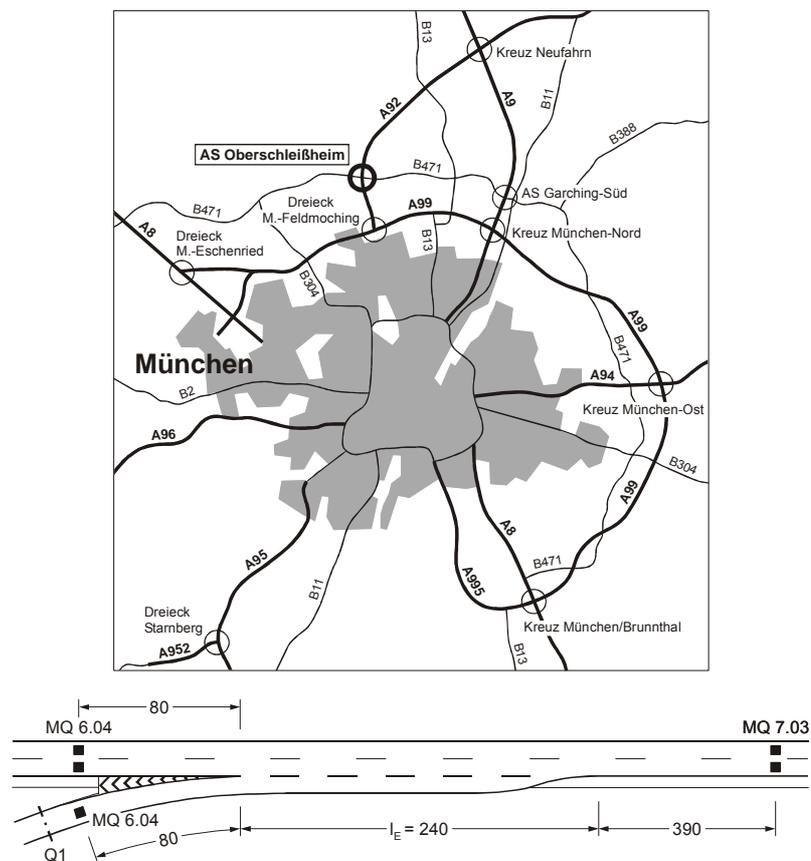
□ Charakteristika der Untersuchungsstelle

Untersuchungsstelle Autobahn und Fahrtrichtung	AS Garching-Süd A 9 Fahrtrichtung Nürnberg
Einfahrttyp	E 1
Längsneigung in der Hauptfahrbahn	keine Angabe
zul. Höchstgeschwindigkeit in der Einfahrrampe	keine
zul. Höchstgeschwindigkeit in der Hauptfahrbahn	Verkehrsbeeinflussungsanlage

□ Messtage und Messdauer

Tag	Dauer	Tag	Dauer
02.04.2001	6.00 – 19.00	06.04.2001	6.00 – 19.00
03.04.2001	6.00 – 19.00	07.04.2001	6.00 – 19.00
04.04.2001	6.00 – 19.00	08.04.2001	6.00 – 19.00
05.04.2001	6.00 – 19.00		

□ Lage und Abmessungen der Untersuchungsstelle



□ Charakteristika der Untersuchungsstelle

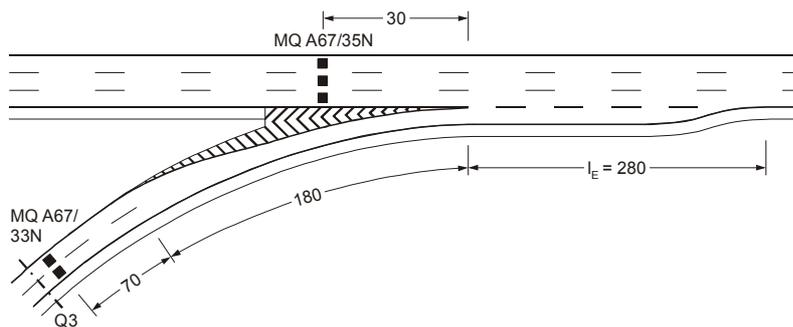
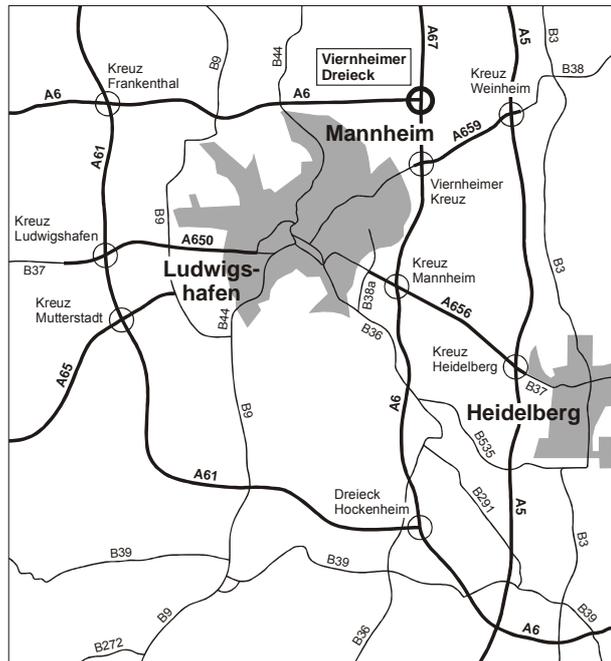
Untersuchungsstelle Autobahn und Fahrtrichtung	AS Oberschleißheim A 92 Fahrtrichtung Deggendorf
Einfahrttyp	E 1
Längsneigung in der Hauptfahrbahn	keine Angabe
zul. Höchstgeschwindigkeit in der Einfahrrampe	keine
zul. Höchstgeschwindigkeit in der Hauptfahrbahn	keine

□ Messtage und Messdauer

Tag	Dauer	Tag	Dauer
02.04.2001	6.00 – 19.00	06.04.2001	6.00 – 19.00
03.04.2001	6.00 – 19.00	07.04.2001	6.00 – 19.00
04.04.2001	6.00 – 19.00	08.04.2001	6.00 – 19.00
05.04.2001	6.00 – 19.00		

Anhang 4.16

□ Lage und Abmessungen der Untersuchungsstelle



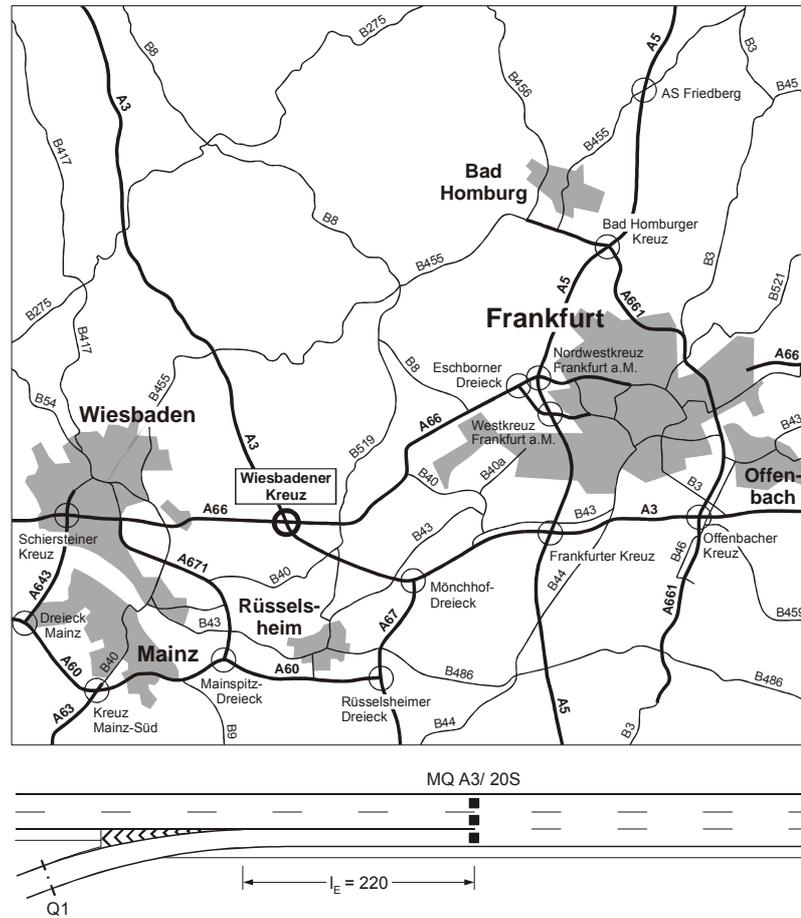
□ Charakteristika der Untersuchungsstelle

Untersuchungsstelle Fahrtrichtung	Viernheimer Dreieck A 67 Fahrtrichtung Frankfurt/M.
Einfahrttyp	E 2
Längsneigung in der Hauptfahrbahn	- 0,01 %
Zul. Höchstgeschwindigkeit in der Einfahrt	100 km/h
Zul. Höchstgeschwindigkeit in der Hauptfahrbahn	100 km/h

□ Messtage und Messdauer

Tag	Dauer	Tag	Dauer	Tag	Dauer
17.01.2000	6.00 – 9.00	26.05.2000	5.00 – 20.00	04.09.2000	5.00 – 12.00
17.01.2000	11.00 – 20.00	05.06.2000	5.00 – 20.00	04.09.2000	13.30 – 20.00
31.01.2000	5.00 – 20.00	21.06.2000	5.00 – 20.00	25.09.2000	5.00 – 20.00
22.05.2000	5.00 – 20.00	28.08.2000	5.00 – 20.00	12.10.2000	5.00 – 15.30

□ Lage und Abmessungen der Untersuchungsstelle



□ Charakteristika der Untersuchungsstelle

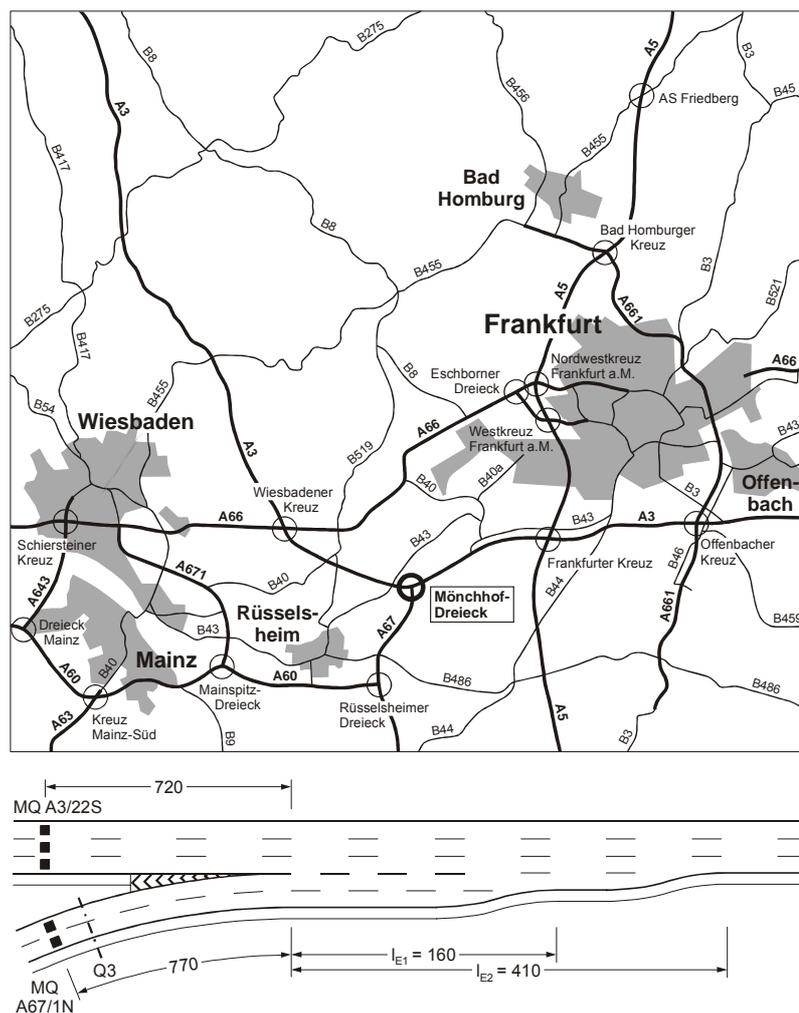
Untersuchungsstelle Fahrtrichtung	Wiesbadener Kreuz A 3 Fahrtrichtung Frankfurt/Main
Einfahrttyp	E 3
Längsneigung in der Hauptfahrbahn	- 0,10 %
Zul. Höchstgeschwindigkeit in der Einfahrrampe	keine
Zul. Höchstgeschwindigkeit in der Hauptfahrbahn	100 km/h

Anhang 4.17b

□ **Messtage und Messdauer**

Tag	Dauer	Tag	Dauer
24.01.2000	5.00 – 20.00	05.06.2000	5.00 – 20.00
01.02.2000	5.00 – 20.00	08.06.2000	5.00 – 20.00
11.02.2000	5.00 – 20.00	04.07.2000	5.00 – 20.00
14.02.2000	5.00 – 20.00	06.07.2000	5.00 – 16.00
15.02.2000	5.00 – 20.00	10.07.2000	5.00 – 16.00
21.02.2000	5.00 – 20.00	24.07.2000	5.00 – 20.00
22.02.2000	5.00 – 20.00	02.08.2000	5.00 – 16.00
28.02.2000	5.00 – 20.00	21.08.2000	5.00 – 20.00
30.03.2000	5.00 – 20.00	31.08.2000	5.00 – 11.30
25.04.2000	5.00 – 20.00	13.09.2000	5.00 – 20.00
02.05.2000	5.00 – 16.00	21.09.2000	5.00 – 20.00
03.05.2000	5.00 – 20.00	29.09.2000	5.00 – 20.00
08.05.2000	5.00 – 20.00	09.10.2000	7.00 – 20.00
25.05.2000	5.00 – 20.00	16.10.2000	5.00 – 20.00
29.05.2000	5.00 – 20.00	24.10.2000	5.00 – 20.00

□ Lage und Abmessungen der Untersuchungsstelle



□ Charakteristika der Untersuchungsstelle

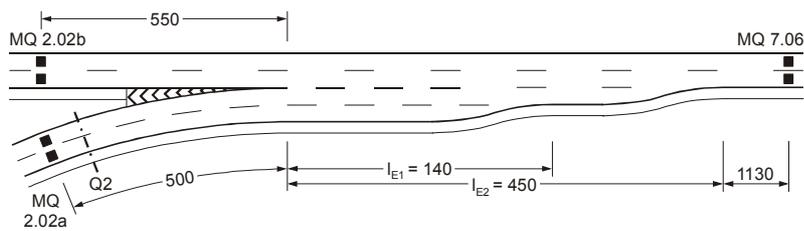
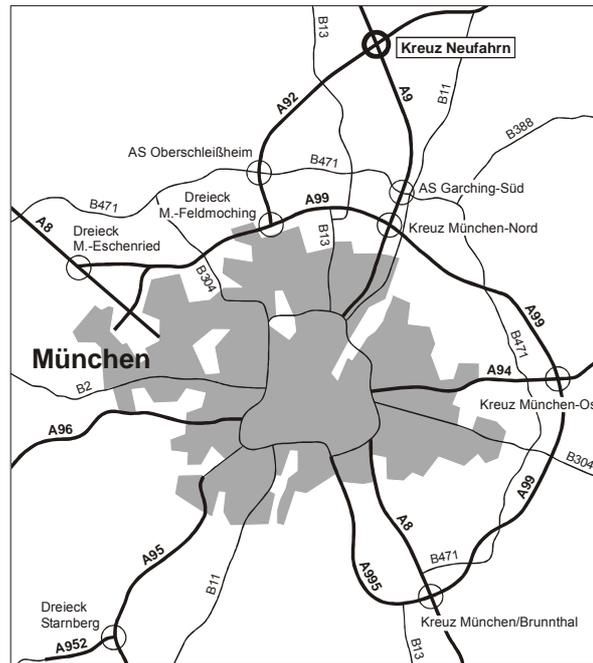
Untersuchungsstelle Fahrtrichtung	Mönchhof Dreieck A 3 Fahrtrichtung Frankfurt/Main
Einfahrttyp	E 4
Längsneigung in der Hauptfahrbahn	0,40 %
Zul. Höchstgeschwindigkeit in der Einfahrrampe	100 km/h
Zul. Höchstgeschwindigkeit in der Hauptfahrbahn	120 km/h

□ Messtage und Messdauer

Tag	Dauer
03.03.2000	5.00 – 20.00
22.03.2000	5.00 – 20.00
28.03.2000	5.00 – 20.00

Anhang 4.19

□ Lage und Abmessungen der Untersuchungsstelle



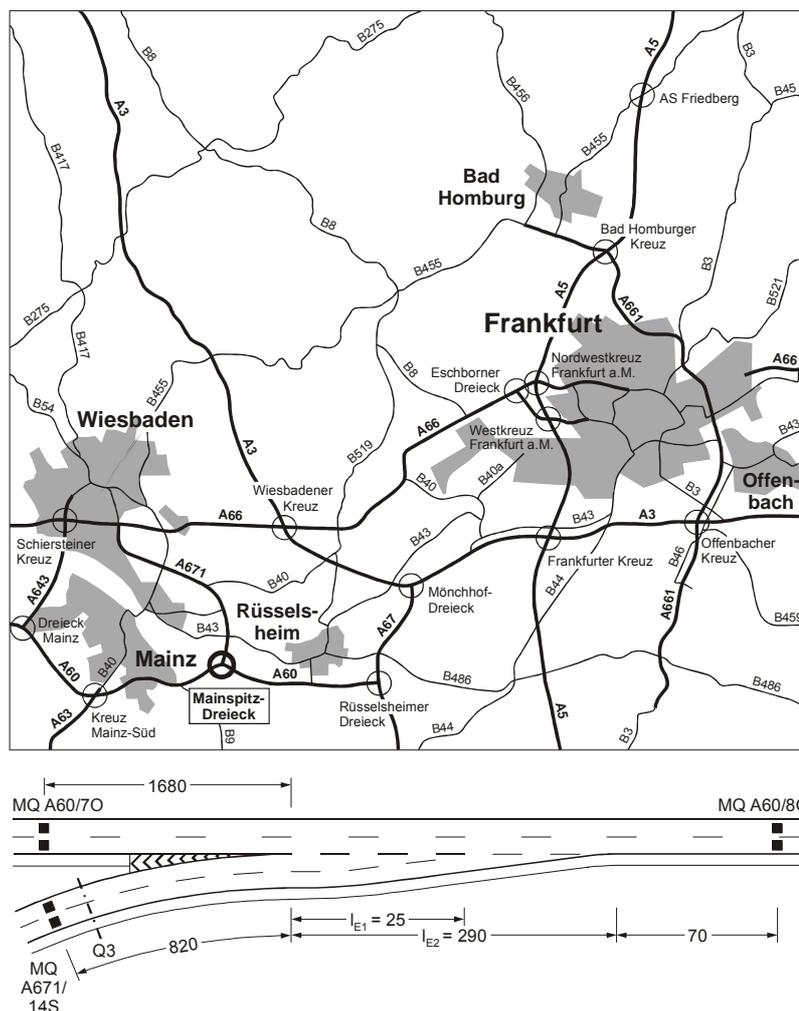
□ Charakteristika der Untersuchungsstelle

Untersuchungsstelle Fahrrichtung	AK Neufahrn A 92 Fahrrichtung Stuttgart
Einfahrttyp	E 4
Längsneigung in der Hauptfahrbahn	keine Angabe
Zul. Höchstgeschwindigkeit in der Einfahrrampe	60 km/h
Zul. Höchstgeschwindigkeit in der Hauptfahrbahn	keine

□ Messtage und Messdauer

Tag	Dauer	Tag	Dauer
02.04.2001	6.00 – 20.00	06.04.2001	6.00 – 20.00
03.04.2001	6.00 – 20.00	07.04.2001	6.00 – 20.00
04.04.2001	6.00 – 20.00	08.04.2001	6.00 – 20.00
05.04.2001	6.00 – 20.00		

□ Lage und Abmessungen der Untersuchungsstelle



□ Charakteristika der Untersuchungsstelle

Untersuchungsstelle Fahrtrichtung	Mainspitz Dreieck A 60 Fahrtrichtung Rüsselsheim
Einfahrttyp	E 4 (Ausbildung nicht richtlinienkonform)
Längsneigung in der Hauptfahrbahn	- 0,10 %
Zul. Höchstgeschwindigkeit in der Einfahrrampe	80 km/h
Zul. Höchstgeschwindigkeit in der Hauptfahrbahn	120 km/h

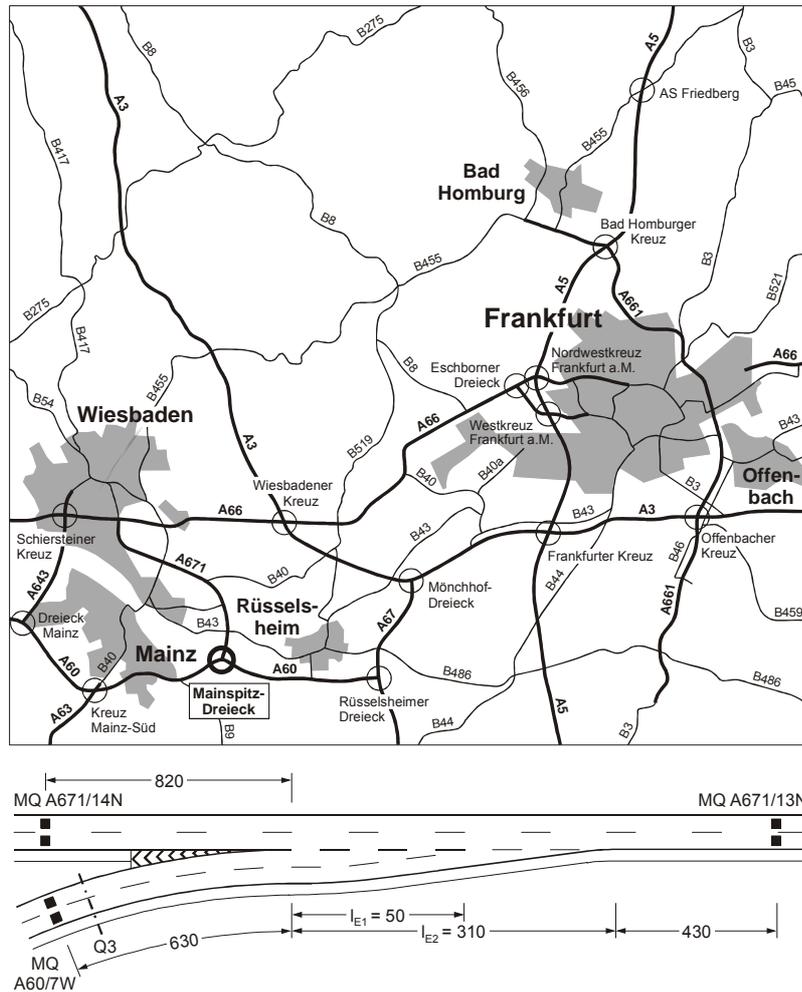
□ Messtage und Messdauer

Tag	Dauer	Tag	Dauer
15.02.2000	10.00 – 20.00	21.08.2000	9.00 – 20.00
24.02.2000	10.00 – 20.00	17.10.2000	9.00 – 20.00
15.06.2000	12.00 – 20.00	01.11.2000	9.00 – 20.00
14.07.2000	9.00 – 19.00		

Untersuchungsstelle im Mainspitz Dreieck (Fahrtrichtung Rüsselsheim)
Einfahrttyp E 4

Anhang 4.21

□ Lage und Abmessungen der Untersuchungsstelle



□ Charakteristika der Untersuchungsstelle

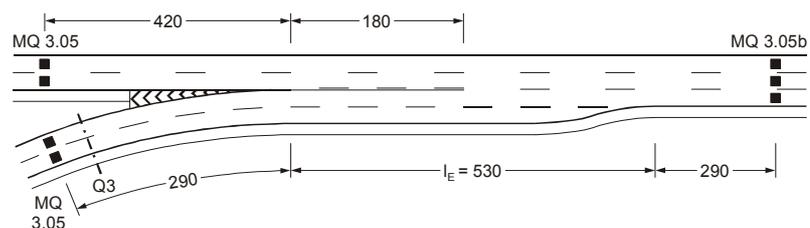
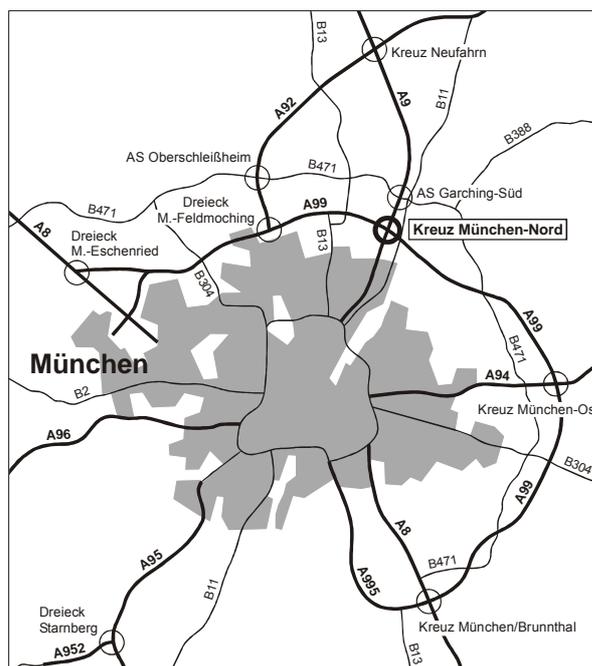
Untersuchungsstelle Fahrtrichtung	Mainspitz Dreieck A 671 Fahrtrichtung Wiesbaden
Einfahrttyp	E 4 (Ausbildung nicht richtlinienkonform)
Längsneigung in der Hauptfahrbahn	+ 1,88 %
Zul. Höchstgeschwindigkeit in der Einfahrrampe	100 km/h
Zul. Höchstgeschwindigkeit in der Hauptfahrbahn	100 km/h

□ Messtage und Messdauer

Tag	Dauer	Tag	Dauer
11.01.2000	5.00 – 20.00	09.06.2000	5.00 – 20.00
20.01.2000	5.00 – 20.00	11.07.2000	6.00 – 20.00
28.03.2000	9.00 – 20.00	11.09.2000	5.00 – 11.00
09.05.2000	5.00 – 15.30		

Untersuchungsstelle im Mainspitz Dreieck (Fahrtrichtung Wiesbaden)
Einfahrttyp E 4

□ Lage und Abmessungen der Untersuchungsstelle



□ Charakteristika der Untersuchungsstelle

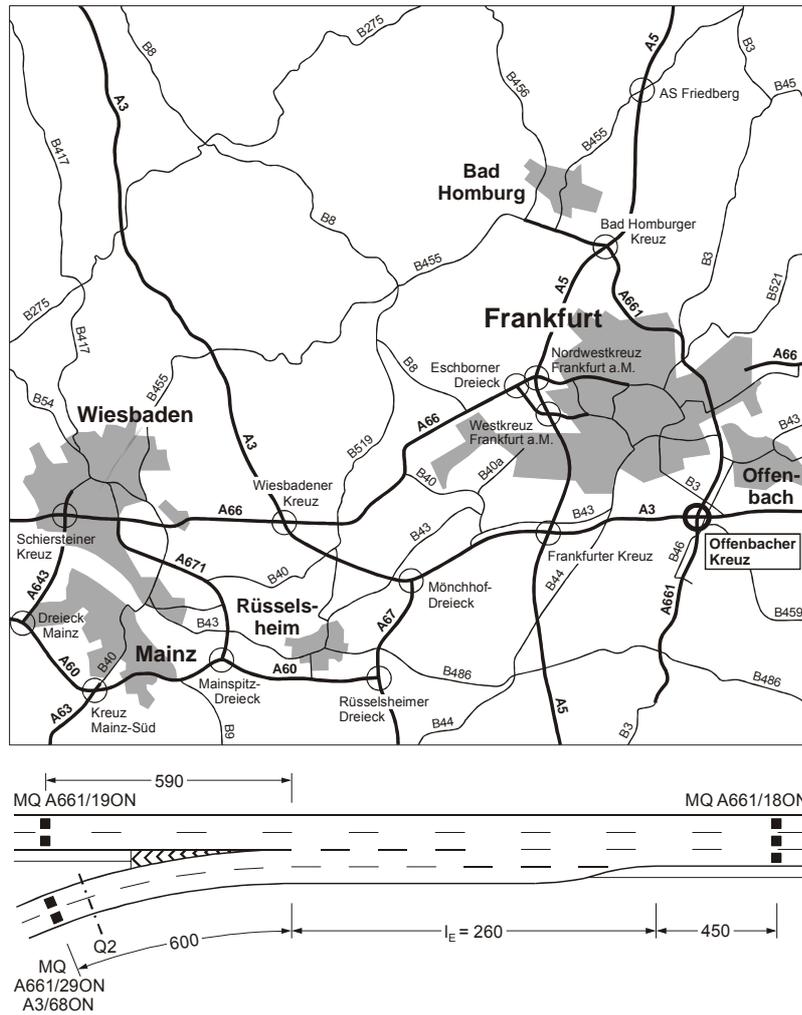
Untersuchungsstelle Fahrtrichtung	AK München-Nord A 9 Fahrtrichtung Nürnberg
Einfahrttyp	E 5
Längsneigung in der Hauptfahrbahn	keine Angabe
Zul. Höchstgeschwindigkeit in der Einfahrrampe	Verkehrsbeeinflussungsanlage
Zul. Höchstgeschwindigkeit in der Hauptfahrbahn	Verkehrsbeeinflussungsanlage

□ Messtage und Messdauer

Tag	Dauer	Tag	Dauer
02.04.2001	6.00 – 20.00	06.04.2001	6.00 – 20.00
03.04.2001	6.00 – 20.00	07.04.2001	6.00 – 20.00
04.04.2001	6.00 – 20.00	08.04.2001	6.00 – 20.00
05.04.2001	6.00 – 20.00		

Anhang 4.23

□ Lage und Abmessungen der Untersuchungsstelle

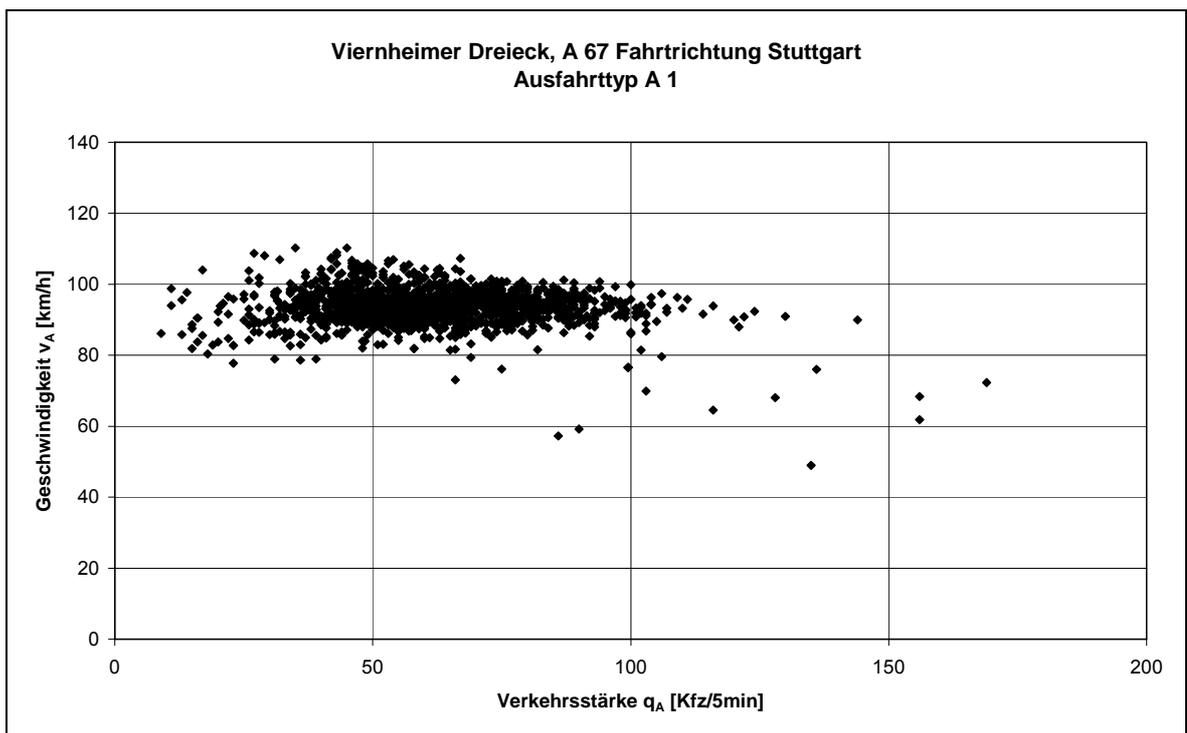
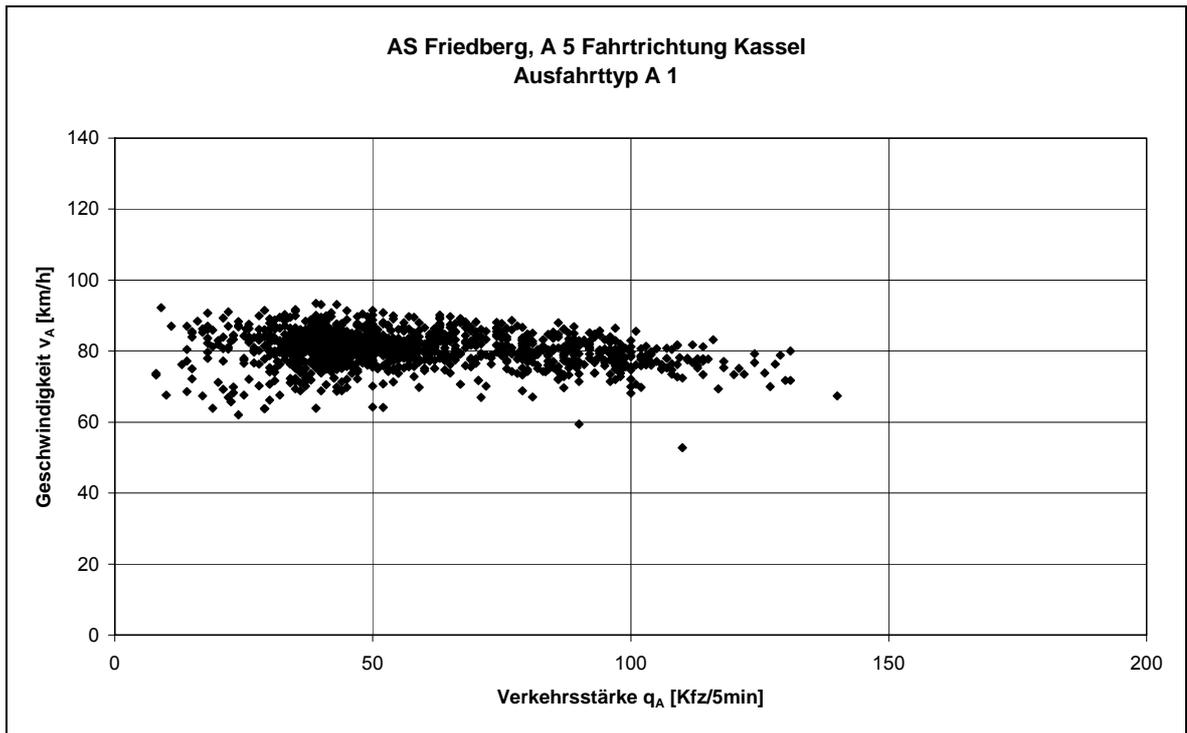


□ Charakteristika der Untersuchungsstelle

Untersuchungsstelle Fahrtrichtung	Offenbacher Kreuz A 661 Fahrtrichtung Bad Homburg
Einfahrttyp	E 5
Längsneigung in der Hauptfahrbahn	+ 0,08 %
Zul. Höchstgeschwindigkeit in der Einfahrrampe	keine
Zul. Höchstgeschwindigkeit in der Hauptfahrbahn	130 km/h

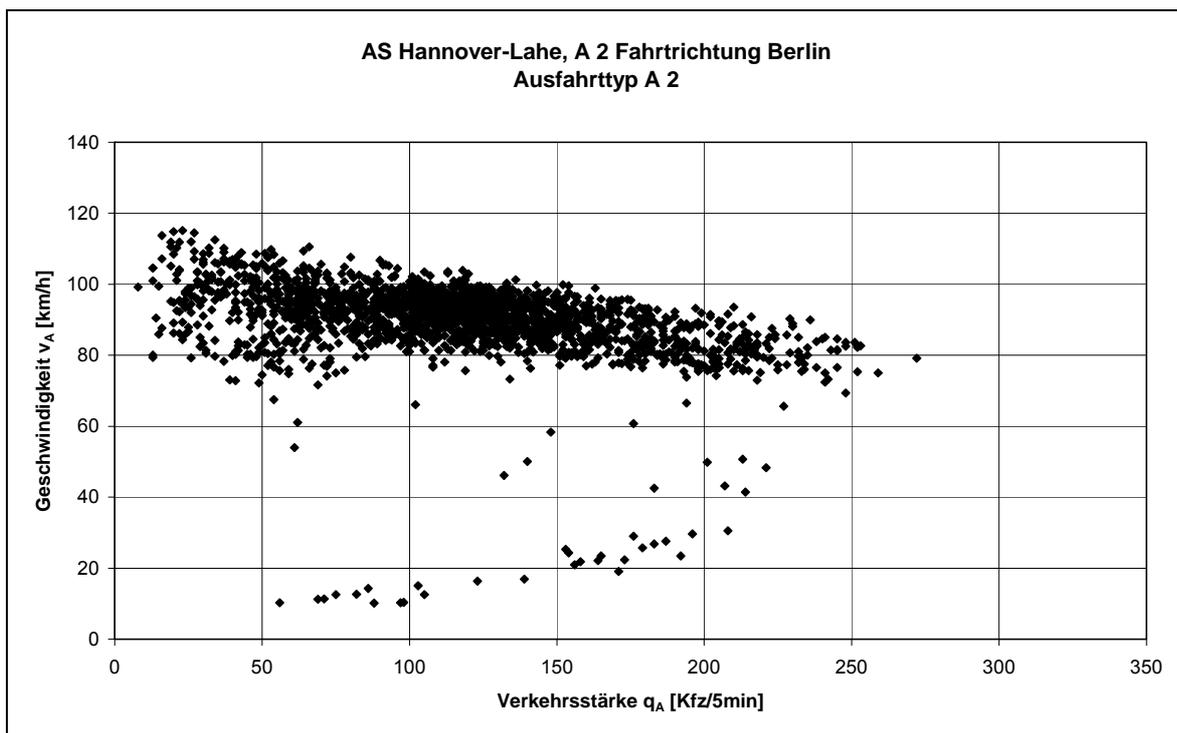
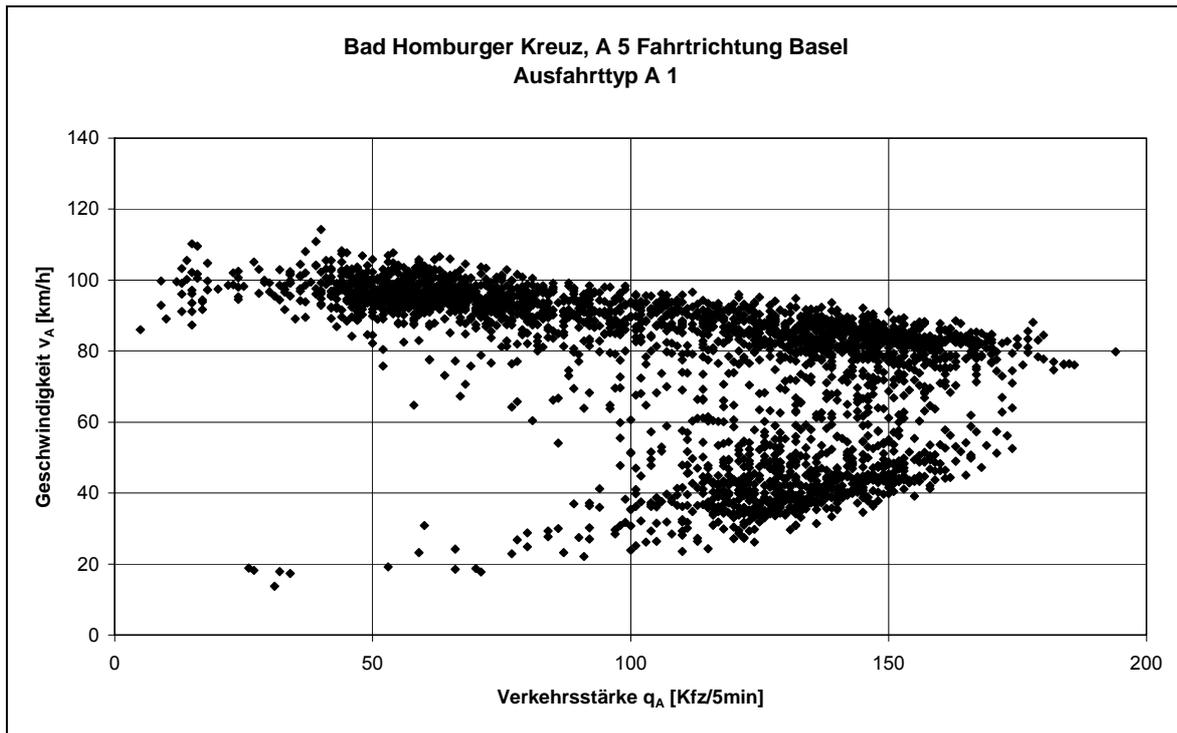
□ Messtage und Messdauer

Tag	Dauer	Tag	Dauer
22.03.2000	5.00 – 20.00	07.06.2000	5.00 – 20.00
07.04.2000	5.00 – 15:30	24.08.2000	5.00 – 20.00
10.05.2000	5.00 – 15:30	11.10.2000	5.00 – 20.00
17.05.2000	5.00 – 20.00	31.10.2000	5.00 – 20.00

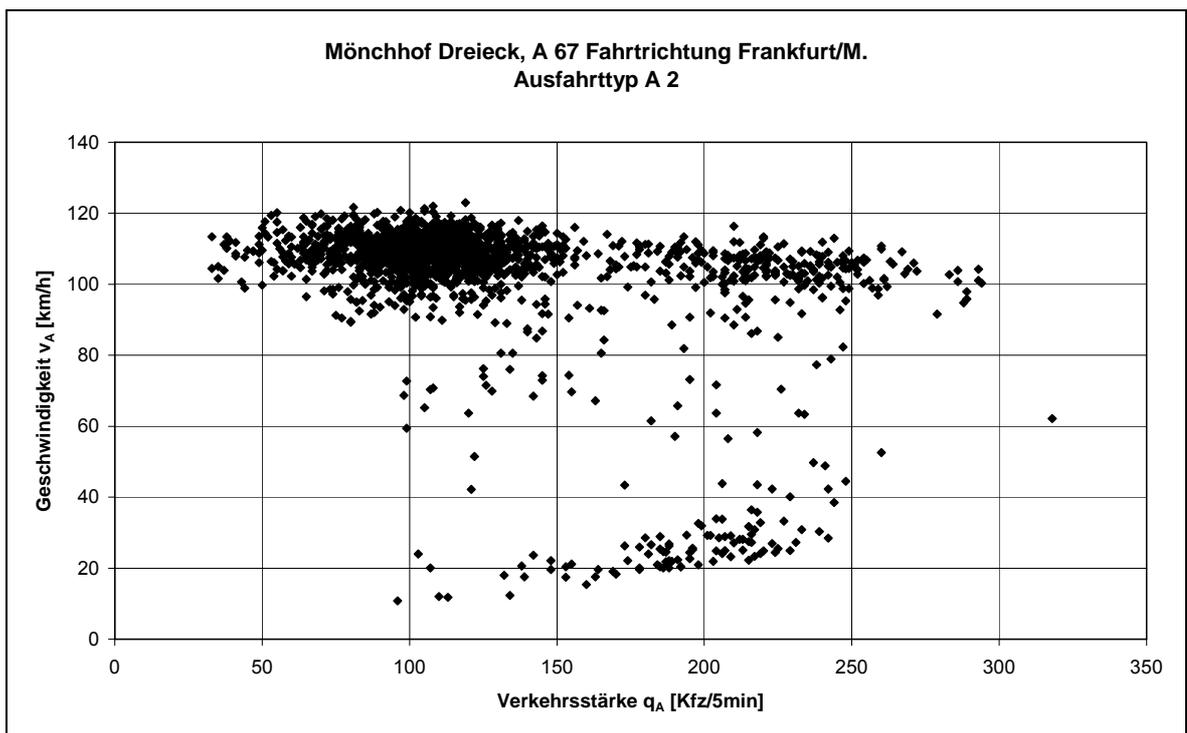
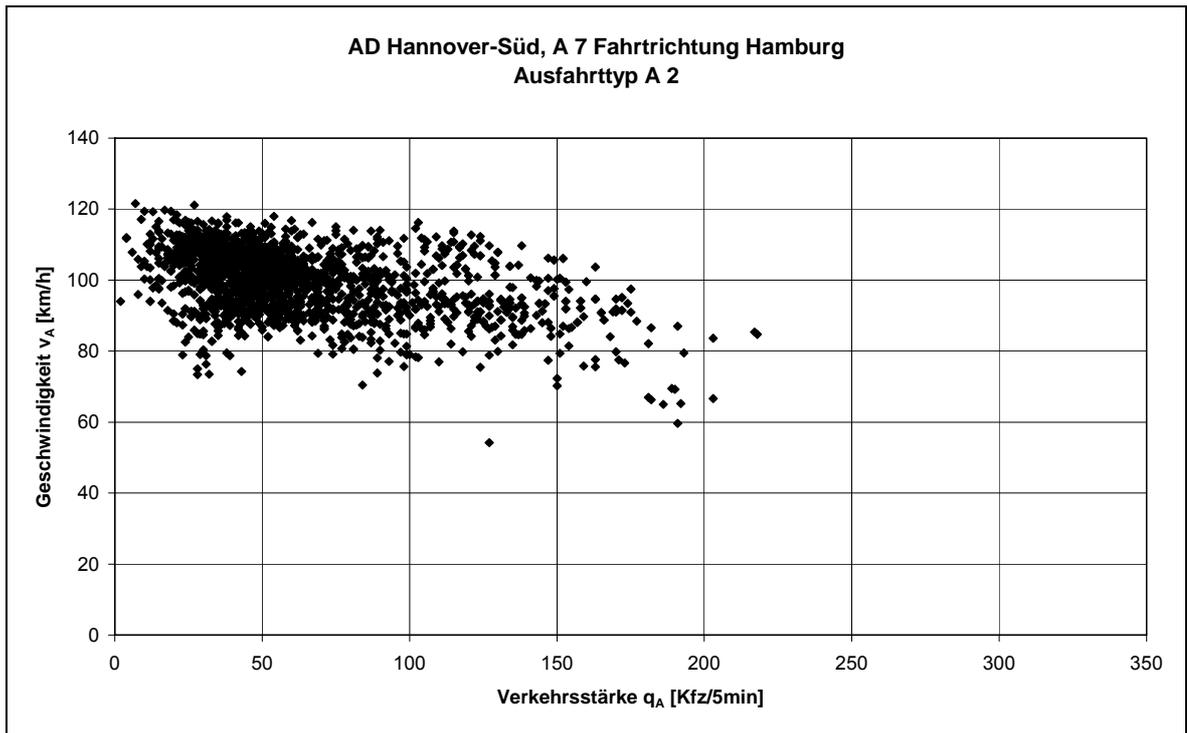


Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf
AS Friedberg (Ausfahrttyp A 1), Viernheimer Dreieck (Ausfahrttyp A 1)

Anhang 5.2

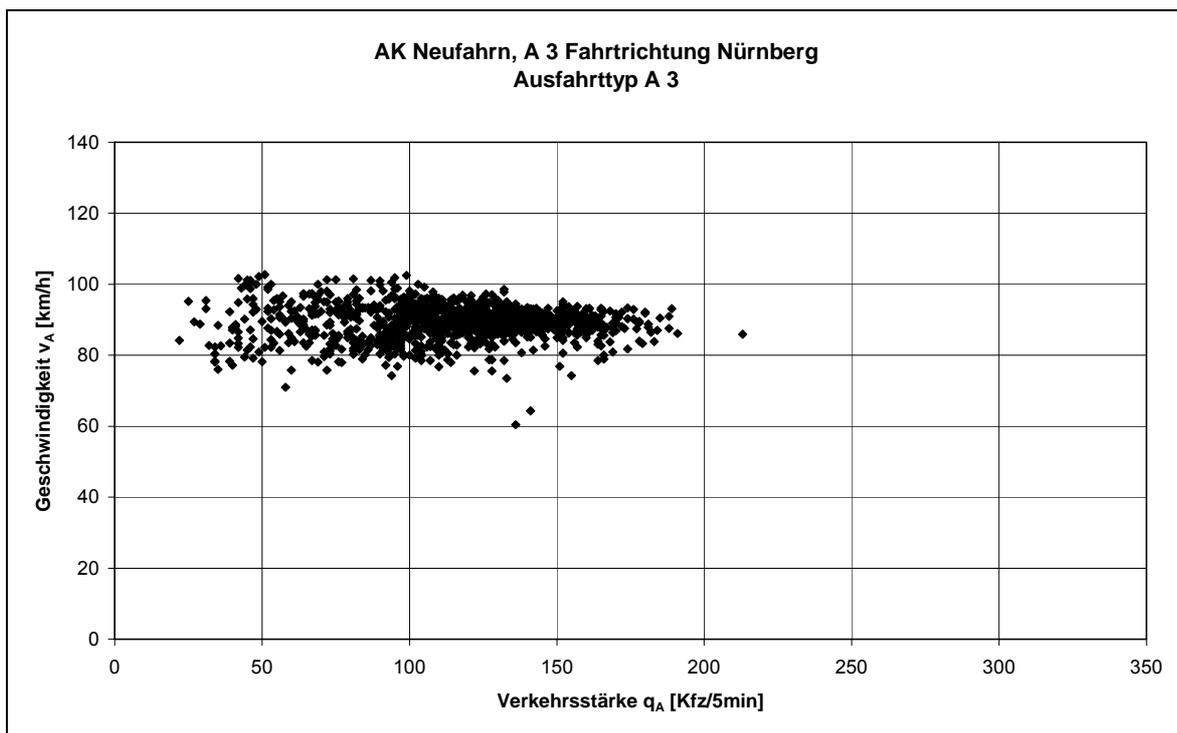
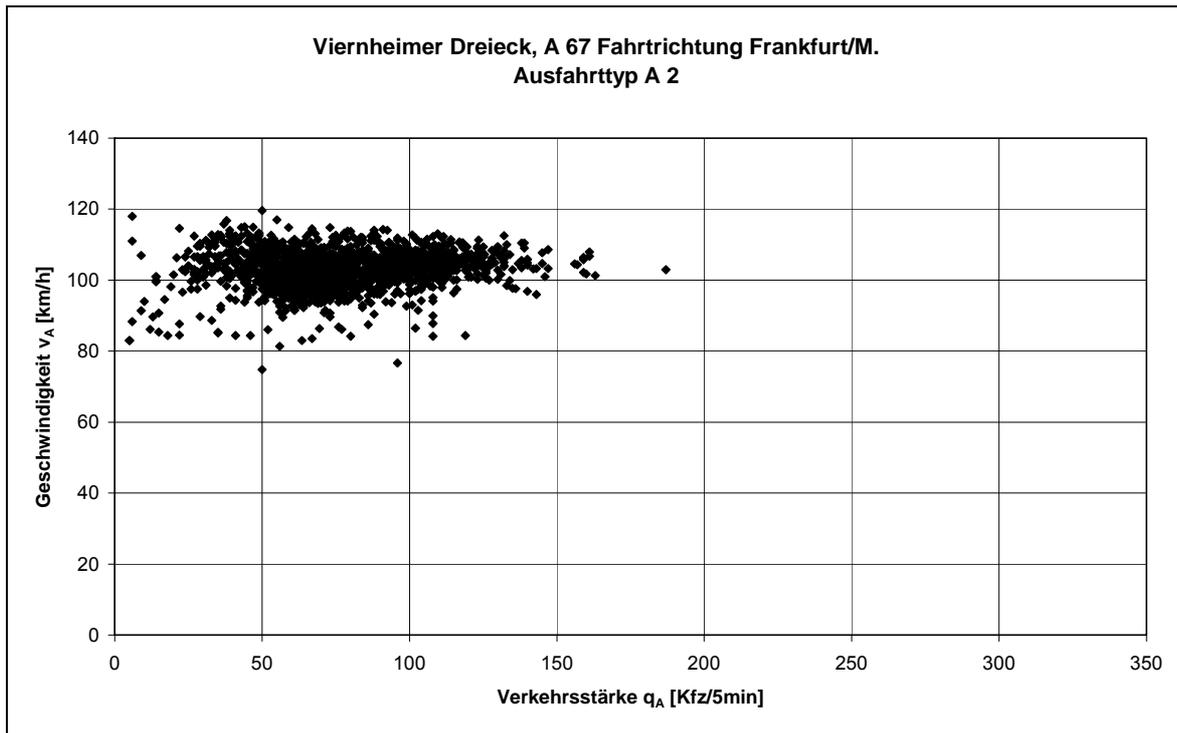


Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf
Bad Homburger Kreuz (Ausfahrttyp A 1), AS Hannover-Lahe (Ausfahrttyp A 2)

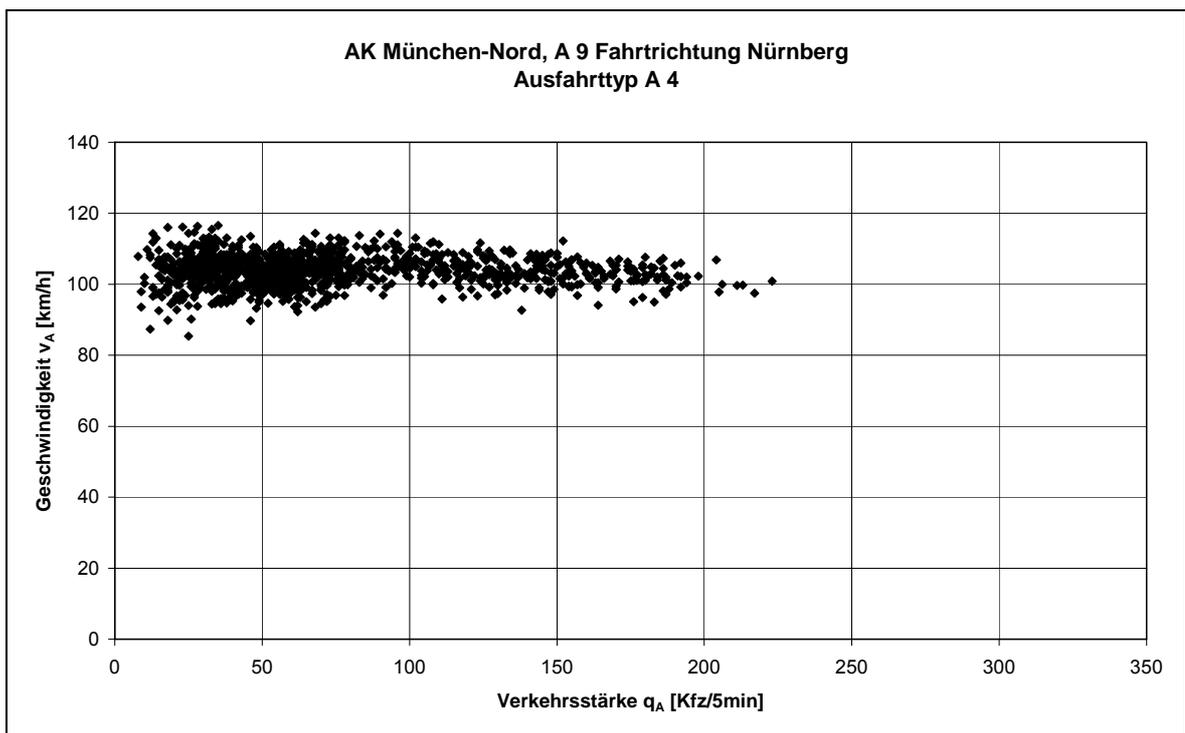
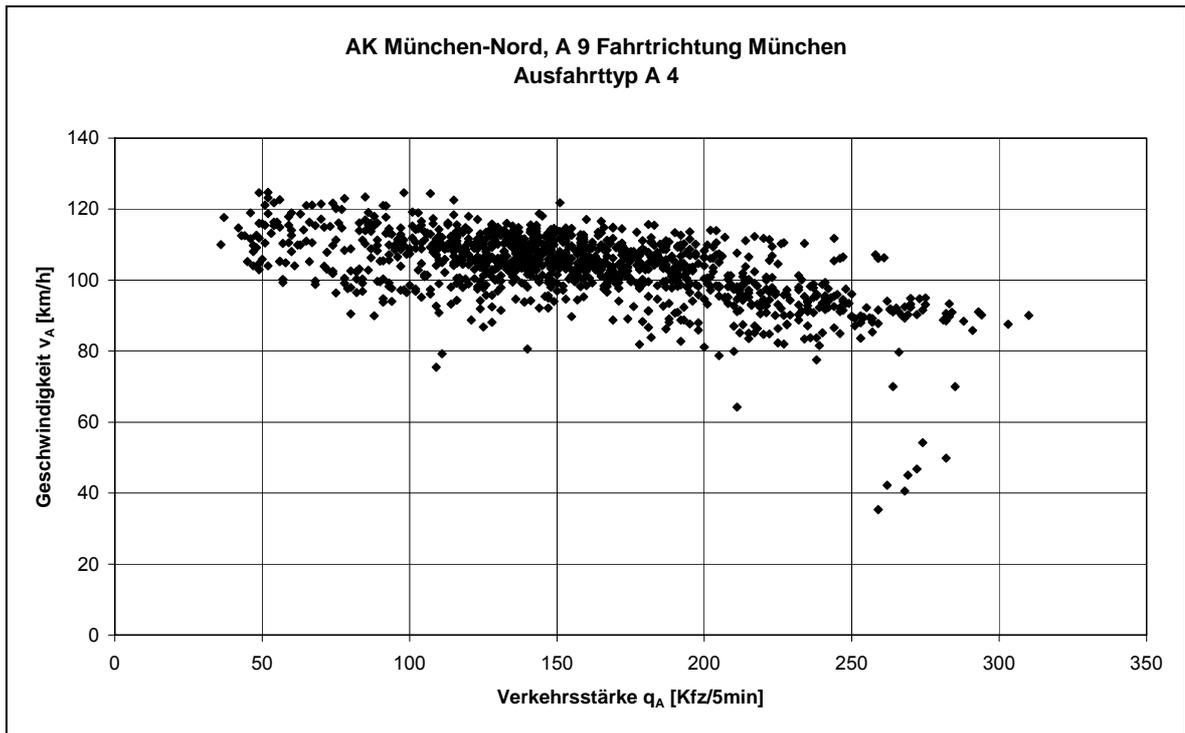


Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf
AD Hannover-Süd (Ausfahrttyp A 2), Mönchhof Dreieck (Ausfahrttyp A 2)

Anhang 5.4

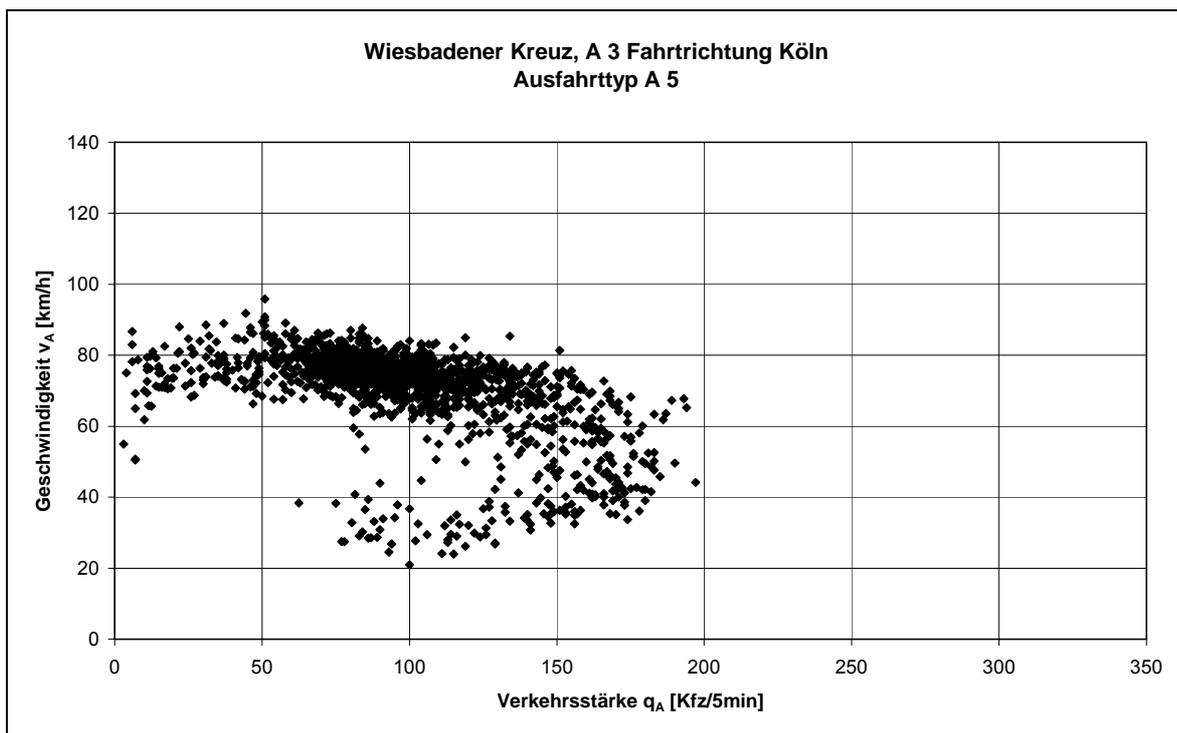
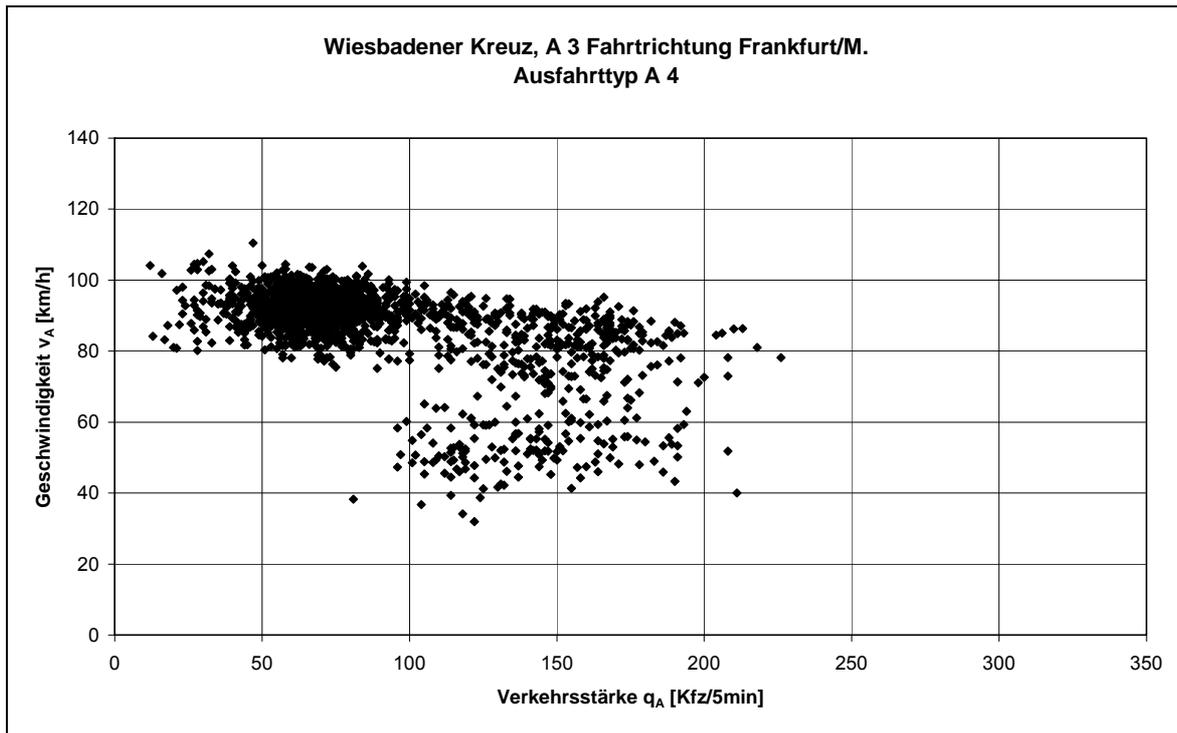


Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf
Viernheimer Dreieck (Ausfahrttyp A 2), AK Neufahrn (Ausfahrttyp A 3)

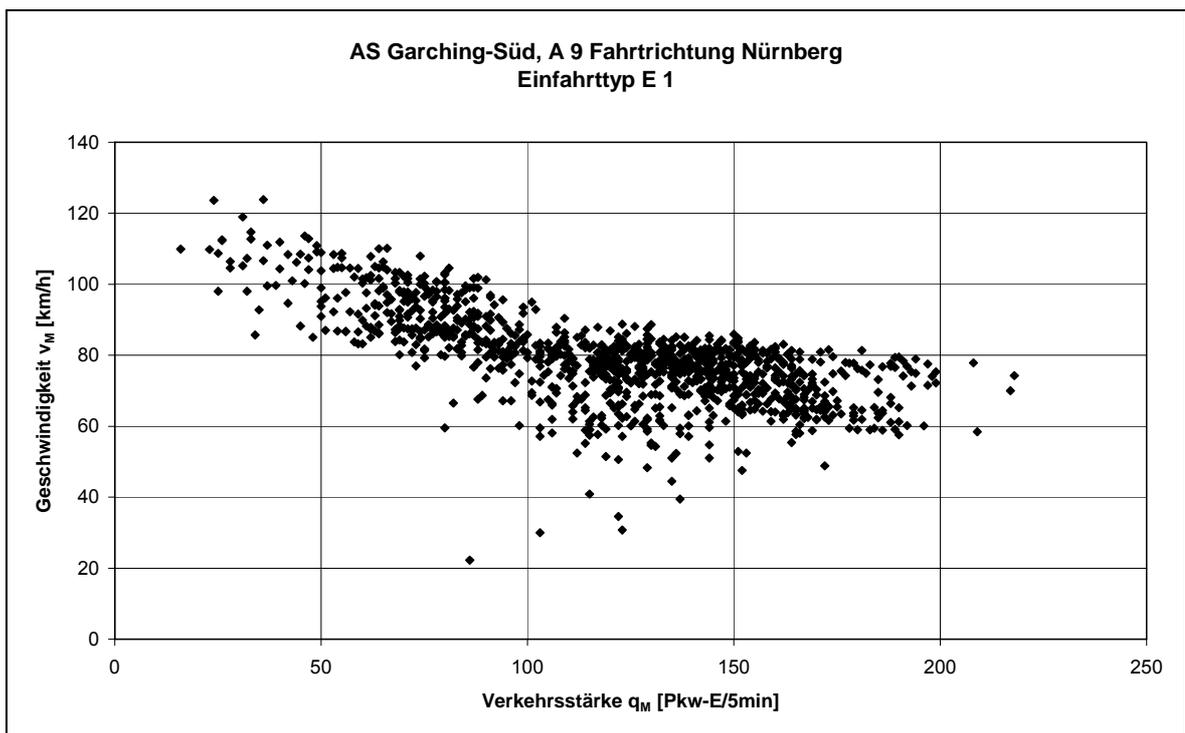
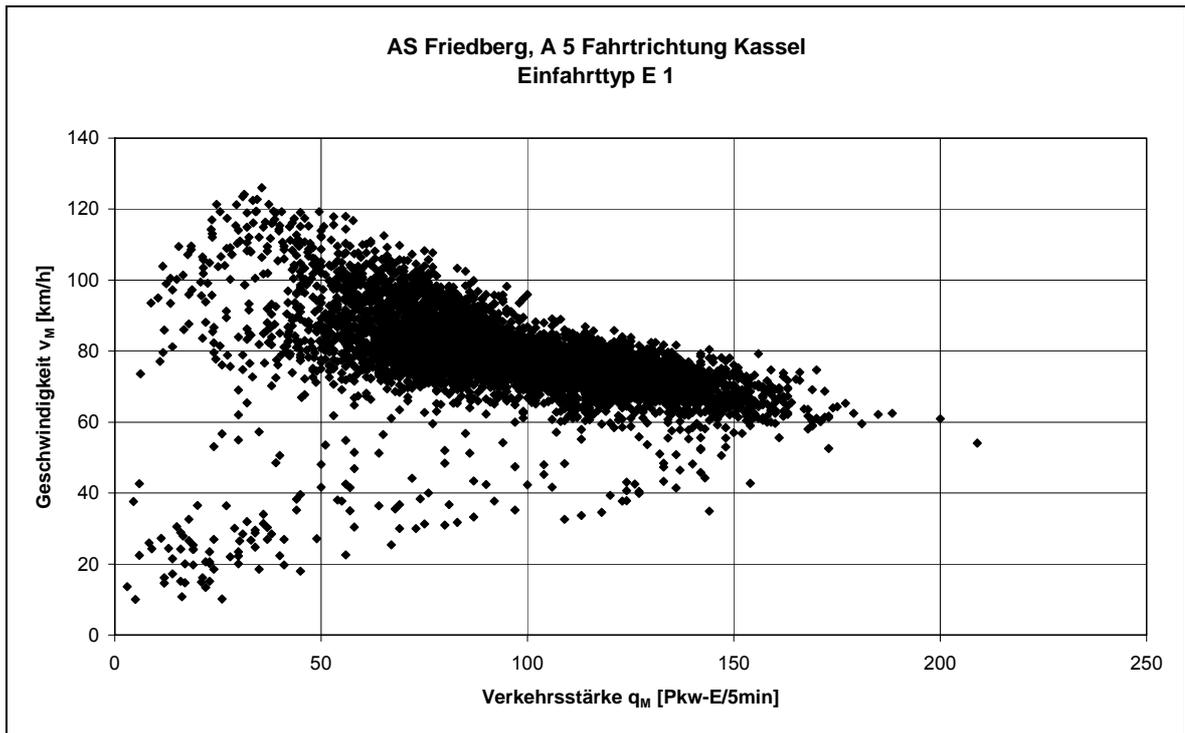


Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf
AK München-Nord (Fahrtrichtung München, Ausfahrttyp A 4), AK München-Nord (Fahrtrichtung Nürnberg, Ausfahrttyp A 4)

Anhang 5.6

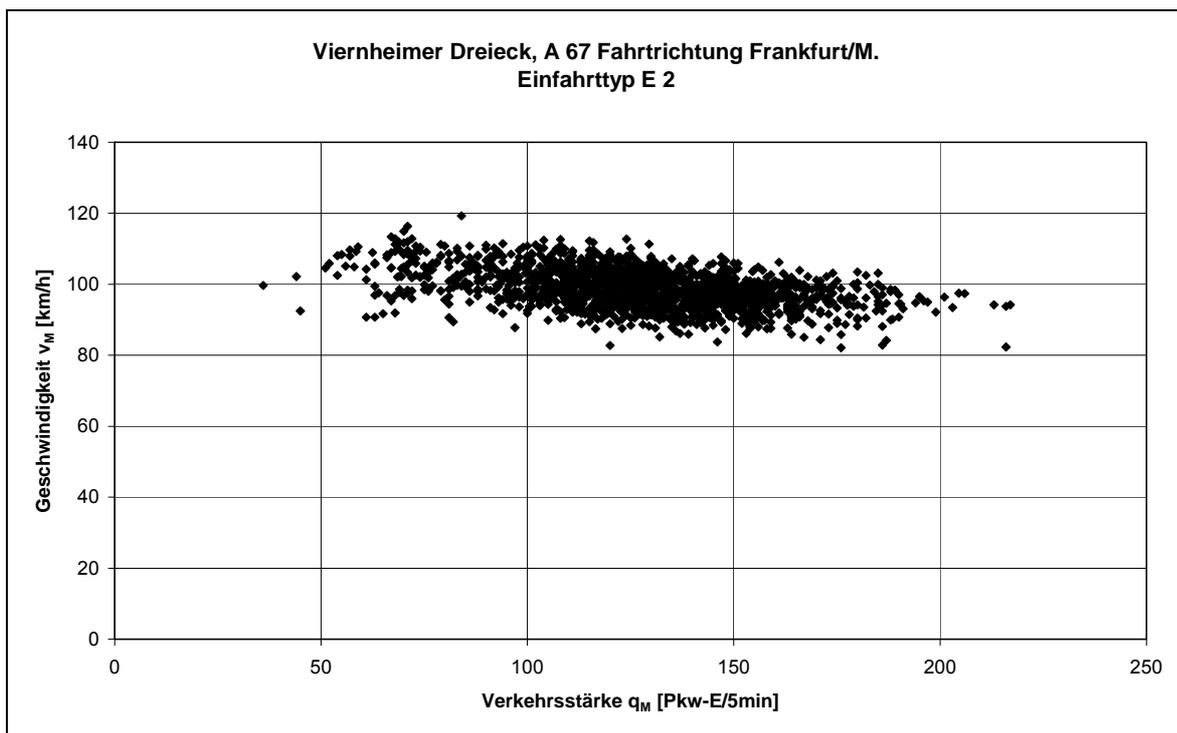
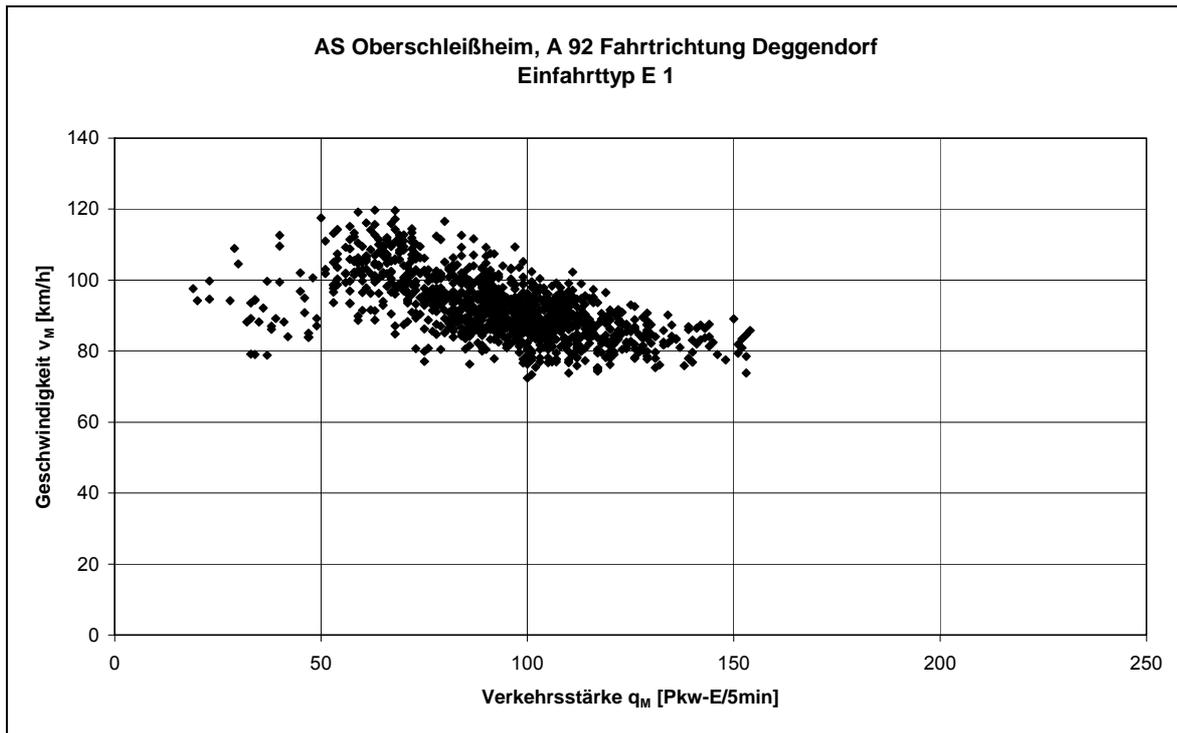


Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf
Wiesbadener Kreuz (Ausfahrttyp A 4), Wiesbadener Kreuz (Ausfahrttyp A 5)

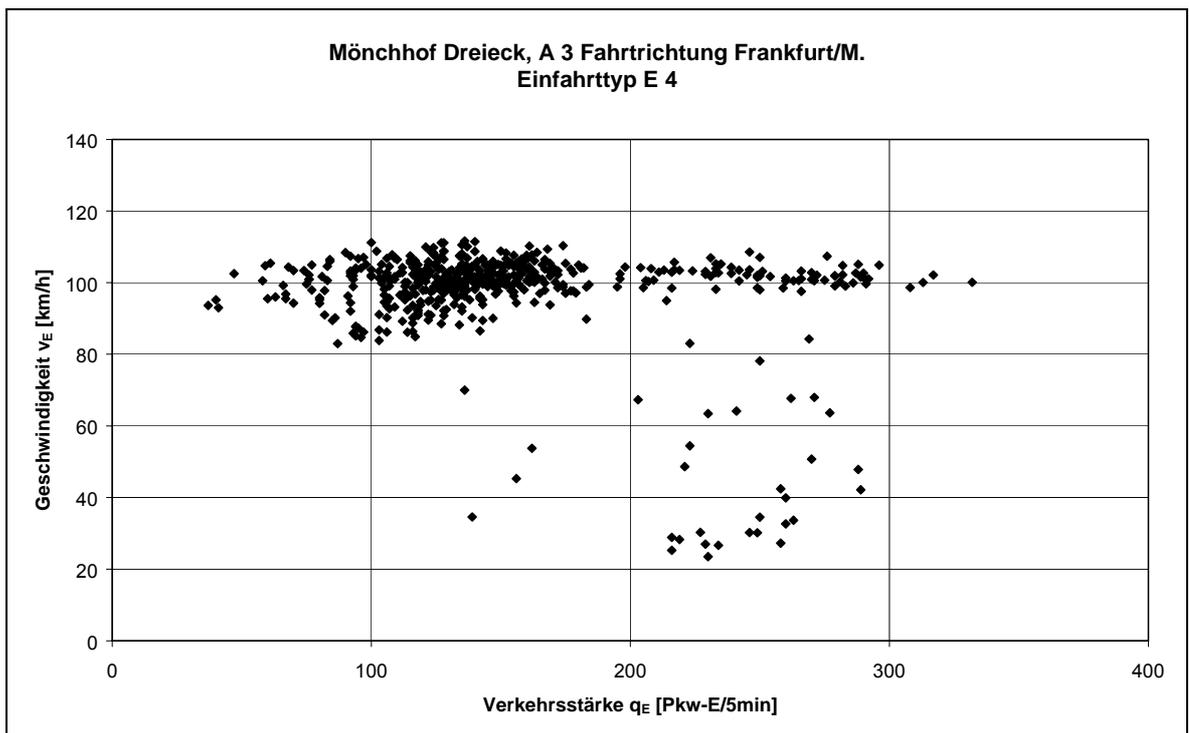
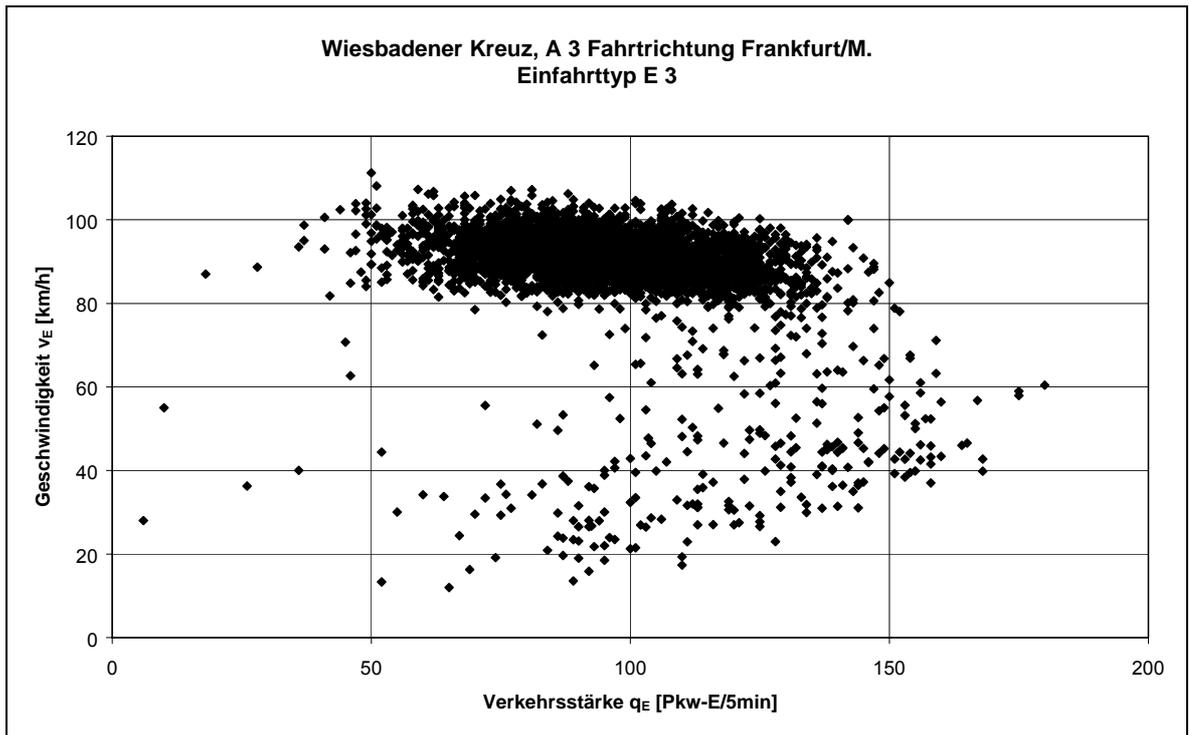


Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf
AS Friedberg (Einfahrttyp E 1), AS Garching-Süd (Einfahrttyp E 1)

Anhang 5.8

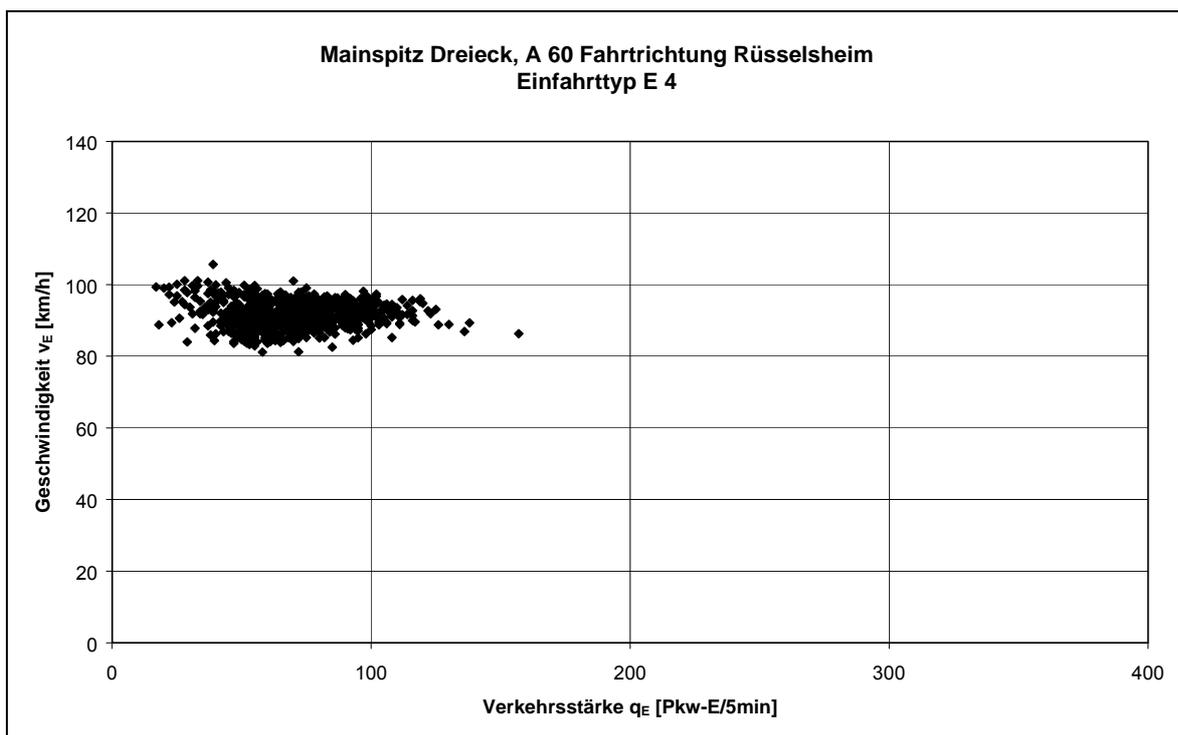
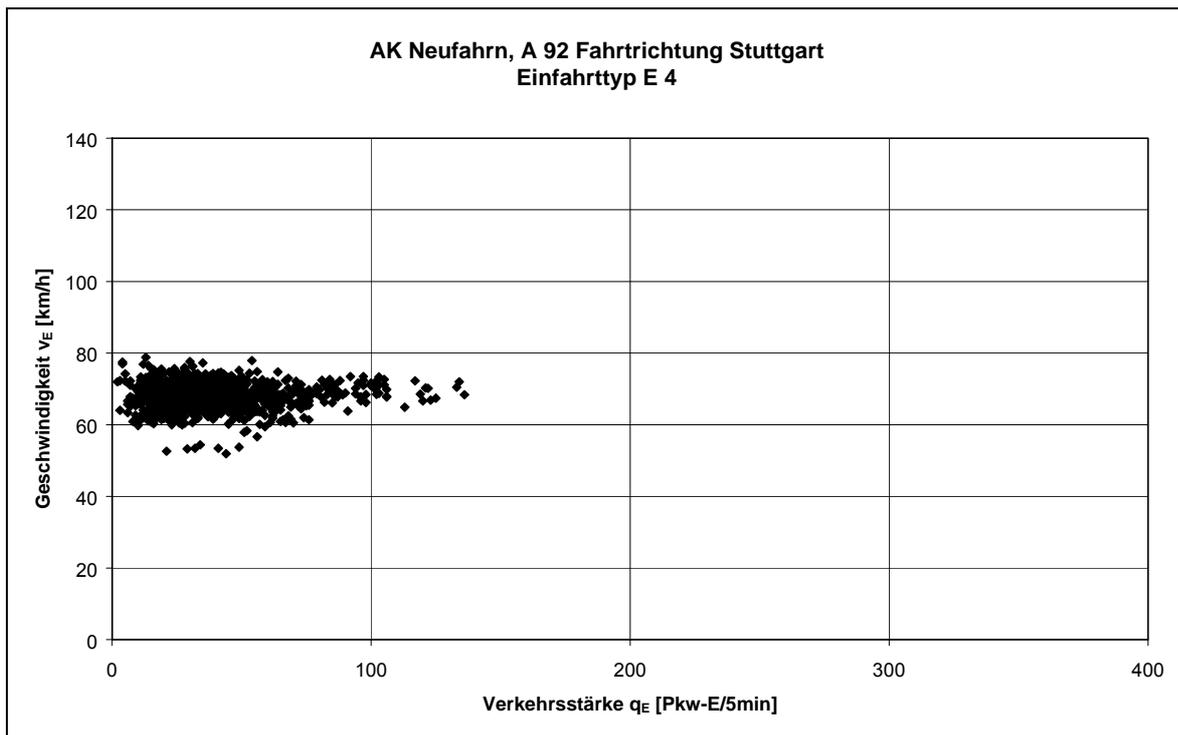


Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf
AS Oberschleißheim (Einfahrtstyp E 1), Viernheimer Dreieck (Einfahrtstyp E 2)

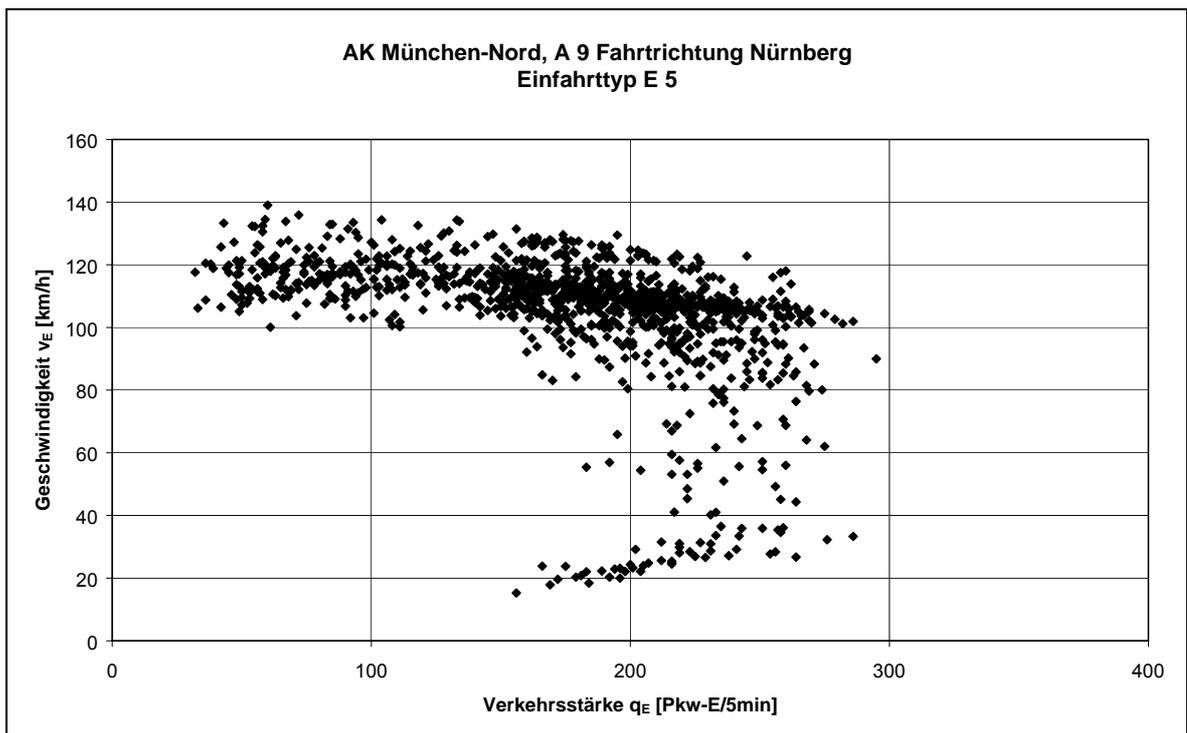
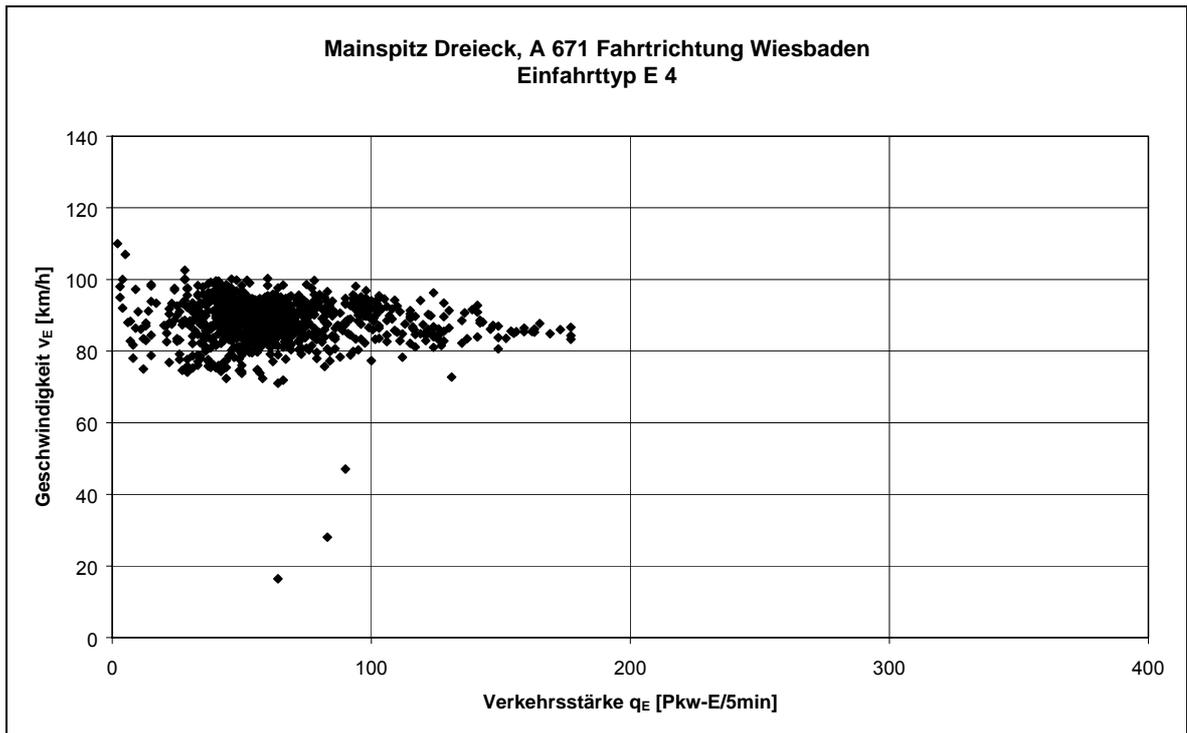


Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf
Wiesbadener Kreuz (Einfahrttyp E 3), Mönchhof Dreieck (Einfahrttyp E 4)

Anhang 5.10

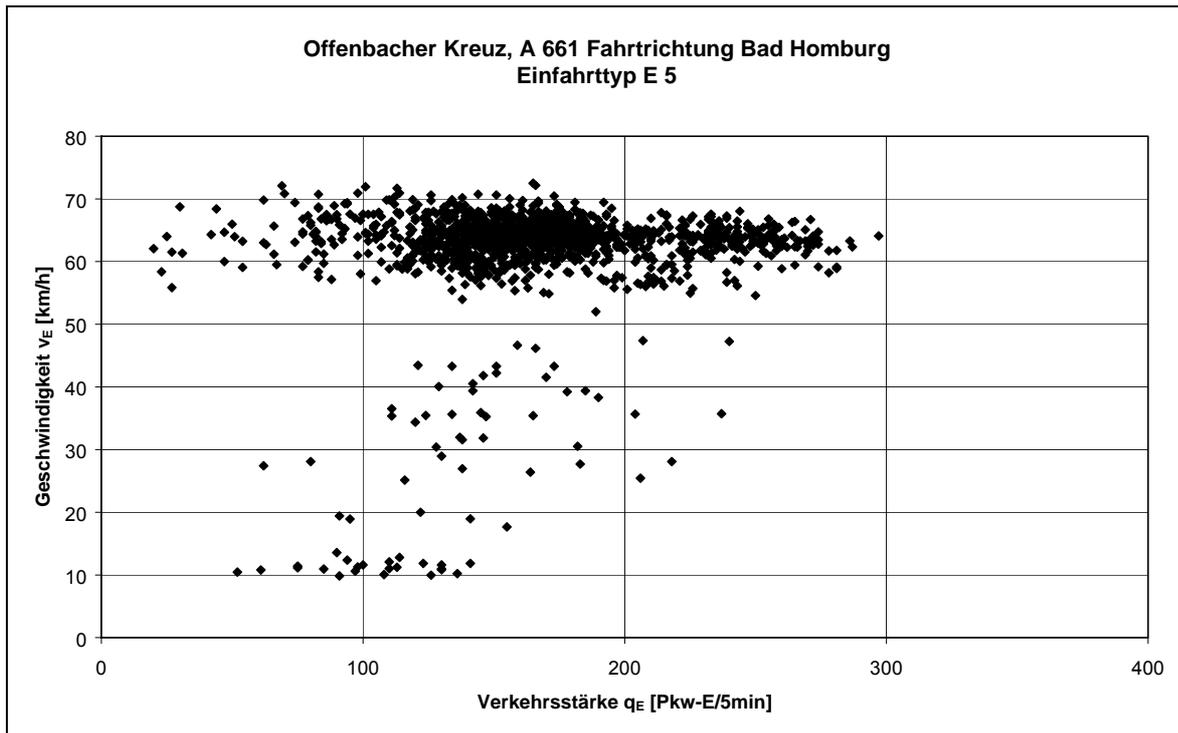


Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf
AK Neufahrn (Einfahrtstyp E 4), Mainspitz Dreieck (Fahrtrichtung Rüsselsheim, Einfahrtstyp E 4)

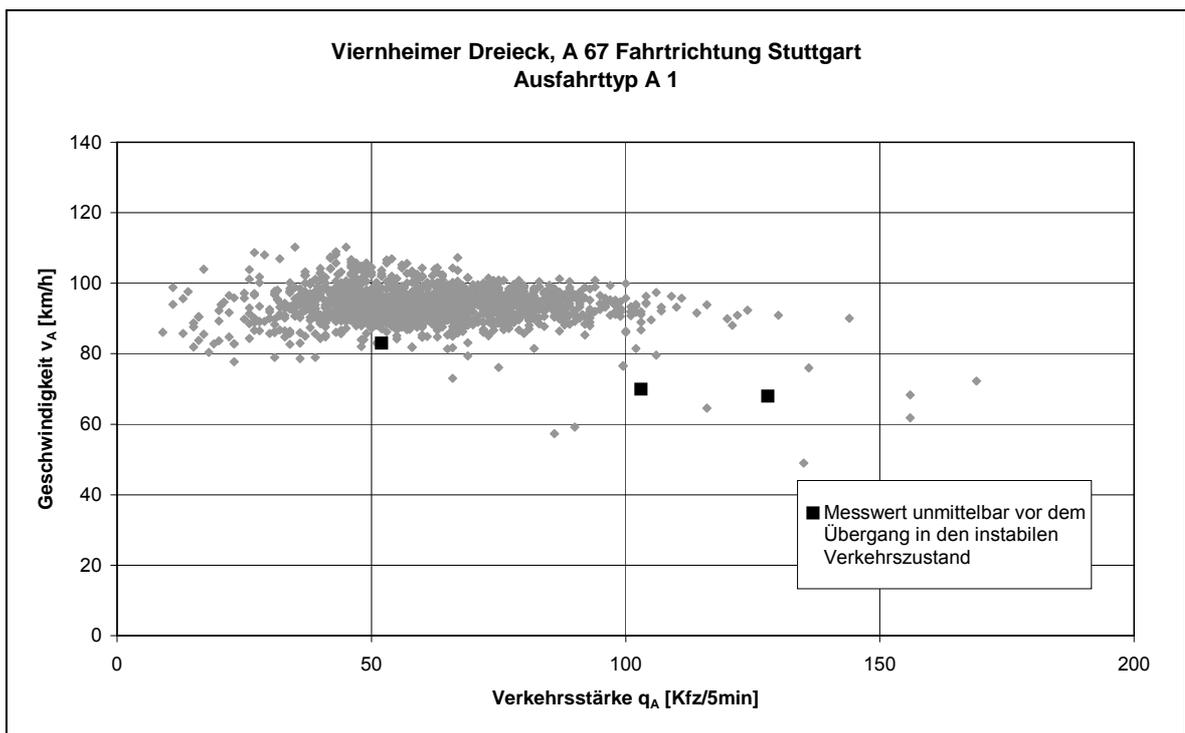
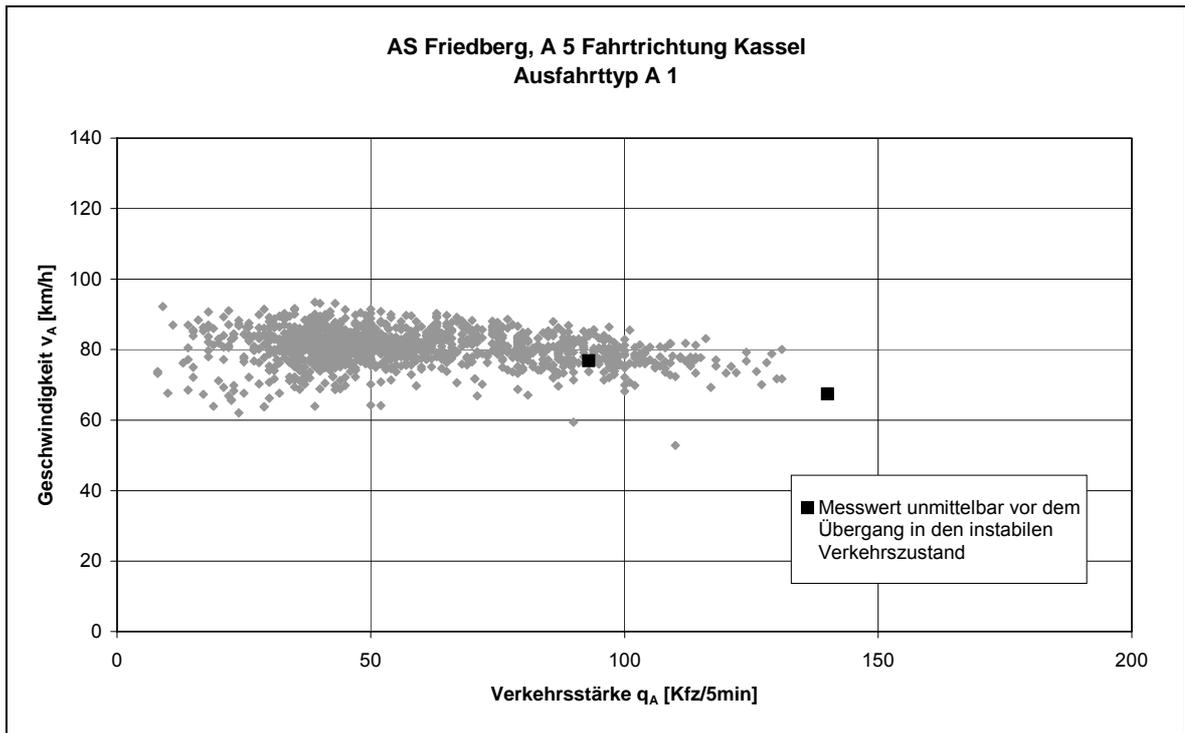


Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf
Mainspitz Dreieck (Fahrtrichtung Wiesbaden, Einfahrttyp E 4), AK München-Nord (Einfahrttyp E 5)

Anhang 5.12

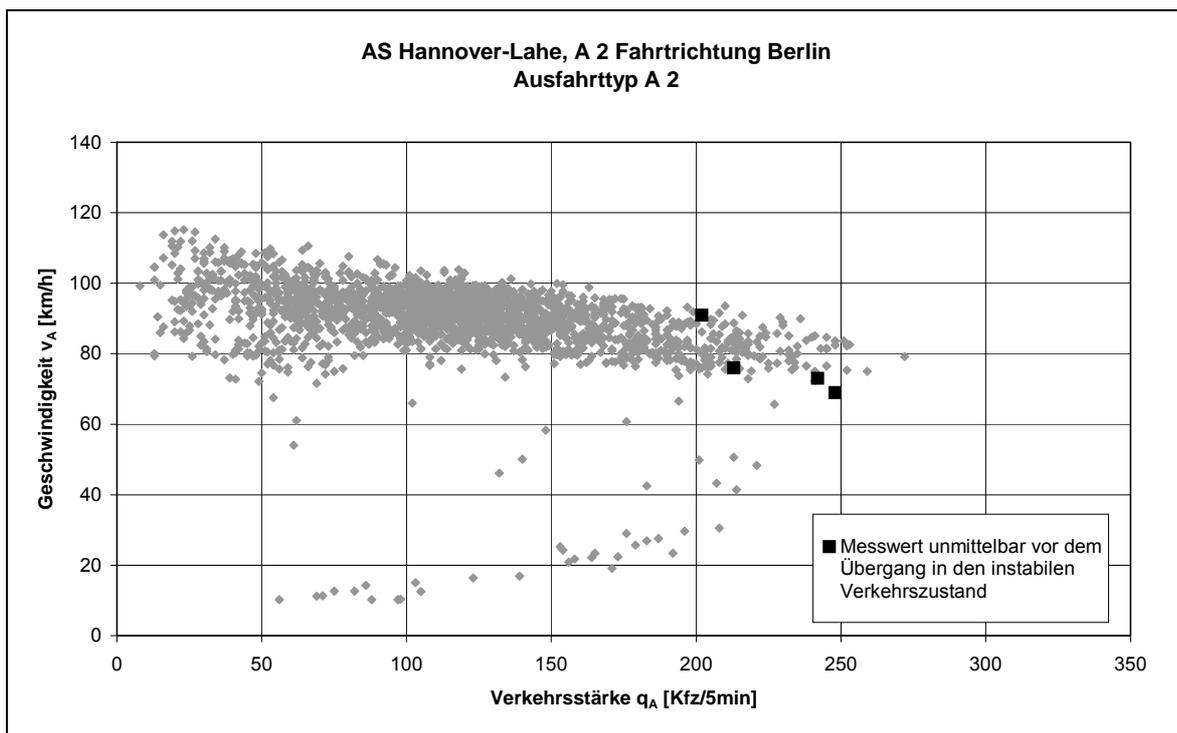
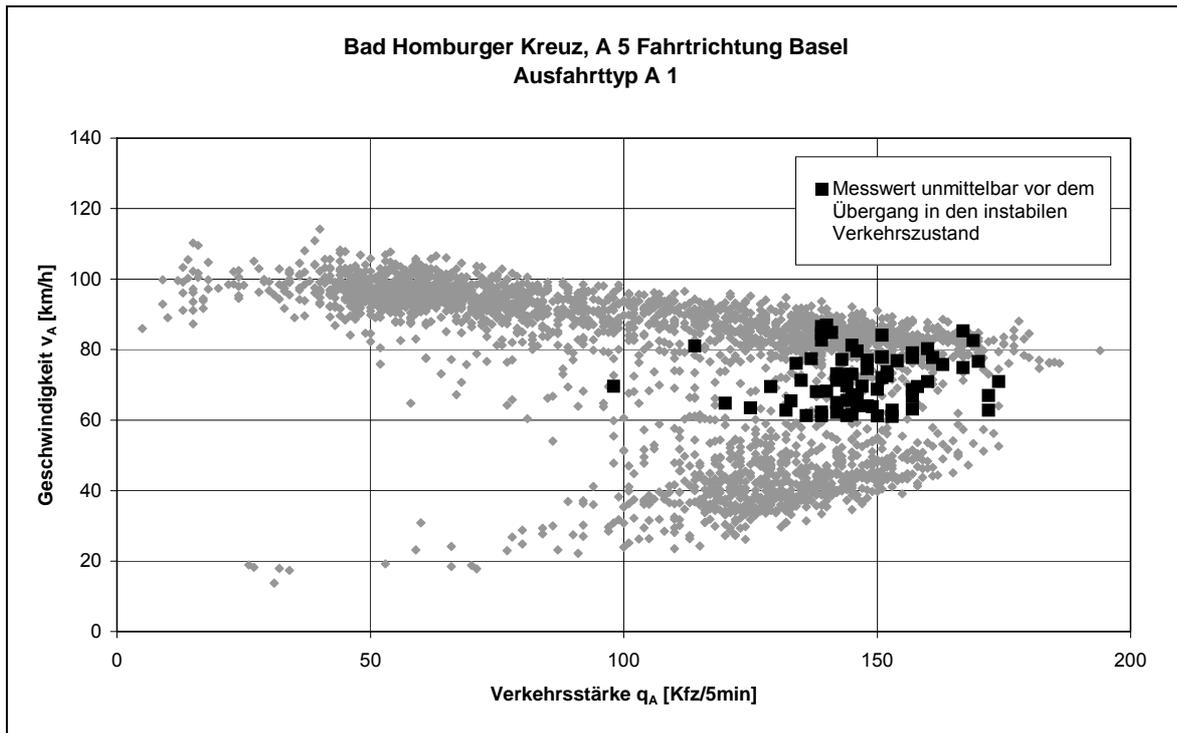


Ergebnisse der empirischen Untersuchungen zum Verkehrsablauf
Offenbacher Kreuz (Einfahrtstyp E 5)



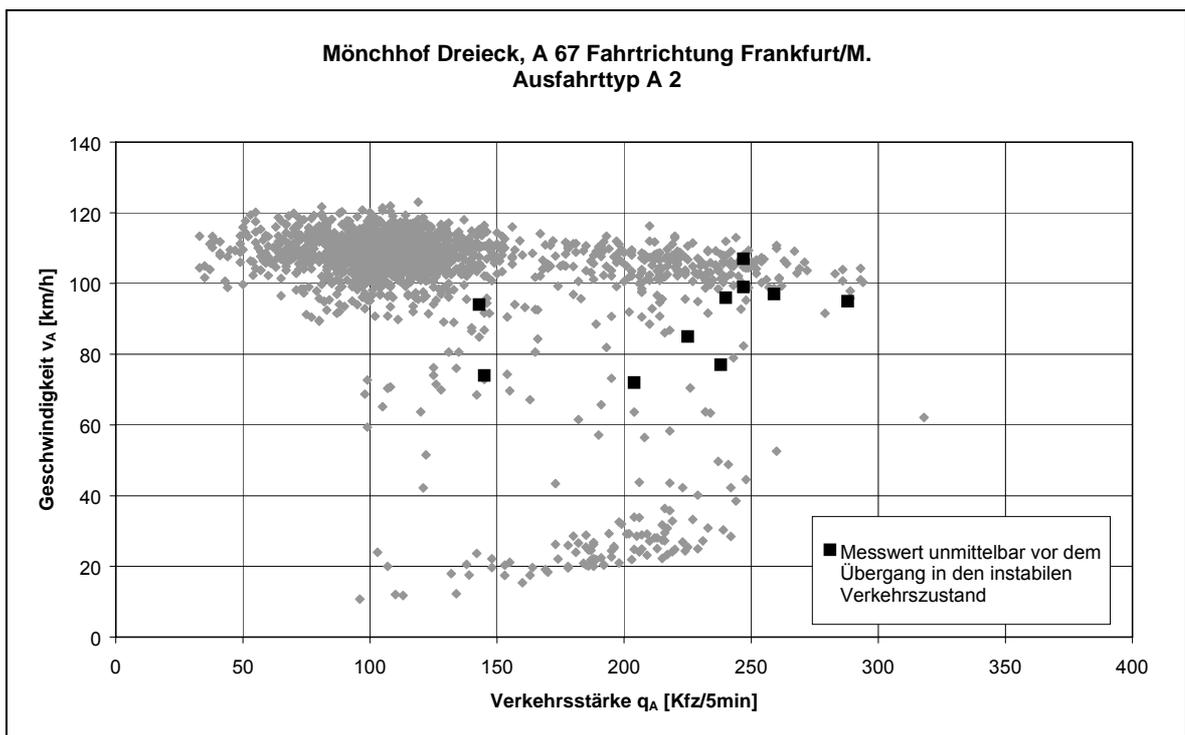
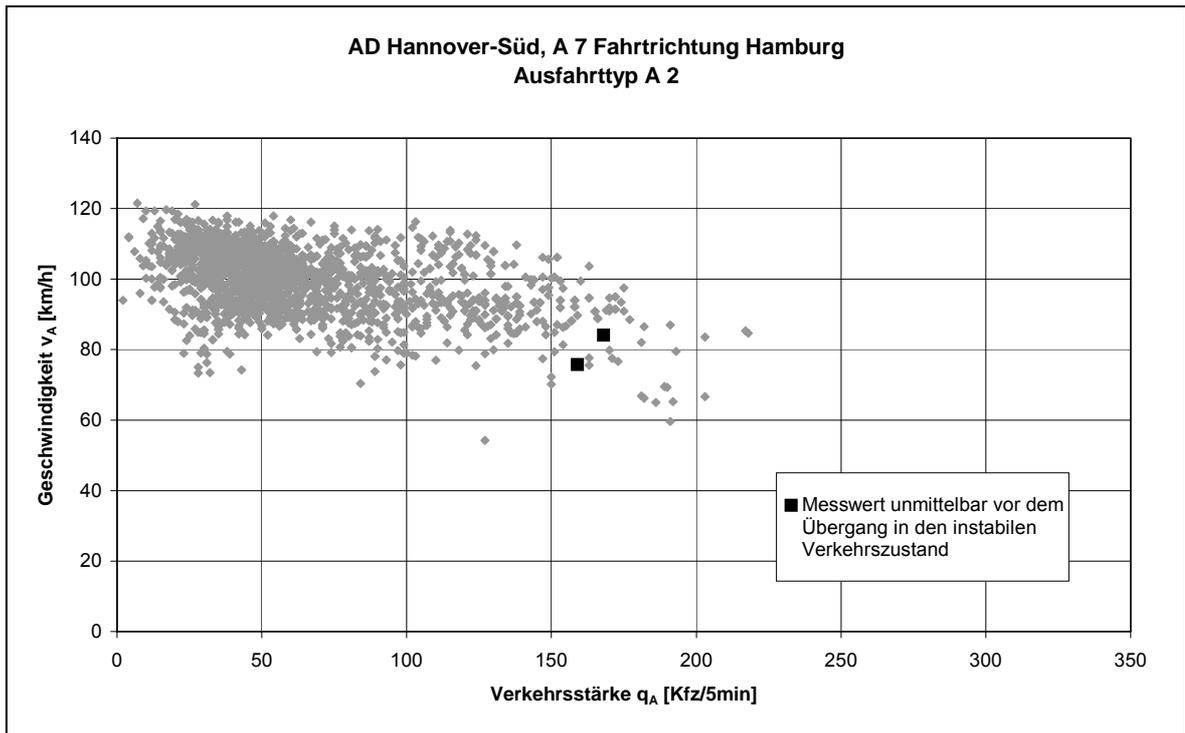
Übergänge vom stabilen in den instabilen Verkehrszustand
 AS Friedberg (Ausfahrttyp A 1), Viernheimer Dreieck (Ausfahrttyp A 1)

Anhang 7.2



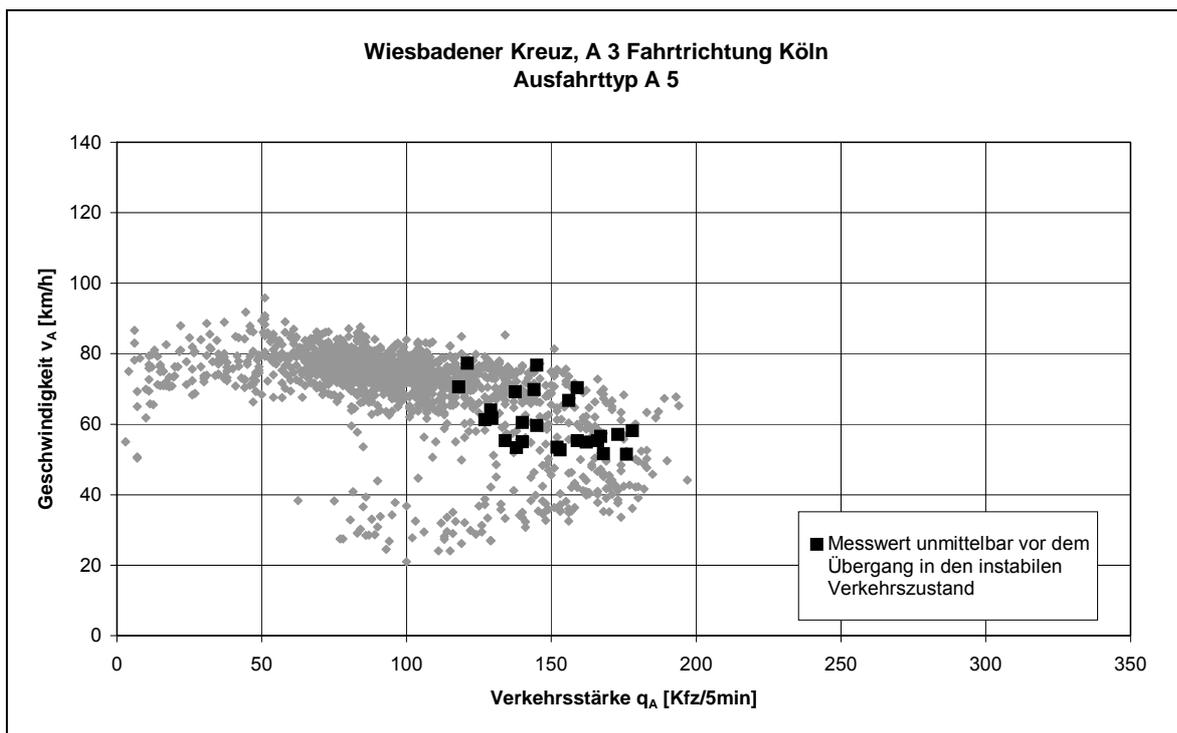
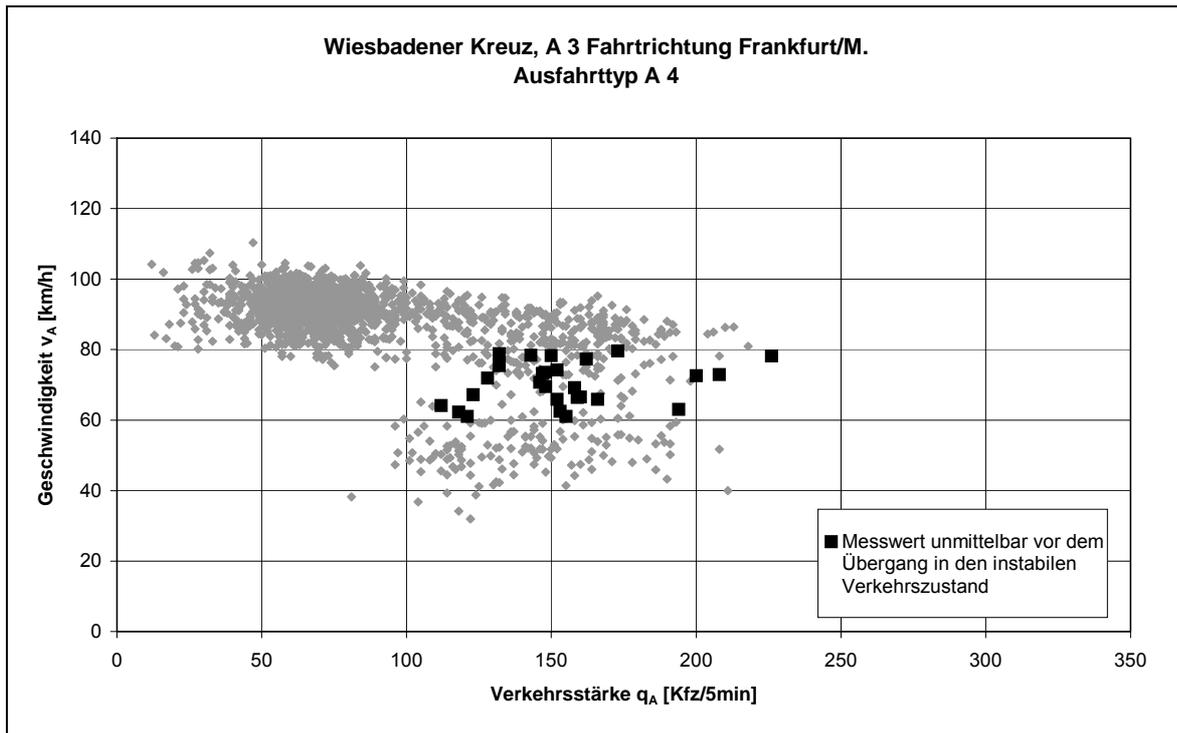
Übergänge vom stabilen in den instabilen Verkehrszustand

Bad Homburger Kreuz (Ausfahrttyp A 1), AS Hannover-Lahe (Ausfahrttyp A 2)



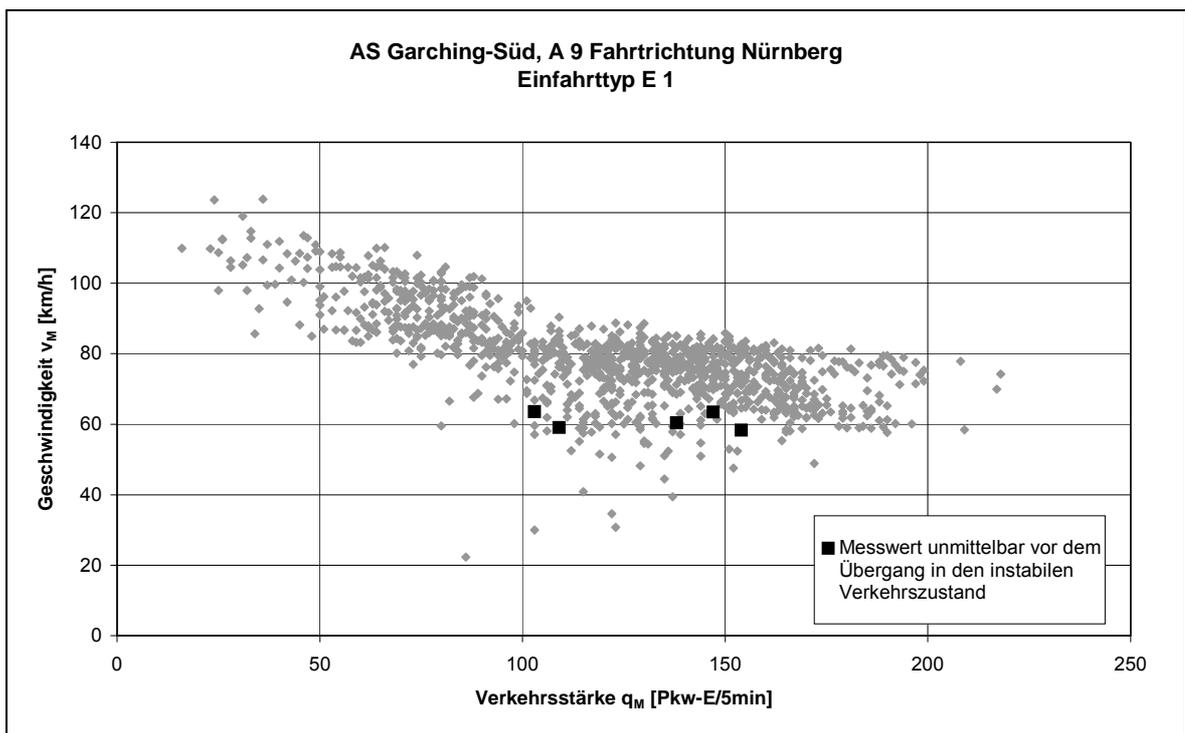
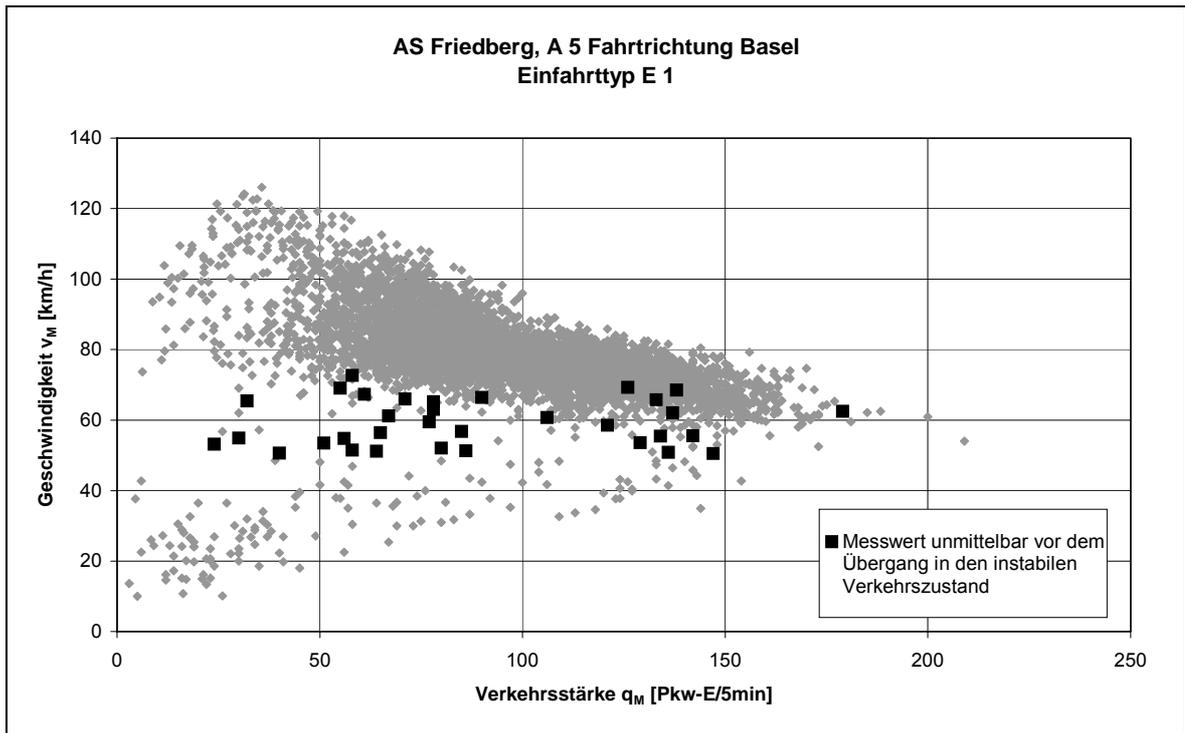
Übergänge vom stabilen in den instabilen Verkehrszustand
AD Hannover-Süd (Ausfahrttyp A 2), Mönchhof Dreieck (Ausfahrttyp A 2)

Anhang 7.4



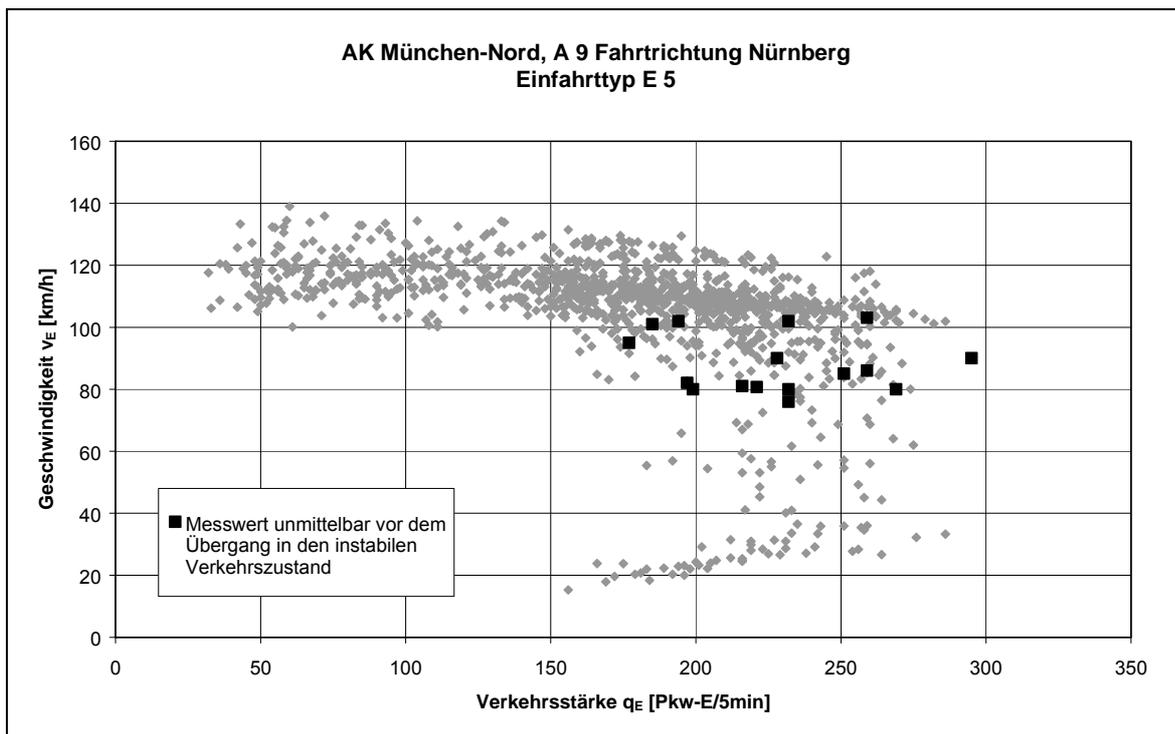
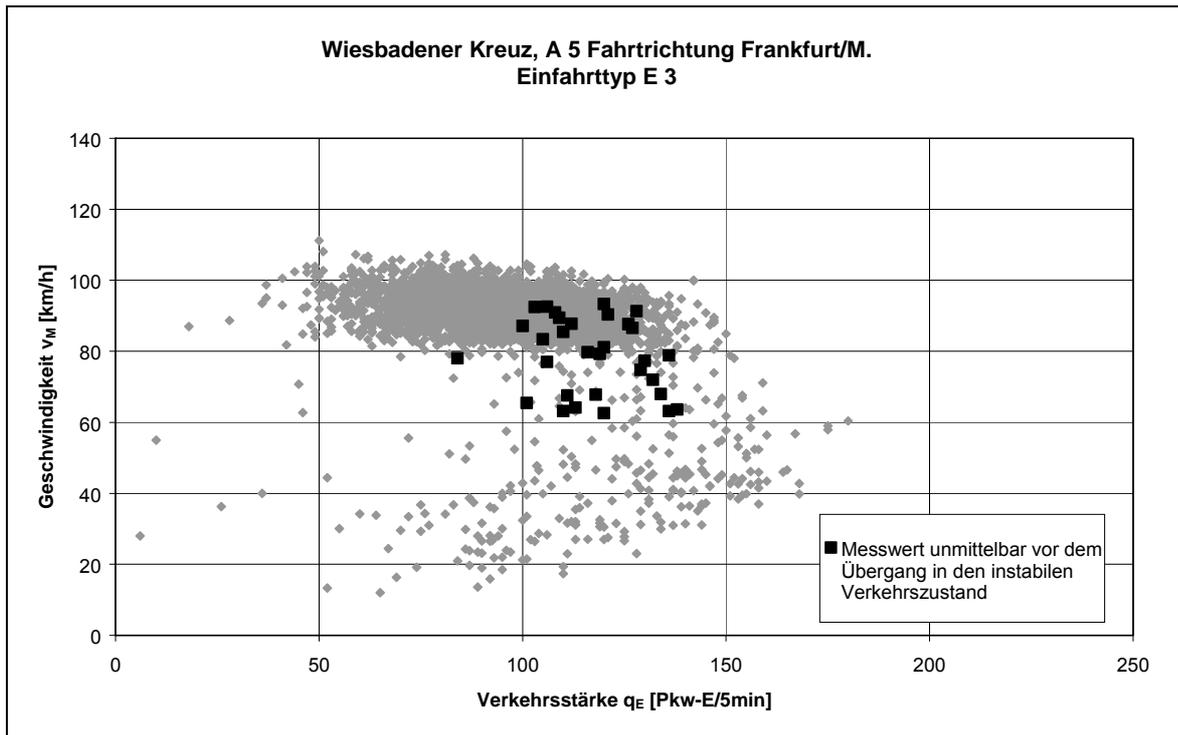
Übergänge vom stabilen in den instabilen Verkehrszustand

Wiesbadener Kreuz (Ausfahrttyp A 4), Wiesbadener Kreuz (Ausfahrttyp A 5)

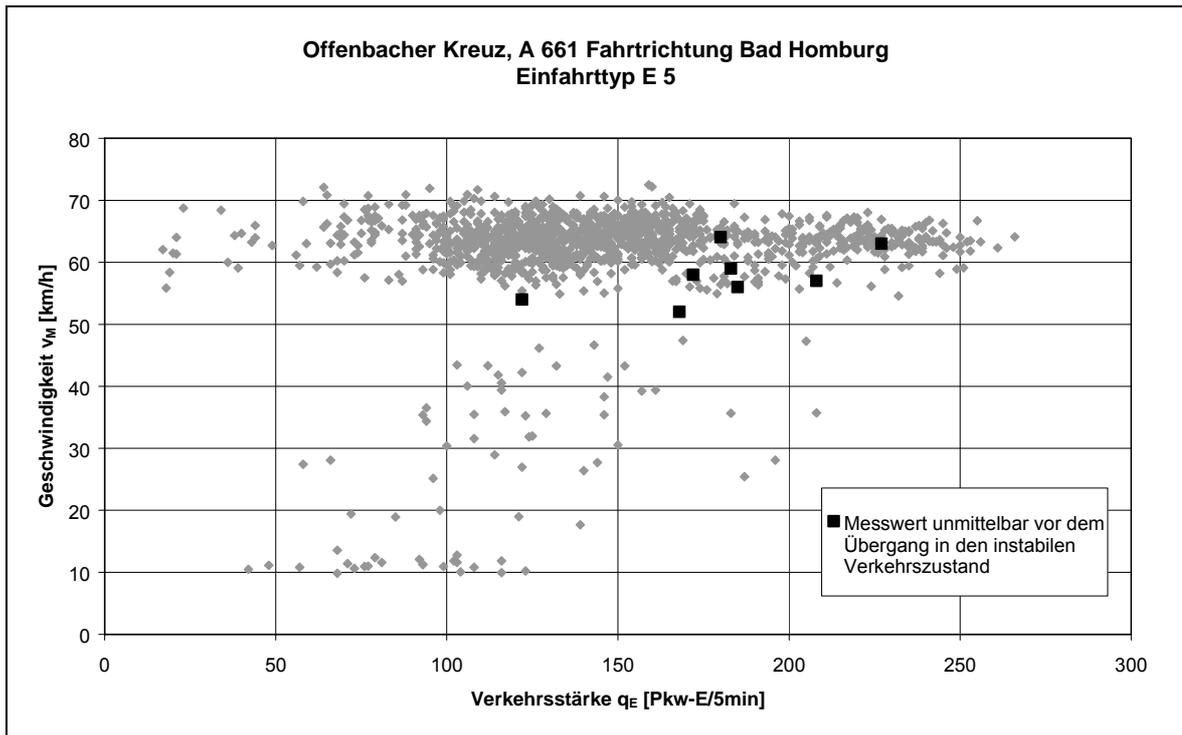


Übergänge vom stabilen in den instabilen Verkehrszustand
 AS Friedberg (Einfahrttyp E 1), AS Garching-Süd (Einfahrttyp E 1)

Anhang 7.6

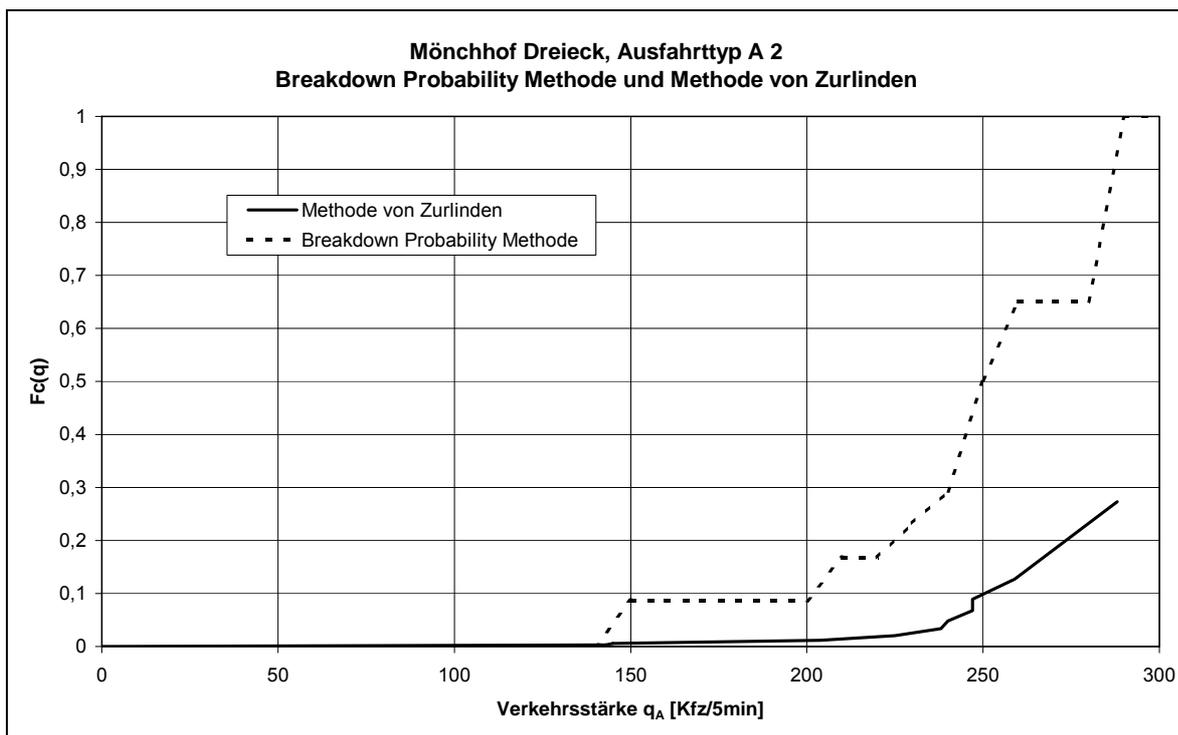
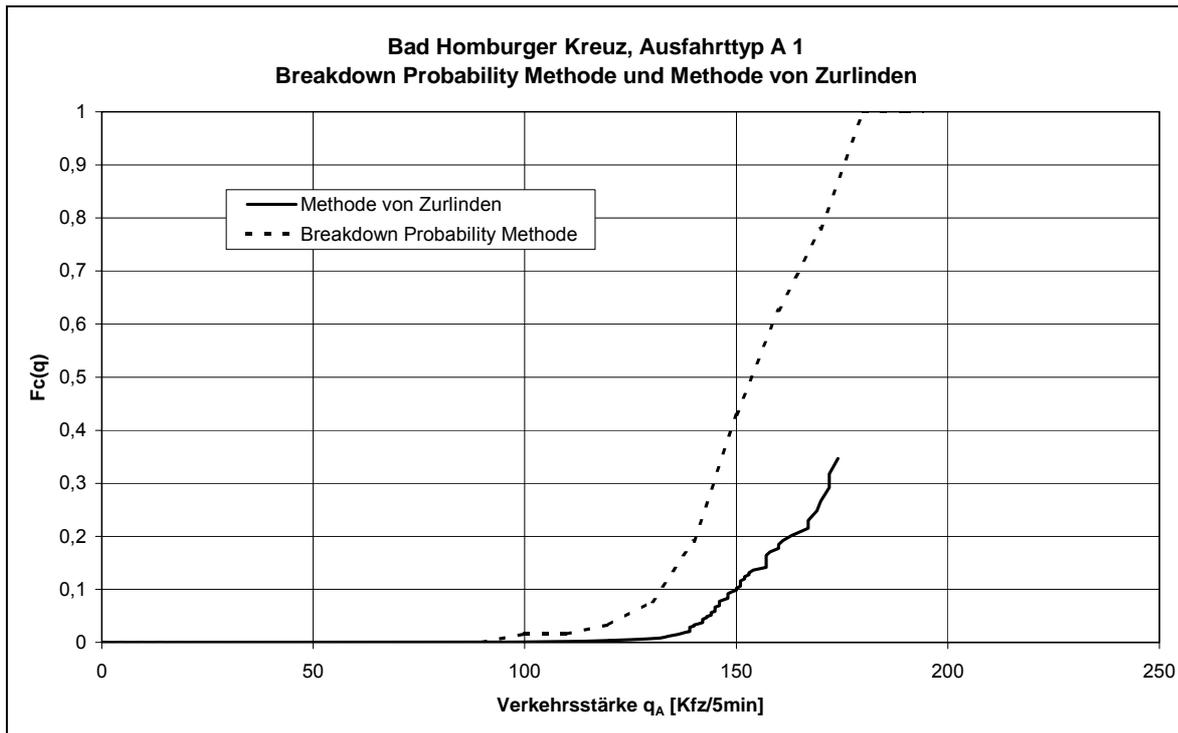


Übergänge vom stabilen in den instabilen Verkehrszustand
Wiesbadener Kreuz (Einfahrttyp E 3), AK München-Nord (Einfahrttyp E 5)



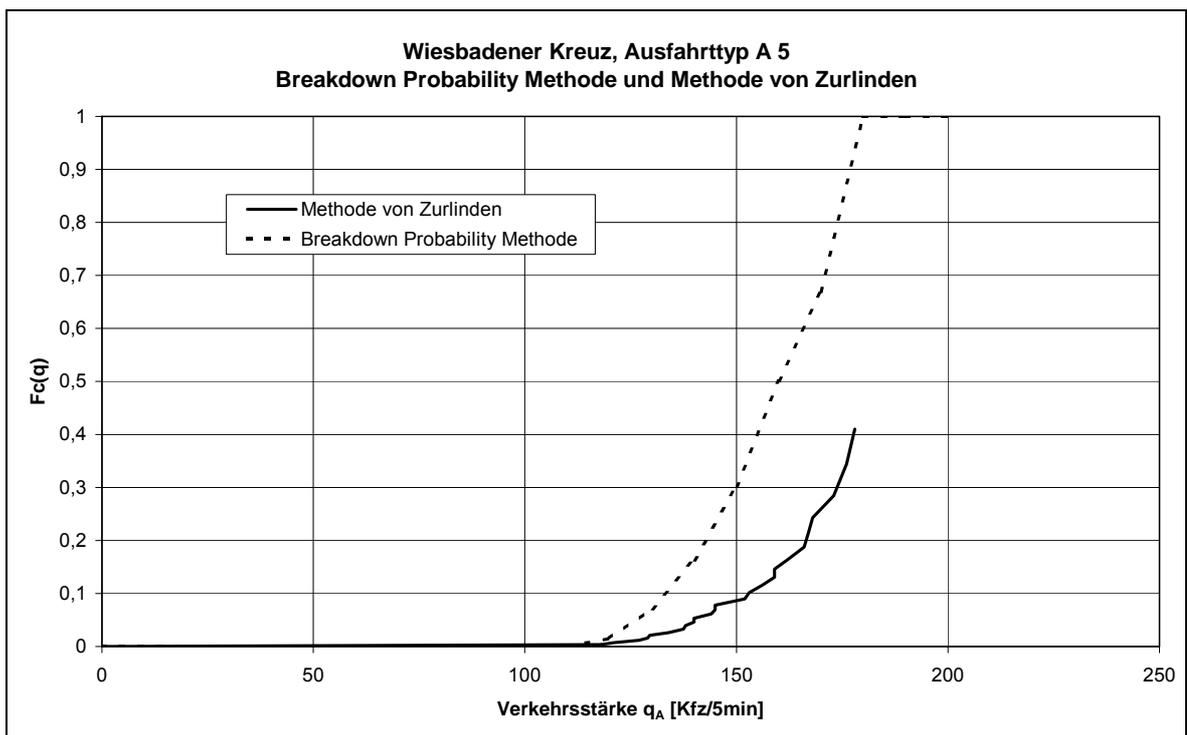
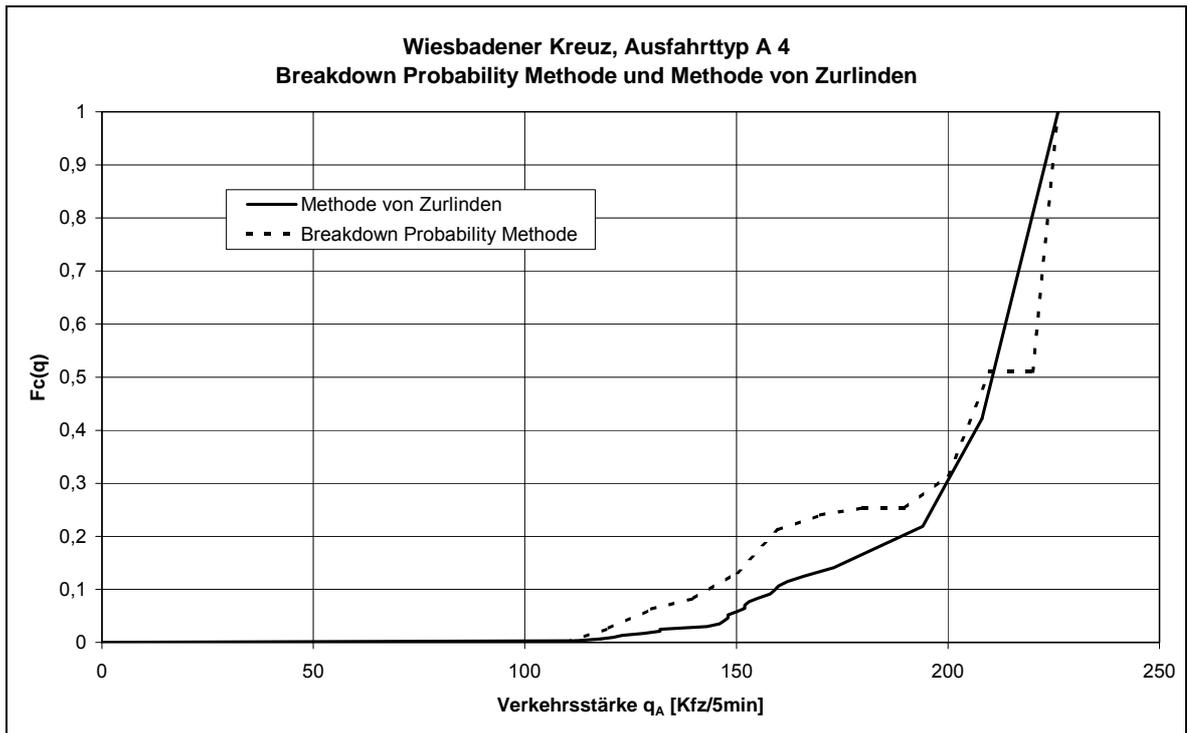
Übergänge vom stabilen in den instabilen Verkehrszustand
Offenbacher Kreuz (Einfahrttyp E 5)

Anhang 7.8



Verteilungsfunktionen der Kapazität

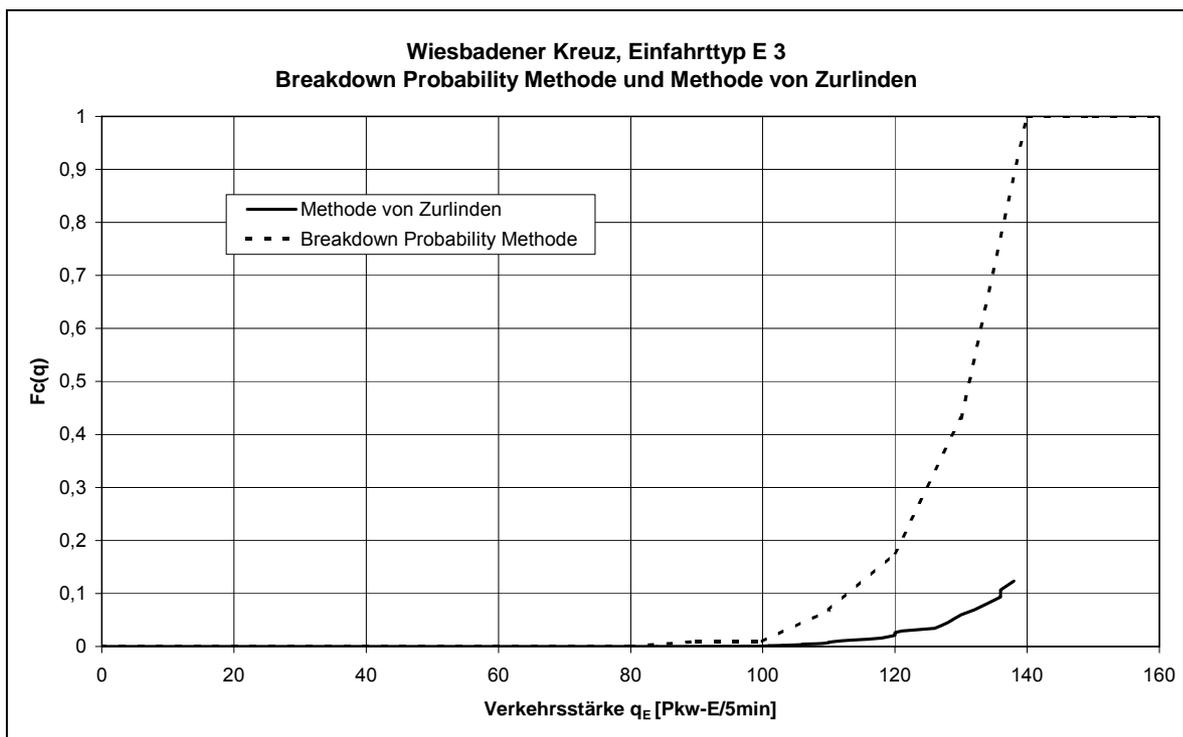
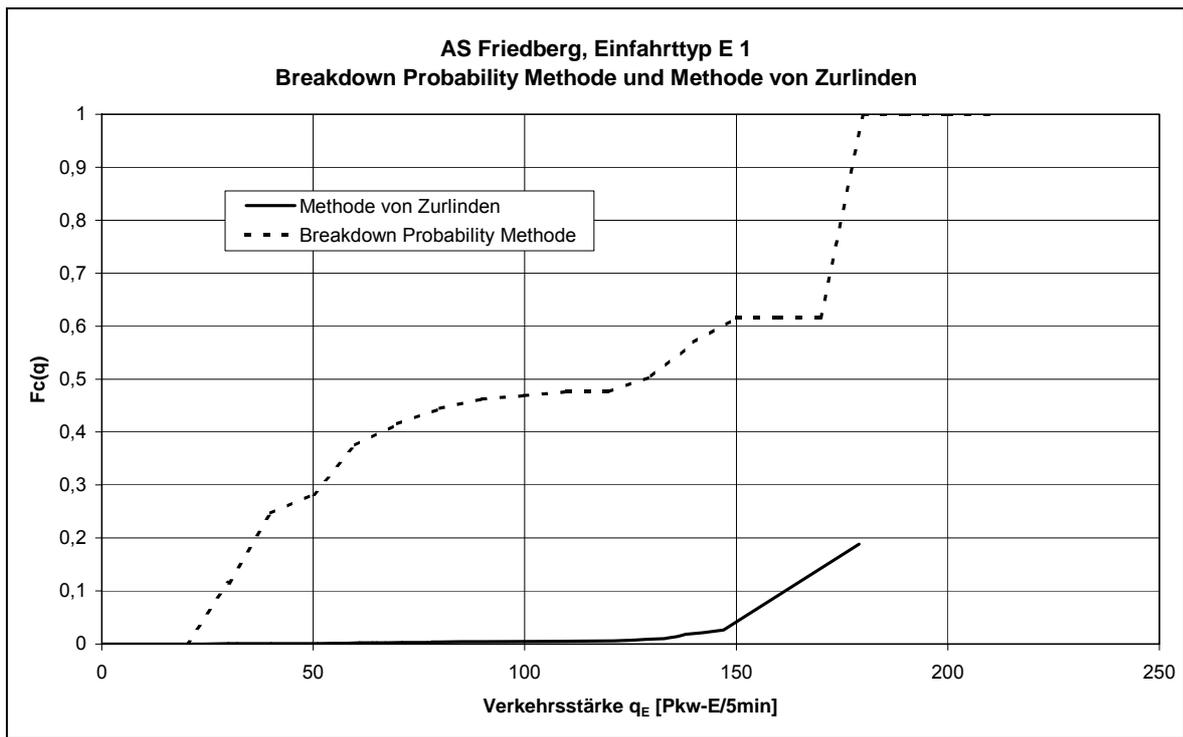
Bad Homburger Kreuz (Ausfahrttyp A 1), Mönchhof Dreieck (Ausfahrttyp A 2)

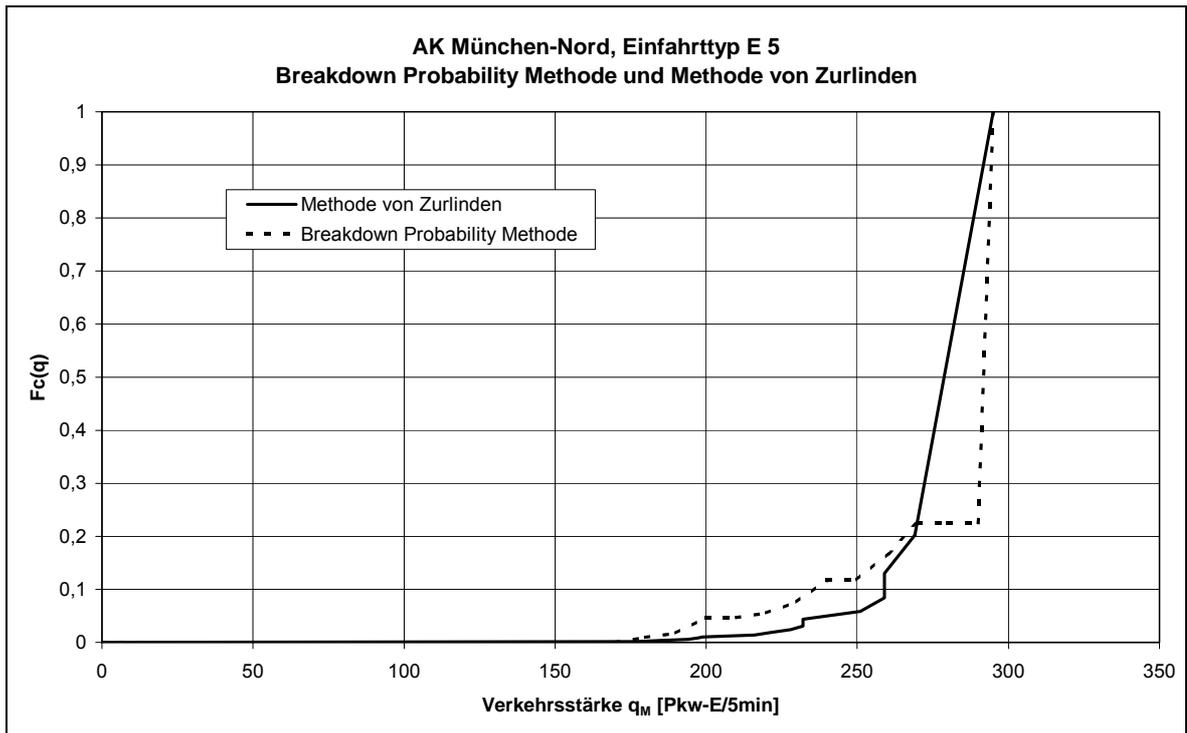


Verteilungsfunktionen der Kapazität

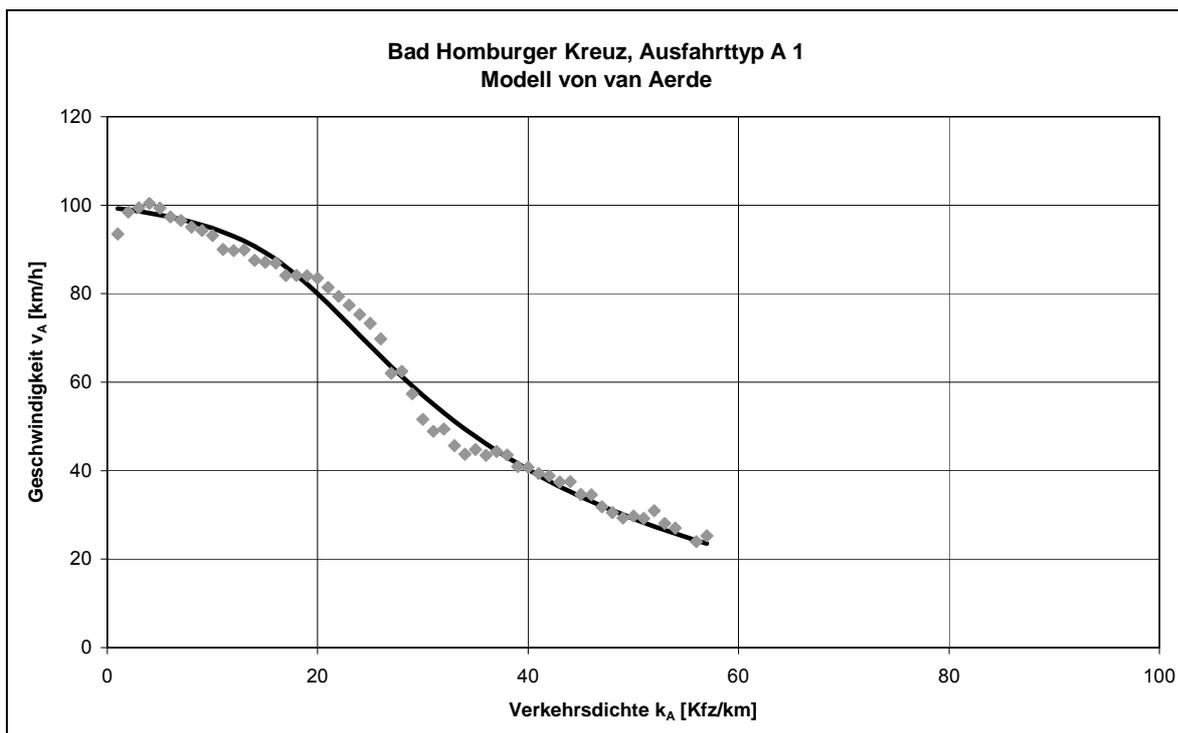
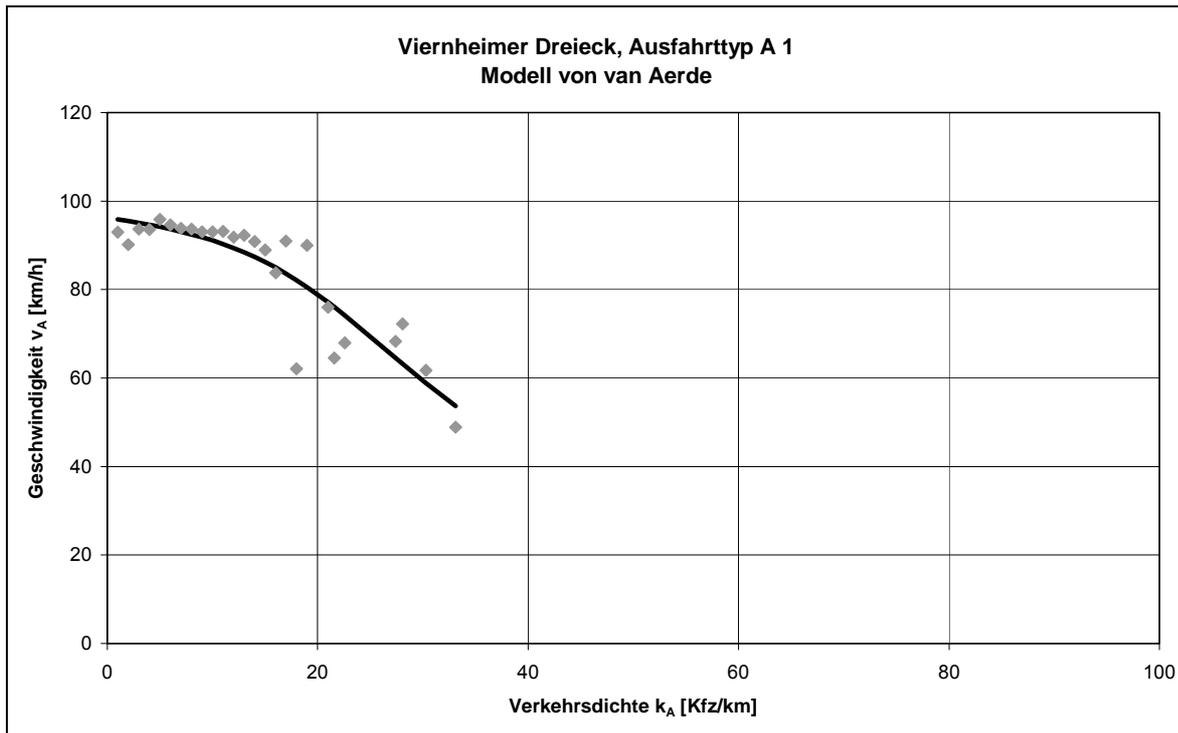
Wiesbadener Kreuz (Ausfahrttyp A 4), Wiesbadener Kreuz (Ausfahrttyp A 5)

Anhang 7.10



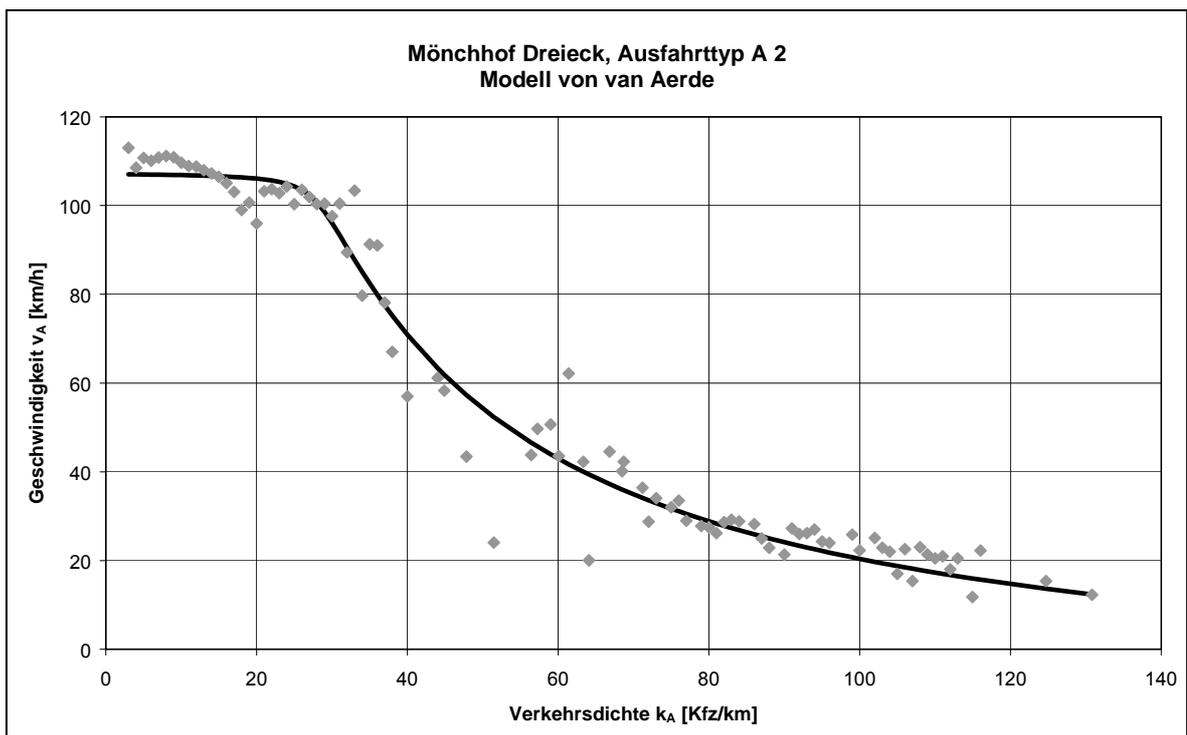
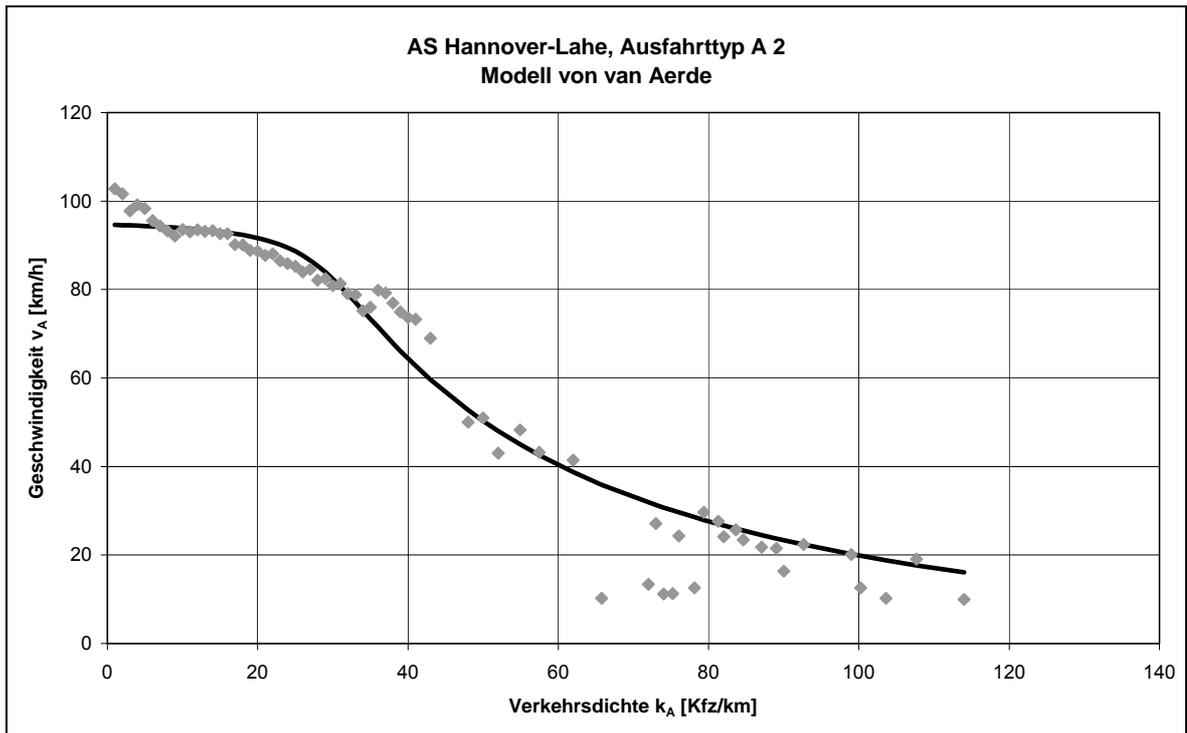


Anhang 7.12



Modell von VAN AERDE

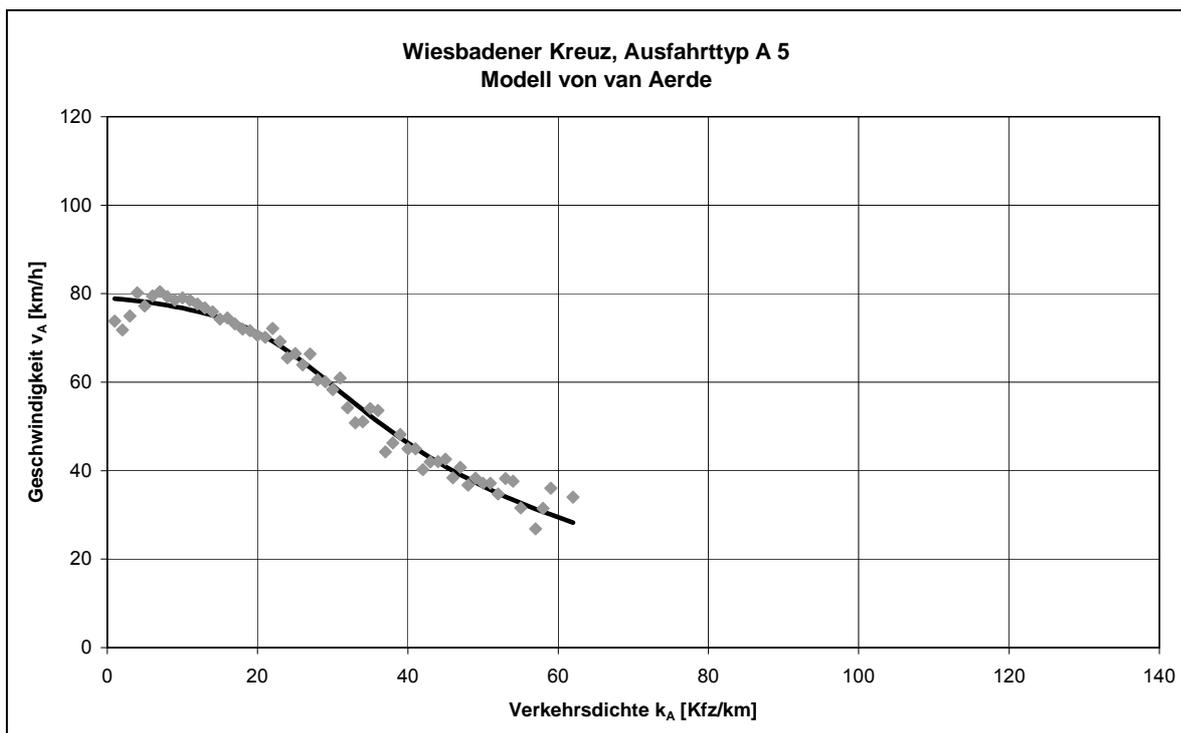
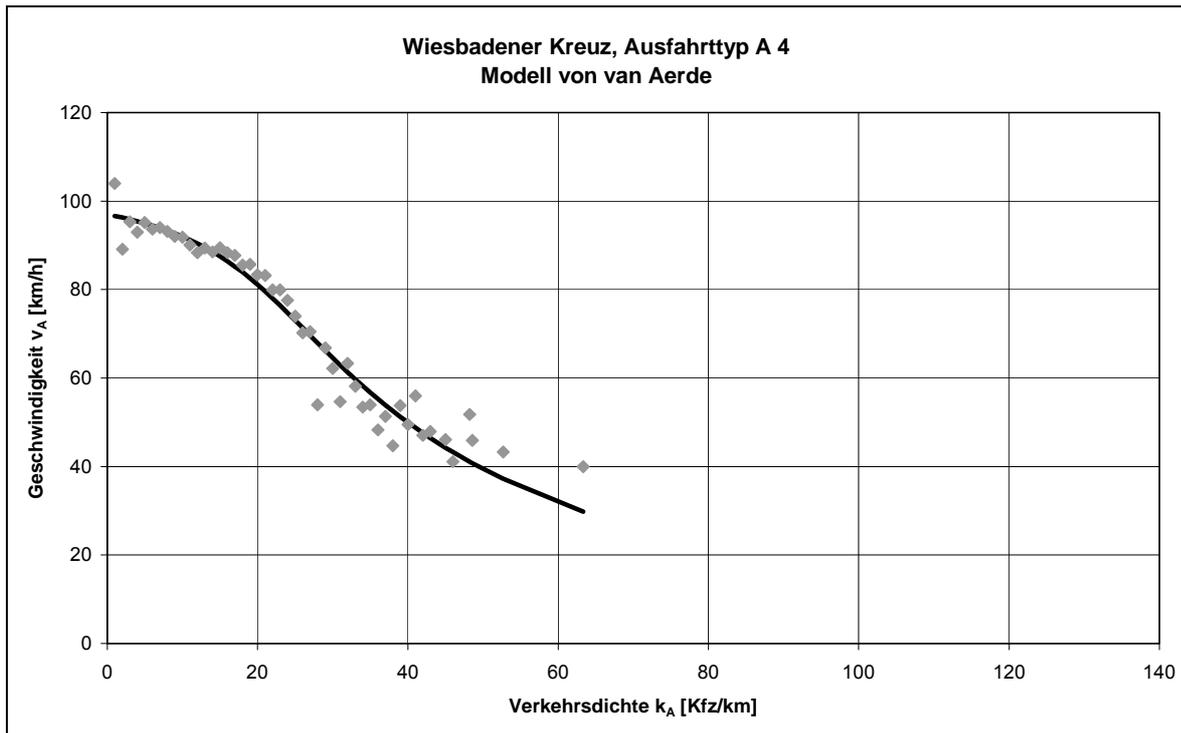
Viernheimer Dreieck (Ausfahrttyp A 1), Bad Homburger Kreuz (Ausfahrttyp A 1)



Modell von VAN AERDE

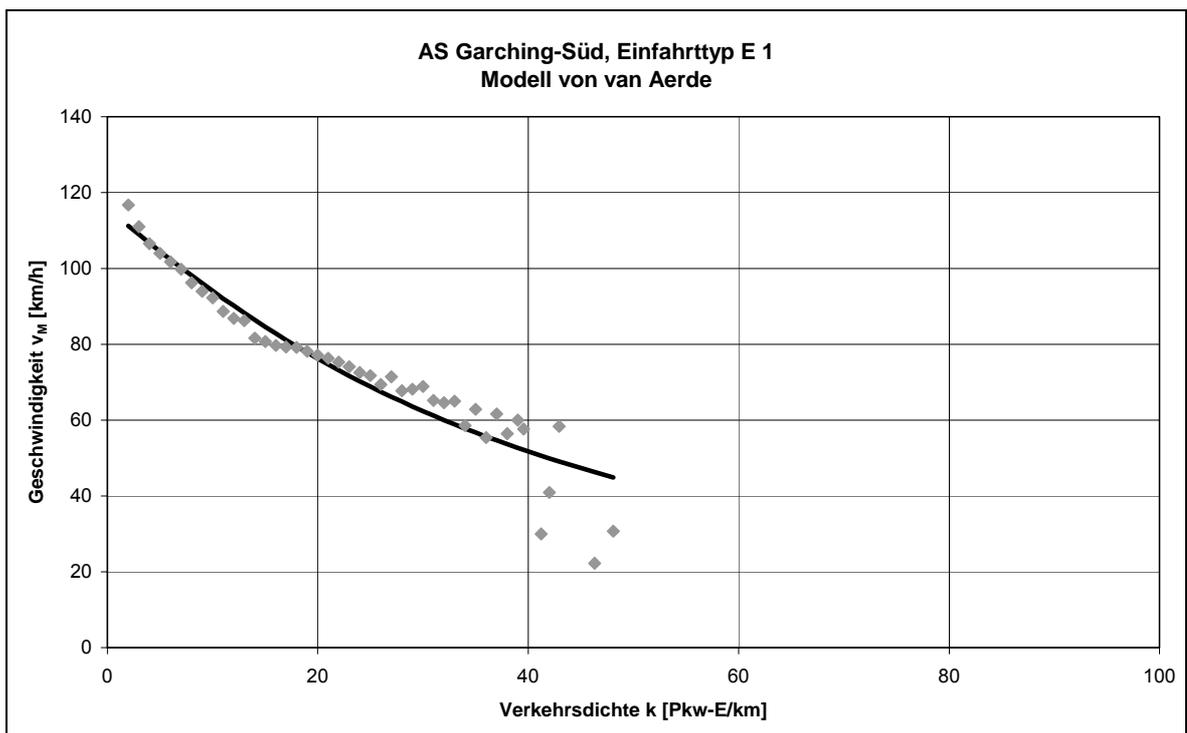
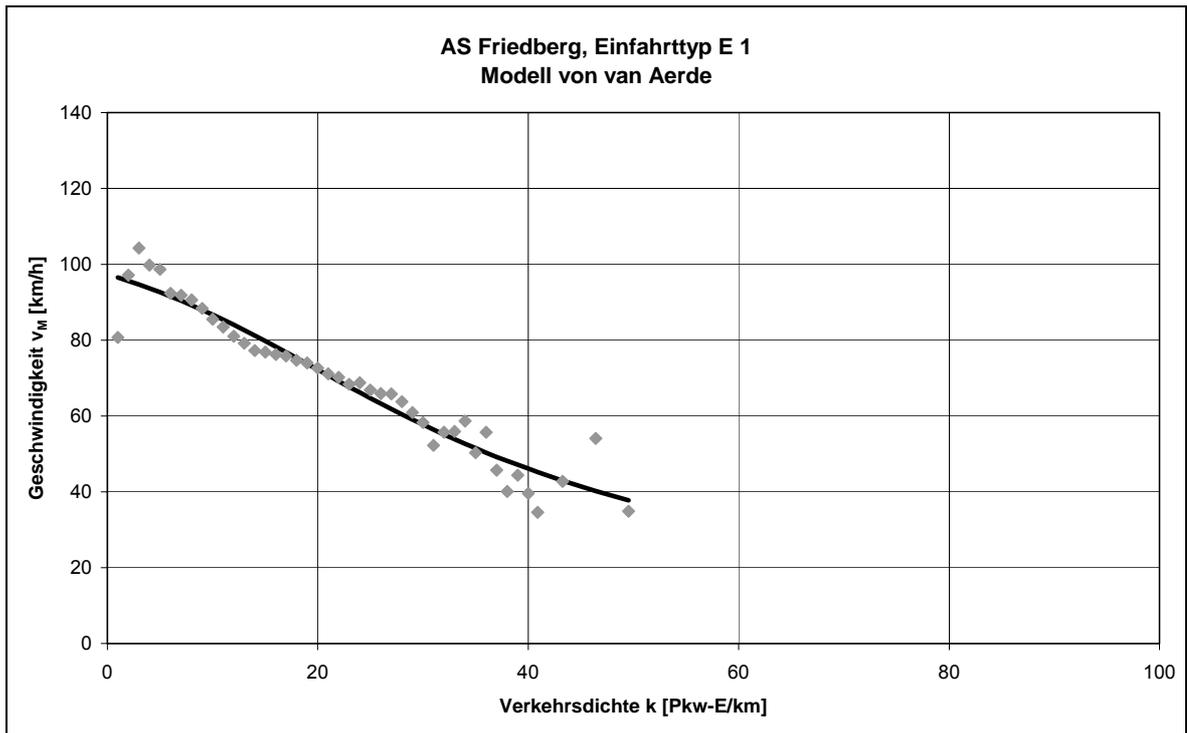
AS Hannover-Lahe (Ausfahrttyp A 2), Mönchhof Dreieck (Ausfahrttyp A 2)

Anhang 7.14



Modell von VAN AERDE

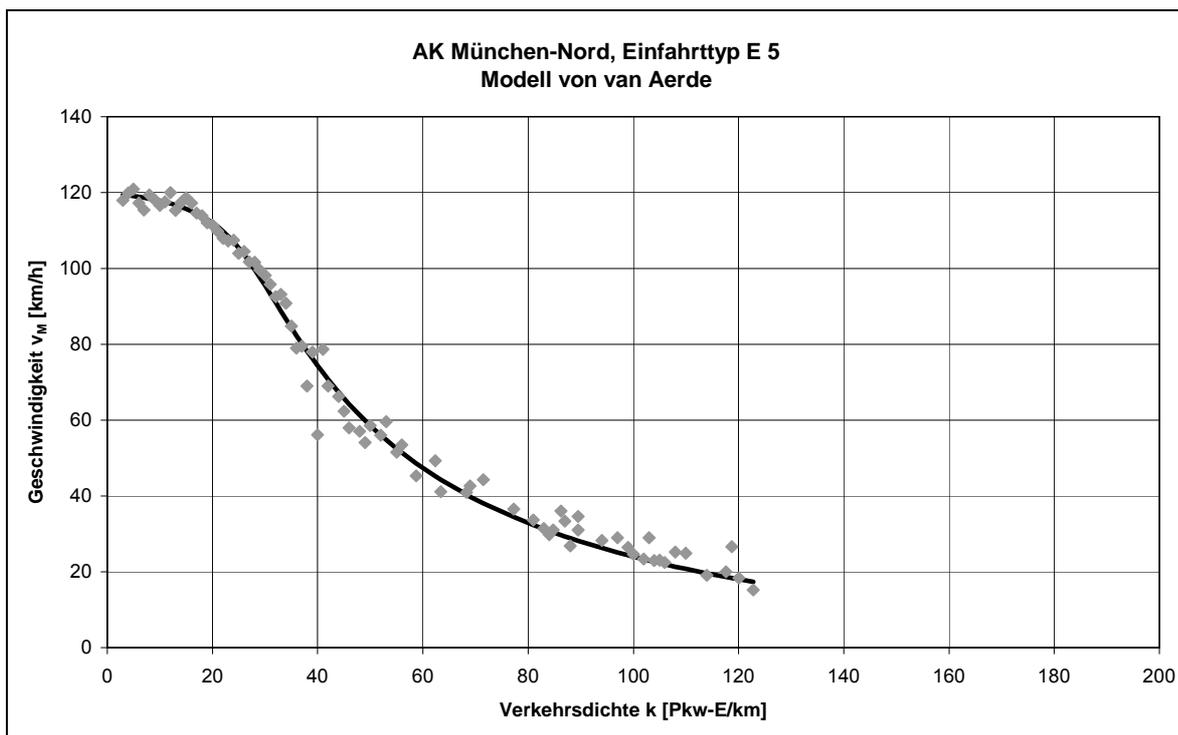
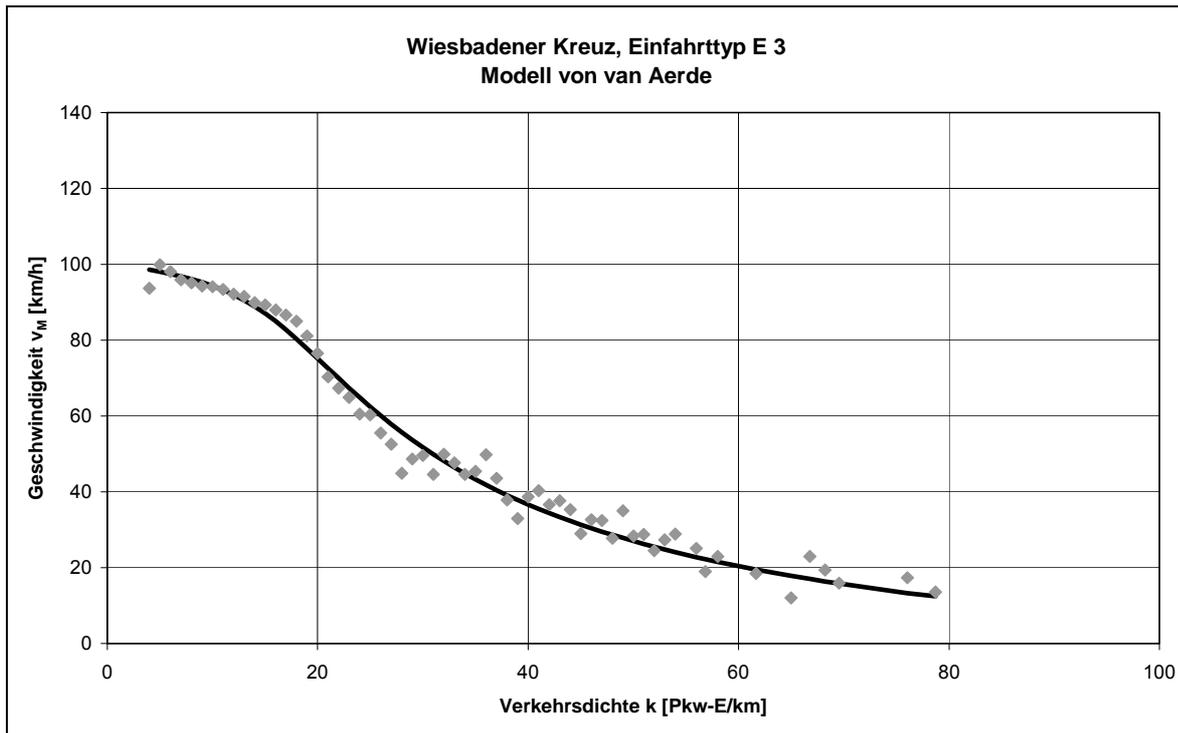
Wiesbadener Kreuz (Ausfahrttyp A 4), Wiesbadener Kreuz (Ausfahrttyp A 5)



Modell von VAN AERDE

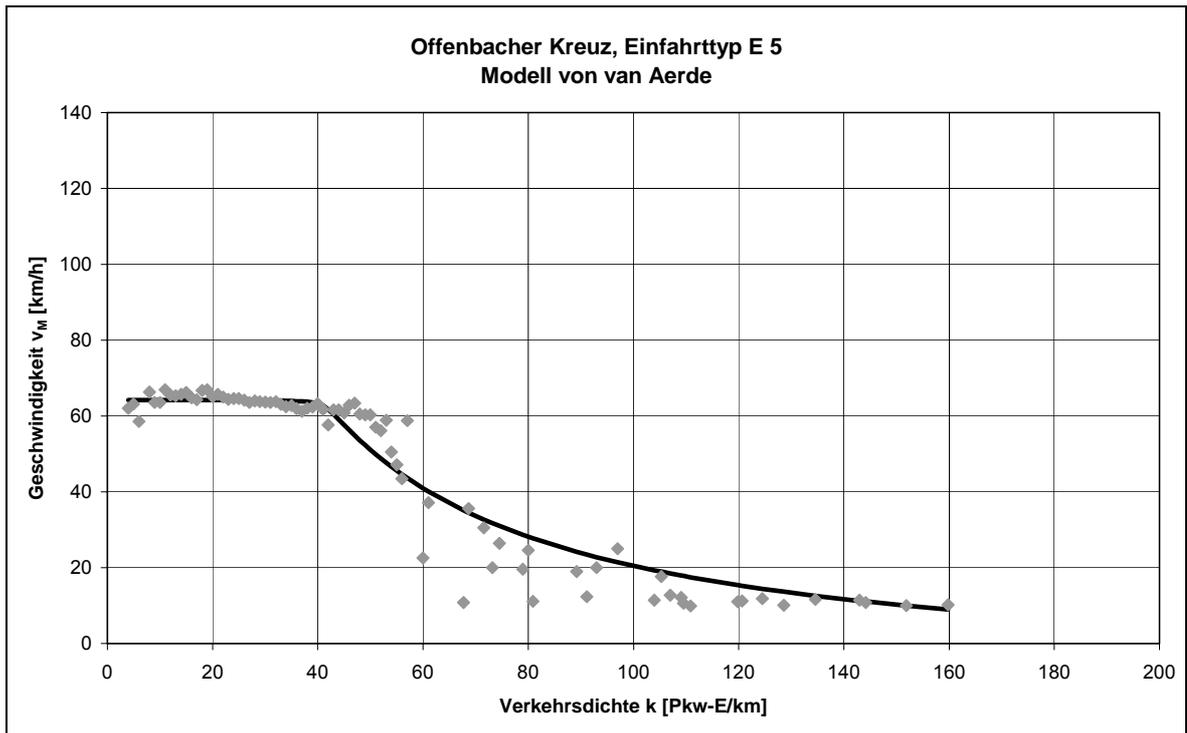
AS Friedberg (Einfahrttyp E 1), AS Garching-Süd (Einfahrttyp E 1)

Anhang 7.16



Modell von VAN AERDE

Wiesbadener Kreuz (Einfahrttyp E 3), AK München-Nord (Einfahrttyp E 5)



Anhang 7.18

Lineare Einfach- und Mehrfachregression													
Ansatz	Konstante	Regressionskoeffizienten der Variablen				Standard-schätzfehler	Bestimmtheitsmaß	Signifikanztest für die Regressionskoeffizienten					
		X ₁ : q _H	X ₂ : q _{H, LKW}	X ₃ : q _E	X ₄ : q _{E, LKW}			X ₁	X ₂	X ₃	X ₄		
Nr.	a	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	s _{xy}	B	\hat{t}_1	\hat{t}_2	\hat{t}_3	\hat{t}_4		
1	250,517	0,816	0,1557	-	-	79,022	0,616	65,178	23,127	-	-	-	-
2	245,891	0,105	0,179	-0,253	-	74,147	0,662	72,603	28,122	-27,615	-	-	-
3	246,504	0,104	0,184	-0,245	-0,070	74,137	0,662	68,387	26,215	-23,866	-	-1,584	-
4	264,006	0,122	-	-0,267	0,412	78,543	0,621	83,936	-	-24,639	-	9,733	-
5	271,561	0,119	-	-0,218	-	79,197	0,614	82,775	-	-22,532	-	-	-
6	345,562	0,189	-	-0,163	-	158,701	0,596	73,669	-	-9,400	-	-	-
7	352,156	0,266	-	-0,159	-	243,013	0,622	77,043	-	-6,813	-	-	-
8	0	0,190	-	-	-	129,444	-0,030	-	-	-	-	-	-
9	0	0,276	-	-	-	201,289	0,351	-	-	-	-	-	-
10	0	0,344	-	-	-	273,078	0,522	-	-	-	-	-	-

Nichtlineare Regression						
Ansatz	Parameter			Standard-schätzfehler	Bestimmtheitsmaß	Ansatz
Nr.	a	b	c	s _{xy}	B	Nr.
11	-0,420·10 ⁻⁴	0,326	-	80,985	0,597	14
12	-0,426·10 ⁻⁴	0,433	-	153,881	0,621	15
13	-0,354·10 ⁻⁴	0,490	-	237,275	0,639	16
						Parameter
						a
						b
						c
						Standard-schätzfehler
						s _{xy}
						Bestimmtheitsmaß
						B

Ergebnisse der Regressionsrechnungen
 AS Friedberg (Einfahrttyp E 1), dreistreifige Hauptfahrbahn

Lineare Einfach- und Mehrfachregression												
Ansatz	Konstante	Regressionskoeffizienten der Variablen				Standard-schätzfehler	Bestimmtheitsmaß	Signifikanztest für die Regressionskoeffizienten				
		X ₁ : q _H	X ₂ : q _{H, Lkw}	X ₃ : q _E	X ₄ : q _{E, Lkw}			X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	
Nr.	a	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	s _{x,y}	B	\hat{t}_1	\hat{t}_2	\hat{t}_3	\hat{t}_4	
1	23,917	0,174	0,121	-	-	118,520	0,720	44,363	6,868	-	-	
2	25,758	0,172	0,110	0,047	-	118,466	0,720	41,894	5,693	1,409	-	
3	30,493	0,169	0,154	0,085	-0,623	117,746	0,724	40,533	6,858	2,470	-3,776	
4	38,542	0,178	-	0,127	-0,029	120,227	0,712	43,973	-	3,670	-0,203	
5	38,087	0,178	-	0,124	-	120,173	0,712	44,049	-	4,039	-	
6	31,264	0,230	-	0,476	-	188,571	0,721	38,915	-	10,735	-	
7	-89,562	0,300	-	0,671	-	275,298	0,733	37,885	-	11,359	-	
8	0	0,194	-	-	-	121,294	0,706	-	-	-	-	
9	0	0,265	-	-	-	198,187	0,692	-	-	-	-	
10	0	0,324	-	-	-	293,056	0,697	-	-	-	-	
Nichtlineare Regression												
Ansatz	Parameter			Standard-schätzfehler	Bestimmtheitsmaß	Ansatz	Parameter			Standard-schätzfehler	Bestimmtheitsmaß	
	a	b	c				a	b	c			
Nr.	a	b	c	s _{x,y}	B	Nr.	a	b	c	s _{x,y}	B	
11	0,214·10 ⁵	0,185	-	121,159	0,707	14	0,810·10 ⁸	-0,663·10 ⁻⁴	0,325	117,297	0,725	
12	0,235·10 ⁵	0,253	-	198,068	0,692	15	0,262·10 ⁸	-0,224·10 ⁻⁴	0,310	197,682	0,694	
13	0,104·10 ⁴	0,267	-	288,899	0,706	16	-0,123·10 ⁸	0,232·10 ⁻⁴	0,234	288,898	0,706	

Ergebnisse der Regressionsrechnungen
AS Garching-Süd (Einfahrttyp E 1), dreistreifige Hauptfahrbahn

Anhang 7.20

Lineare Einfach- und Mehrfachregression													
Ansatz	Konstante	Regressionskoeffizienten der Variablen				Standard-schätzfehler	Bestimmtheitsmaß	Signifikanztest für die Regressionskoeffizienten					
		X ₁ : q _H	X ₂ : q _{H, LKW}	X ₃ : q _E	X ₄ : q _{E, LKW}			X ₁	X ₂	X ₃	X ₄		
Nr.	a	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	s _{xy}	B	\hat{t}_1	\hat{t}_2	\hat{t}_3	\hat{t}_4		
1	333,766	0,196	-0,125	-	-	81,094	0,679	40,706	-4,237	-	-	-	-
2	342,837	0,196	-0,114	-0,032	-	81,048	0,679	40,521	-3,707	-1,488	-	-	-
3	339,620	0,194	-0,066	0,006	-0,309	80,659	0,683	40,237	-1,978	0,245	-3,387	-	-
4	340,200	0,189	-	0,005	-0,384	80,767	0,682	47,778	-	0,213	-4,624	-	-
5	345,656	0,185	-	-0,052	-	81,524	0,675	47,374	-	-2,523	-	-	-
6	317,439	0,255	-	0,075	-	94,110	0,790	61,848	-	3,639	-	-	-
7	273,847	0,323	-	0,165	-	122,803	0,818	65,367	-	7,235	-	-	-
8	0	0,379	-	-	-	158,840	-0,235	-	-	-	-	-	-
9	0	0,439	-	-	-	168,382	0,325	-	-	-	-	-	-
10	0	0,489	-	-	-	183,775	0,592	-	-	-	-	-	-

Nichtlineare Regression						
Ansatz	Parameter			Standard-schätzfehler	Bestimmtheitsmaß	Ansatz
Nr.	a	b	c	s _{xy}	B	Nr.
11	-0,131·10 ⁻³	0,635	-	89,643	0,607	14
12	-0,118·10 ⁻³	0,692	-	92,730	0,796	15
13	-0,101·10 ⁻³	0,729	-	115,583	0,839	16

Ergebnisse der Regressionsrechnungen
 AS Oberschleißheim (Einfahrttyp E 1), zweistreifige Hauptfahrbahn

Lineare Einfach- und Mehrfachregression												
Ansatz	Konstante	Regressionskoeffizienten der Variablen				Standard-schätzfehler	Bestimmtheitsmaß	Signifikanztest für die Regressionskoeffizienten				
		X ₁ : q _H	X ₂ : q _{H, Lkw}	X ₃ : q _E	X ₄ : q _{E, Lkw}			X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	
Nr.	a	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	s _{x,y}	B	\hat{t}_1	\hat{t}_2	\hat{t}_3	\hat{t}_4	
1	191,374	0,101	0,316	-	-	49,774	0,581	33,906	20,281	-	-	
2	204,386	0,117	0,298	-0,045	-	48,997	0,594	31,887	19,138	-7,433	-	
3	202,067	0,120	0,287	-0,051	0,042	48,972	0,595	30,599	17,058	-7,172	1,659	
4	230,591	0,150	-	-0,092	0,205	52,991	0,525	39,911	-	-12,536	8,184	
5	250,122	0,144	-	-0,064	-	54,011	0,506	38,327	-	-9,664	-	
6	329,368	0,219	-	-0,091	-	91,997	0,501	38,988	-	-9,574	-	
7	349,941	0,301	-	-0,101	-	132,455	0,539	42,432	-	-8,751	-	
8	0	0,267	-	-	-	85,971	-0,253	-	-	-	-	
9	0	0,351	-	-	-	122,539	0,114	-	-	-	-	
10	0	0,415	-	-	-	155,691	0,363	-	-	-	-	
Nichtlineare Regression												
Ansatz	Parameter			Standard-schätzfehler	Bestimmtheitsmaß	Ansatz	Parameter			Standard-schätzfehler	Bestimmtheitsmaß	
Nr.	a	b	c	s _{x,y}	B	Nr.	a	b	c	s _{x,y}	B	
11	-0,981·10 ⁻⁴	0,438	-	54,863	0,490	14	0,362·10 ⁻⁷	-0,225·10 ⁻³	0,543	53,376	0,518	
12	-0,951·10 ⁻⁴	0,539	-	93,277	0,487	15	0,325·10 ⁻⁷	-0,226·10 ⁻³	0,663	91,868	0,503	
13	-0,738·10 ⁻⁴	0,580	-	135,336	0,519	16	0,307·10 ⁻⁷	-0,214·10 ⁻³	0,733	133,338	0,533	

Ergebnisse der Regressionsrechnungen
 Viernheimer Dreieck (Einfahrttyp E 2), dreistreifige Hauptfahrbahn

Anhang 7.22

Lineare Einfach- und Mehrfachregression												
Ansatz	Konstante	Regressionskoeffizienten der Variablen				Standard-schätzfehler	Bestimmtheitsmaß	Signifikanztest für die Regressionskoeffizienten				
		X ₁ : q _H	X ₂ : q _{H, LKW}	X ₃ : q _E	X ₄ : q _{E, LKW}			X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	
Nr.	a	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	s _{xy}	B	\hat{t}_1	\hat{t}_2	\hat{t}_3	\hat{t}_4	
1	206,172	0,111	0,124	-	-	91,565	0,709	103,193	19,131	-	-	
2	218,443	0,111	0,122	-0,032	-	91,196	0,712	103,309	18,936	-8,308	-	
3	210,280	0,118	0,098	-0,109	0,437	90,000	0,719	101,150	14,875	-17,097	15,018	
4	220,814	0,129	-	-0,130	0,544	91,173	0,712	139,130	-	-20,576	19,050	
5	235,130	0,123	-	-0,034	-	93,118	0,699	138,703	-	-8,726	-	
6	304,979	0,193	-	-0,026	-	158,664	0,706	140,752	-	-4,605	-	
7	312,579	0,263	-	-0,002	-	237,146	0,710	142,022	-	-0,222	-	
8	0	0,196	-	-	-	131,450	0,401	-	-	-	-	
9	0	0,278	-	-	-	197,786	0,543	-	-	-	-	
10	0	0,343	-	-	-	267,323	0,631	-	-	-	-	

Nichtlineare Regression						
Ansatz	Parameter			Standard-schätzfehler	Bestimmtheitsmaß	Ansatz
	a	b	c			
Nr.	a	b	c	s _{xy}	B	Nr.
11	-0,253·10 ⁻⁴	0,284	-	107,506	0,599	14
12	-0,286·10 ⁻⁴	0,390	-	166,590	0,676	15
13	-0,250·10 ⁻⁴	0,452	-	241,116	0,631	16

Ergebnisse der Regressionsrechnungen
 Einfahrttyp E 1 / E 2, dreistreifige Hauptfahrbahn gesamt

Lebenslauf

Angaben zur Person:

Name: Wiebke Dammann
Adresse: Freytagstr. 20
30169 Hannover
Telefon: 0511 / 8076939
Geburtsdatum: 17.03.1973
Geburtsort: Stade

Berufserfahrung:

seit 05/2000 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau der Universität Hannover
08/1994 – 09/1994 Bauzeichnerin im Ingenieurbüro Klaus Galla, Horneburg (Niederelbe)

Schul- und Berufsbildung:

10/1994 – 04/2000 Studium des Bauingenieurwesens mit der Vertiefungsrichtung Verkehrswesen an der Universität Hannover
Abschluss: Diplom
08/1992 – 07/1994 Ausbildung zur Bauzeichnerin in der Fachrichtung Tief-, Straßen- und Landschaftsbau im Ingenieurbüro Klaus Galla, Horneburg (Niederelbe)
Abschluss: Gesellenprüfung
08/1985 – 06/1992 Gymnasium Athenaeum Stade
Abschluss: Abitur

Studienbegleitende Tätigkeiten:

10/1999 – 12/1999 Auslandsaufenthalt an der University of Nottingham, School of Civil Engineering, Großbritannien
01/1997 – 12/1999 Wissenschaftliche Hilfskraft am Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau der Universität Hannover