

Vierstreifige Richtungsfahrbahnen – Verkehrsablauf, Verkehrssicherheit und Gestaltung

Dr.-Ing. Justin Geistefeldt

Lehrstuhl für Verkehrswesen
Ruhr-Universität Bochum
Universitätsstr. 150, 44801 Bochum
Tel.: 0234 / 32-28571, Fax: 0234 / 32-14151
E-Mail: justin.geistefeldt@rub.de

Autobahnen mit vierstreifigen Richtungsfahrbahnen sind in Deutschland bislang noch wenig verbreitet. Durch die steigende Verkehrsbelastung auf Bundesautobahnen gewinnt der vierstreifige Ausbau von Richtungsfahrbahnen jedoch zunehmend an Bedeutung. Im Rahmen eines Forschungsprojekts im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen wurden vierstreifige Richtungsfahrbahnen erstmals umfassend hinsichtlich des Verkehrsablaufs, der Verkehrssicherheit und der Entwurfsgestaltung untersucht. Vorhandene Kenntnisse aus dem In- und Ausland wurden zusammengetragen und durch umfangreiche empirische Untersuchungen erweitert. Die verkehrstechnische Analyse ergab, dass vierstreifige Richtungsfahrbahnen eine leistungsfähige und relativ sichere Ausbauf orm darstellen. Der Verkehrsablauf auf Abschnitten außerhalb der Knotenpunkte ist durch ein hohes Geschwindigkeitsniveau und eine geringe Auslastung des rechten Fahrstreifens bei hohen Verkehrsstärken gekennzeichnet. In der Nähe von Knotenpunkten verteilt sich der Verkehr gleichmäßiger über die vier Fahrstreifen, da sich ausfahrende Fahrzeuge in der Regel frühzeitig rechts einordnen. Aus entwurfstechnischer Sicht ergeben sich aus der Breite vierstreifiger Fahrbahnen besondere Anforderungen an die Straßenflächenentwässerung. Aus Gründen der Verkehrssicherheit und des Straßenbetriebs wird empfohlen, Autobahnen mit vierstreifigen Richtungsfahrbahnen generell mit Verkehrsbeeinflussungsanlagen auszurüsten.

1 Einleitung

Autobahnen mit vierstreifigen Richtungsfahrbahnen sind in Deutschland bislang noch wenig verbreitet. Vor dem Hintergrund steigender Verkehrsbelastungen auf Bundesautobahnen gewinnt der vierstreifige Ausbau von Richtungsfahrbahnen jedoch zunehmend an Bedeutung. Im Bundesverkehrswegeplan 2003 [1] ist für Abschnitte mit einer Gesamtlänge von etwa 130 km im vordringlichen Bedarf und 270 km im weiteren Bedarf ein Ausbau auf vier Fahrstreifen pro Richtung vorgesehen. Für die Umsetzung dieser Ausbauprojekte sind entsprechende Planungsgrundlagen erforderlich. Im Rahmen eines Forschungsprojekts im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen [2] wurden Autobahnen mit vierstreifigen Richtungsfahrbahnen erstmals umfassend hinsichtlich des Verkehrsablaufs, der Verkehrssicherheit und der Entwurfstechnik untersucht. Die wesentlichen Ergebnisse dieses Forschungsprojekts, teilweise ergänzt durch Auswertungen neuerer Daten, sind Gegenstand des vorliegenden Beitrags.

Ziel der Untersuchungen war es einerseits, die bislang fehlenden Angaben zu Autobahnen mit vierstreifigen Richtungsfahrbahnen im deutschen Regelwerk zu ergänzen. Andererseits sollte geklärt werden, inwieweit sich aus der Breite vierstreifiger Richtungsfahrbahnen besondere Anforderungen an den Entwurf, die verkehrstechnische Bemessung und den Betrieb solcher Autobahnen ergeben.

2 Kenntnis- und Erfahrungsstand

Erfahrungen mit vierstreifigen Richtungsfahrbahnen im In- und Ausland wurden durch eine Analyse von Literaturquellen und Entwurfsrichtlinien, durch Gespräche mit Vertretern von Straßenbauverwaltungen sowie durch die Dokumentation bestehender Streckenabschnitte erhoben. Besonderes Augenmerk galt dabei den Erfahrungen aus dem Ausland. Diesbezüglich konnten insbesondere in den USA und den Niederlanden umfangreiche Erkenntnisse gewonnen werden.

Die USA verfügen über langjährige Erfahrungen mit vierstreifigen Richtungsfahrbahnen. In Ballungsräumen sind Autobahnen mit teilweise bis zu sieben Fahrstreifen pro Richtung in Betrieb. Hier werden häufig einzelne Fahrstreifen als „High-Occupancy Vehicle Lanes“ gewidmet, d.h. die Benutzung ist nur für Fahrzeuge mit mehreren (in der Regel mindestens zwei) Insassen zugelassen. Ein typisches Merkmal von Autobahnen in den USA ist die Verknüpfung dicht aufeinander folgender Anschlussstellen mit durchgehenden Verflechtungsfahrstreifen (sog. „Auxiliary Lanes“). Auf Streckenabschnitten in Ballungsräumen werden z.T. getrennte Fahrbahnen für den Regional- und Fernverkehr angeordnet. Der Rechtzeitigkeit der Wegweisung wird insbesondere auf Abschnitten mit dicht aufeinander folgenden Knotenpunkten eine erhebliche Bedeutung für den Verkehrsablauf beigemessen. Eine frühzeitige Wegweisung wird z.B. durch eine gemeinsame Ankündigung mehrerer aufeinander folgender Anschlussstellen realisiert.

Autobahnen mit vierstreifigen Richtungsfahrbahnen im Ausland verfügen teilweise auch auf der linken Fahrbahnseite über einen vollwertigen Standstreifen. Dadurch besteht für Verkehrsteilnehmer auf den linken Fahrstreifen bei Pannen oder Unfällen die Möglichkeit, nach links auf den Standstreifen auszuweichen, ohne den fließenden Verkehr auf der gesamten Fahrbahn kreuzen zu müssen. In den USA ist in den Richtlinien für den Straßenentwurf [3] ein Standstreifen auf der linken Fahrbahnseite für Autobahnen mit mindestens drei Fahrstreifen pro Richtung vorgesehen. Bei beengten Platzverhältnissen oder aus wirtschaftlichen Gründen wird jedoch beim Ausbau von Autobahnen häufig auf die Anordnung eines Standstreifens auf der linken Fahrbahnseite verzichtet. Auch die früheren Entwurfsrichtlinien in den Niederlanden [4] sahen für Autobahnen mit vierstreifigen Richtungsfahrbahnen einen Standstreifen auf der linken Seite vor. Erfahrungen haben jedoch gezeigt, dass dieser Standstreifen nur sehr selten durch Pannenfahrzeuge genutzt wird. Daher wird in den Nachfolgerichtlinien [5] auf die Empfehlung zur Anordnung eines Standstreifens auf der linken Seite verzichtet.

In den Niederlanden werden an hoch belasteten Autobahnen generell Verkehrsbeeinflussungsanlagen zur verkehrsabhängigen Geschwindigkeitsregelung und zur Absicherung von Gefahrenstellen eingesetzt. Alle vierstreifigen Richtungsfahrbahnen sind dementsprechend mit Verkehrsbeeinflussungsanlagen ausgestattet. Teilweise werden die Steuerungseinrichtungen auch für die temporäre Freigabe des linken Fahrstreifens oder des Standstreifens eingesetzt.

3 Verkehrsablauf

3.1 Datengrundlage

Für die empirische Analyse des Verkehrsablaufs auf Autobahnen mit vierstreifigen Richtungsfahrbahnen wurden umfangreiche Daten von Dauerzählstellen ausgewertet. Die Verkehrsdaten wurden von der Verkehrszentrale Hessen und der Autobahndirektion Südbayern bereitgestellt. Die Messquerschnitte befinden sich im Zuge der achtstreifig ausgebauten Abschnitte der Autobahnen A 3 und A 5 in Hessen und der Autobahn A 8 in Bayern. Aus den verfügbaren Datensätzen wurden die Querschnitte ausgewählt, die hinsichtlich ihrer Lage und ihrer verkehrlichen Randbedingungen für die Analyse des q-v-Diagramms, der Kapazität und der Fahrstreifenaufteilung auf vierstreifigen Richtungsfahrbahnen geeignet waren.

Für die mikroskopische Analyse des Fahrverhaltens der Verkehrsteilnehmer wurden darüber hinaus mehrere Verkehrsmessungen an der Autobahn A 5 zwischen Frankfurt/Main und Darmstadt durchgeführt. Anhand von Videoaufzeichnungen des Verkehrsablaufs wurden das Geschwindigkeits- und Abstandsverhalten auf der freien Strecke sowie die Ein- und Ausfahrstrategien der Verkehrsteilnehmer an Knotenpunkten analysiert. Für die Messungen wurden die folgenden Standorte ausgewählt:

- freie Strecke in Höhe der Ortschaft Gräfenhausen,
- nördliche Ein- und Ausfahrt der Anschlussstelle Langen/Mörfelden,
- nördliche Ein- und Ausfahrt des Frankfurter Kreuzes.

Auf der freien Strecke wurden die Fahrzeugabstände und die Geschwindigkeiten der Einzelfahrzeuge durch eine quasi-lokale Messung ermittelt. Im Bereich der Knotenpunkte wurde das Fahrstreifenwechselverhalten der ein- und ausfahrenden Verkehrsteilnehmer mittels Fahrzeugverfolgung auf dem Videobild analysiert. Zudem wurde die Fahrstreifenaufteilung auf der Hauptfahrbahn an charakteristischen Punkten erfasst. Die Dauer der Messungen betrug zwischen 1,5 und 3 Stunden. Alle Verkehrsmessungen wurden an Werktagen im Bereich von Verkehrsspitzen durchgeführt.

3.2 q-v-Diagramm und Kapazität

Die Analyse des Zusammenhangs zwischen der Verkehrsstärke q und der mittleren momentanen Pkw-Geschwindigkeit v auf vierstreifigen Richtungsfahrbahnen erfolgte mit dem Ziel, Kapazitätswerte und q-v-Diagramme für die Fortschreibung des HBS 2001 [6] zu entwickeln. Dazu wurden Verkehrsstärken und Geschwindigkeiten in Stunden-Intervallen ausgewertet. Messwerte von Tagen mit Niederschlag wurden nicht in die Analyse einbezogen. Um den Einfluss des Schwerverkehrs zu erfassen, wurden für die Auswertung nur Intervalle mit einem Schwerverkehrsanteil zwischen 5 und 15 % berücksichtigt. Die Ergebnisse gelten damit für einen Schwerverkehrsanteil von etwa 10 %. Für geringere und höhere Schwerverkehrsanteile war die Spannweite der Verkehrsstärken nicht ausreichend, um aussagekräftige Zusammenhänge zu ermitteln.

Für die Modellierung der q-v-Beziehung im fließenden Verkehr wurde das Warteschlangenmodell nach BRILON, PONZLET [7] verwendet, das auch den q-v-Diagrammen des HBS 2001 [6] zugrunde liegt. Die Modellfunktion lautet:

$$v(q) = \frac{v_0}{1 + \frac{v_0}{L_0 \cdot (C_0 - q)}} \quad (1)$$

mit $L_0, v_0, C_0 =$ Modellparameter

Die Kapazität einer Straße ist definiert als die „größte Verkehrsstärke, die ein Verkehrsstrom bei gegebenen Weg- und Verkehrsbedingungen an dem für ihn bestimmten Querschnitt erreichen kann“ [8]. Bei der Beschreibung des Verkehrsablaufs durch ein Verkehrsflussmodell entspricht die Kapazität der Verkehrsstärke im Bereich des Scheitelpunkts der q-v-Kurve. Für die Ermittlung der Kapazität wird daher ein Modell benötigt, mit dem das q-v-Diagramm durch einen durchgehenden Kurvenzug beschrieben wird. Das Verkehrsflussmodell von VAN AERDE [9] ist der einzige derzeit bekannte Ansatz, mit dem eine akzeptable Beschreibung sämtlicher auftretender Verkehrszustände durch einen durchgehenden Kurvenzug gelingt. Der Ansatz basiert auf einem einfachen Fahrzeugfolgemodell. Die k(v)-Funktion dieses Verkehrsflussmodells lautet:

$$k(v) = \frac{1}{c_1 + \frac{c_2}{v_0 - v} + c_3 \cdot v} \quad (2)$$

mit v_0 = mittlere momentane Geschwindigkeit im freiem Verkehr
 c_1, c_2, c_3 = Modellparameter

Die Parameter v_0, c_1, c_2 und c_3 können durch nicht-lineare Regression in der k-v-Ebene ermittelt werden.

Bei einer Betrachtung längerer Intervalldauern resultieren die Wertepaare im q-v-Diagramm z.T. aus einer Aggregation verschiedener Einzelzustände. Vor allem im Übergangsbereich zwischen fließendem und gestautem Verkehr können einzelne Wertepaare einen Verkehrszustand repräsentieren, der in der Realität nie existiert hat. Da diese instationären Werte den Verlauf und insbesondere die Lage des Scheitelpunkts der angepassten Modellfunktion von VAN AERDE [9] erheblich beeinflussen können, wurden diese Übergangswerte bei der Modellanpassung nicht berücksichtigt. Als Kriterium für Instationarität wurde die Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung der Geschwindigkeiten in den 12 einzelnen 5-Minuten-Intervallen vom zugehörigen Stundenwert der Geschwindigkeit verwendet, der Grenzwert wurde auf 10 km/h festgelegt.

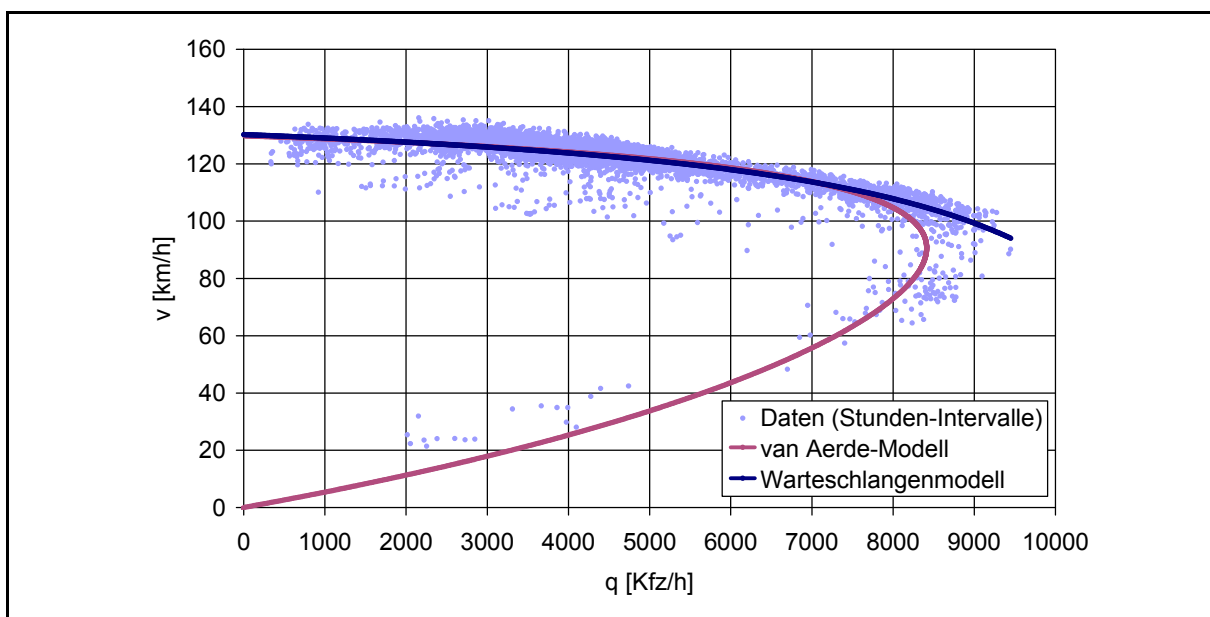


Bild 1: q-v-Diagramm und angepasste Modellfunktionen für den Querschnitt A5/29FKN an der Autobahn A 5 zwischen Frankfurter Kreuz und Anschlussstelle Frankfurt-Niederrad (Stunden-Intervalle, Verkehrsdaten der Jahre 2005 bis 2006)

Als Beispiel zeigt Bild 1 das q-v-Diagramm (Stunden-Intervalle) des Querschnitts A5/29FKN an der Autobahn A 5 zwischen Frankfurter Kreuz und Anschlussstelle Frankfurt-Niederrad. Mit einem DTV von rund 150.000 Kfz/Tag handelt es sich um einen der höchst belasteten Streckenabschnitte des deutschen Autobahnnetzes. Die Anpassung des Verkehrsflussmodells von VAN AERDE [9] ergibt eine Kapazität von 8.414 Kfz/h. In einzelnen Stunden werden im fließenden Verkehr sogar Verkehrsstärken von über 9.000 Kfz/h erreicht. Dies verdeutlicht die sehr hohe Kapazität der vierstreifigen Richtungsfahrbahn.

Neben der konventionellen Ermittlung der Kapazität im q-v-Diagramm wurde auch die stochastische Methode nach BRILON, ZURLINDEN [10] zur Einschätzung der Kapazität angewandt. Die Kapazität wird dabei nicht als Konstante, sondern als Weibull-verteilte Zufallsgröße aufgefasst. Die Verteilungsfunktion der Kapazität entspricht der Wahrscheinlichkeit eines Zusammenbruchs des Verkehrsflusses in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke. Die stochastische Kapazitätsanalyse erfolgte auf der Grundlage von 5-Minuten-Intervallen. Für den Querschnitt A5/29FKN wurde die in Bild 2 dargestellte Verteilungsfunktion der Kapazität mit einem Medianwert von 10.388 Kfz/h ermittelt. Demnach tritt bei einer Verkehrsstärke von 10.388 Kfz/h in einem 5-Minuten-Intervall mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 % ein Zusammenbruch des Verkehrsflusses ein. Der im q-v-Diagramm ermittelte Kapazitätswert in Stunden-Intervallen (8.414 Kfz/h, vgl. Bild 1) entspricht etwa dem 2. Perzentil der Verteilungsfunktion der Kapazität in 5-Minuten-Intervallen.

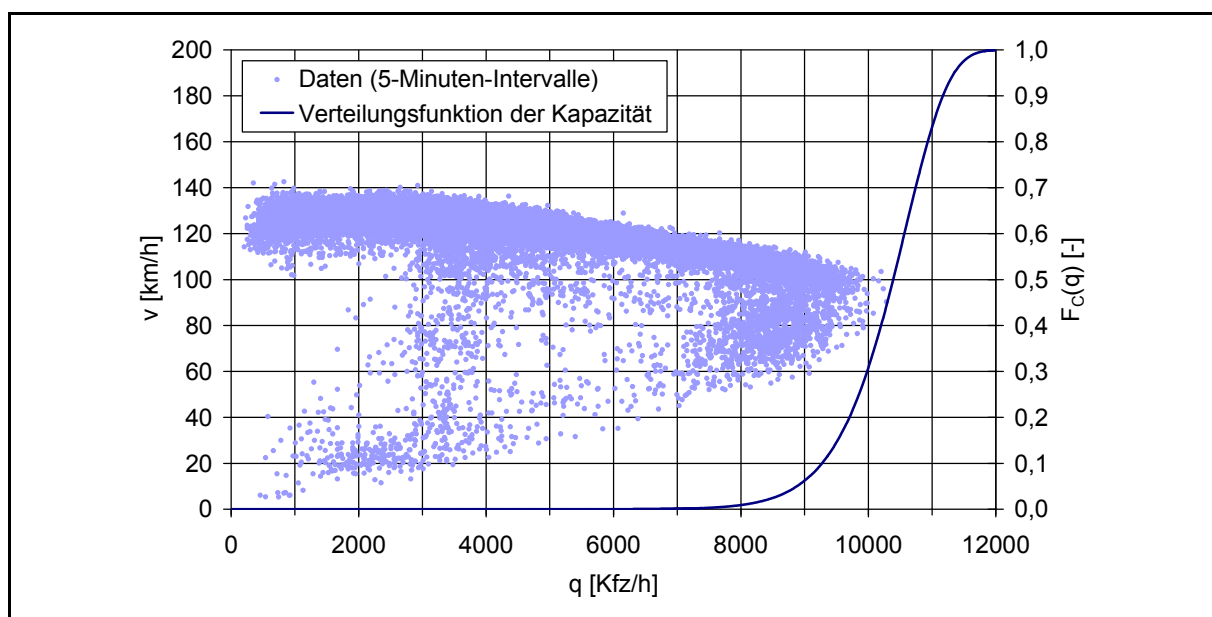


Bild 2: q-v-Diagramm und Verteilungsfunktion der Kapazität für den Querschnitt A5/29FKN an der Autobahn A 5 zwischen Frankfurter Kreuz und Anschlussstelle Frankfurt-Niederrad (5-Minuten-Intervalle, Verkehrsdaten der Jahre 2005 bis 2006)

Bereits die Ergebnisse der Analyse einzelner vierstreifiger Querschnitte im Vergleich zu Kapazitäten dreistreifiger Richtungsfahrbahnen aus früheren Untersuchungen deuteten darauf hin, dass der vierte Fahrstreifen tendenziell zu einem überproportionalen Kapazitätszuwachs führt. Eine mögliche Ursache dafür ist, dass es auf vierstreifigen Fahrbahnen in geringerem Maße zu Interaktionen zwischen Pkw und Lkw kommt, weil die beiden linken Fahrstreifen ausschließlich vom Pkw-Verkehr genutzt werden und dadurch sehr hohe Verkehrsstärken erreichen. Ein direkter Vergleich der Kapazität drei- und vierstreifiger Richtungsfahrbahnen konnte für die Autobahn A 3 zwischen Hanau und Frankfurt durchgeführt werden. In diesem Bereich ist die Autobahn zunächst drei- und anschließend vierstreifig ausgebaut. Daher konnten in diesem Abschnitt zwei Querschnitte mit nahezu identischen Verkehrs-, Umfeld- und Steuerungsbedingungen gegenübergestellt werden. Das Ergebnis des Vergleichs ist in

Bild 3 dargestellt. Der Medianwert der Verteilungsfunktion der Kapazität des vierstreifigen Querschnitts beträgt 9.593 Kfz/h und liegt um 41,6 % über dem Medianwert der Verteilungsfunktion des dreistreifigen Querschnitts in Höhe von 6.773 Kfz/h. Dies bedeutet, dass die mittlere Kapazität pro Fahrstreifen beim vierstreifigen Querschnitt um etwa 6 % höher als beim dreistreifigen Querschnitt ist.

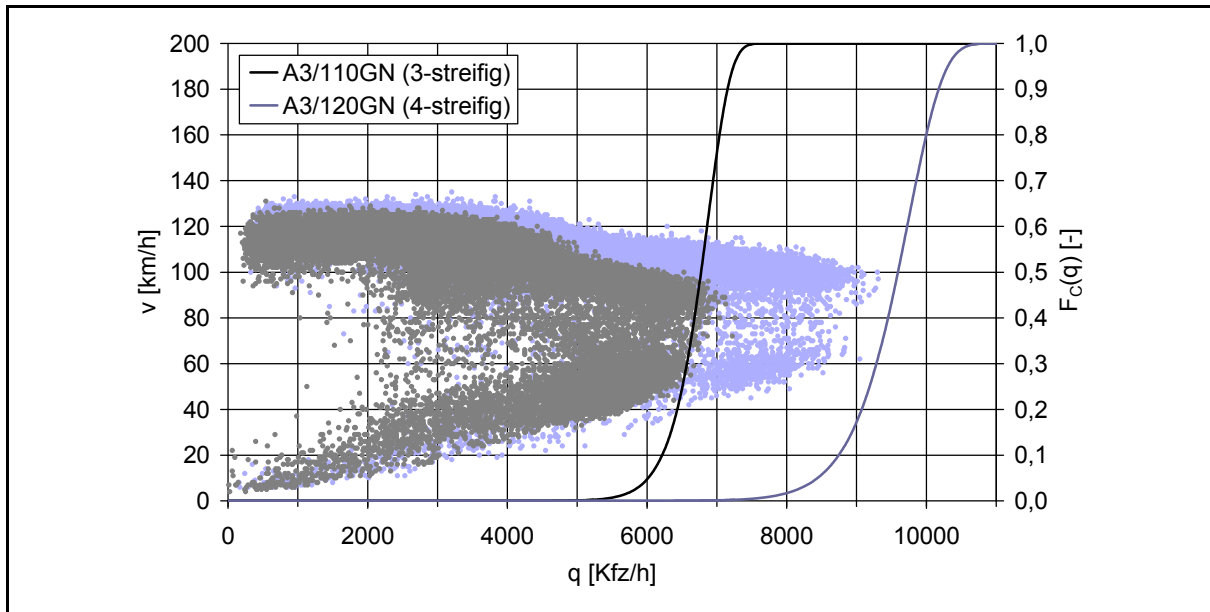


Bild 3: Vergleich der q-v-Diagramme und Kapazitätsverteilungen des dreistreifigen Querschnitts A3/110GN und des vierstreifigen Querschnitts A3/120GN im Zuge der Autobahn A 3 zwischen Hanau und Frankfurt/Main (5-Minuten-Intervalle, Verkehrsdaten der Jahre 2003 bis 2006)

Längsneigung	außerhalb von Ballungsräumen			innerhalb von Ballungsräumen		
	SV-Anteil			SV-Anteil		
	0 %	10 %	20 %	0 %	10 %	20 %
≤ 2 %	7.400	7.100	6.700	8.000	7.600	7.100
3 %	7.200	6.900	6.500	7.800	7.400	6.900
4 %	6.900	6.600	6.200	7.500	7.100	6.600
5 %	6.300	6.000	5.600	6.900	6.500	6.000

Tab. 1: Bemessungswerte der Kapazität [Kfz/h] für vierstreifige Richtungsfahrbahnen ohne Geschwindigkeitsbeschränkung

Tempolimit	SV-Anteil		
	0 %	10 %	20 %
T120	8.000	7.600	7.100
T100 / T80	8.200	7.800	7.300
SBA	8.200	7.800	7.300

Tab. 2: Bemessungswerte der Kapazität [Kfz/h] für vierstreifige Richtungsfahrbahnen mit Geschwindigkeitsbeschränkung oder Streckenbeeinflussungsanlage (Längsneigung s ≤ 2 %)

Aus den Ergebnissen der empirischen Analyse der q-v-Beziehung und der Kapazität vierstreifiger Richtungsfahrbahnen wurden Kapazitätswerte und q-v-Diagramme für die Fortschreibung des HBS [6] abgeleitet. Für Streckentypen, für die keine empirischen Daten verfügbar waren, erfolgte die Festlegung der Bemessungswerte unter Einbeziehung der Ergebnisse mikroskopischer Simulationsrechnungen mit dem Programm BABSIM [11]. Die Bemessungskapazitäten für vierstreifige Richtungsfahrbahnen sind in Tab. 1 für Abschnitte ohne Geschwindigkeitsbeschränkung sowie in Tab. 2 für Abschnitte mit Geschwindigkeitsbeschränkung oder Streckenbeeinflussungsanlage zusammengestellt.

3.3 Fahrstreifenaufteilung

Die Fahrstreifenaufteilung auf vierstreifigen Richtungsfahrbahnen wurde auf der Grundlage von Verkehrsdaten in 5-Minuten-Intervallen analysiert. Die Modellierung der Fahrstreifenaufteilung in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke des Gesamtquerschnitts erfolgte durch Bildung von Mittelwerten der Verkehrsstärkeanteile in Klassen der Breite 300 Kfz/h. Dabei wurden nur Intervalle im Zustand des fließenden Verkehrs einbezogen.

Die Aufbereitung der Verkehrsdaten von insgesamt 10 Dauerzählstellen sowie die Auswertungen der Verkehrsmessungen ergaben sehr spezifische Kurvenverläufe für die jeweiligen Querschnitte. Wesentliche Einflussfaktoren sind die Nähe zu Knotenpunkten sowie die Geschwindigkeitsregelung im Bereich der Messstelle. Im Bereich der freien Strecke ohne Geschwindigkeitsbeschränkung ist bei hohen Verkehrsstärken der linke Fahrstreifen mit einem Anteil von bis zu 40 % am stärksten belastet, wohingegen der rechte Fahrstreifen nur einen Verkehrsstärkeanteil von etwa 10 bis 15 % aufweist. Eine etwas höhere Auslastung des rechten Fahrstreifens bei hohen Verkehrsstärken ergibt sich auf Abschnitten mit stationärer Geschwindigkeitsbeschränkung oder Streckenbeeinflussungsanlage. In der Nähe von Knotenpunkten stellt sich dagegen in der Regel eine ausgeglichene Verteilung des Verkehrs auf die vier Fahrstreifen ein.

Bild 4 zeigt standardisierte Verläufe der Fahrstreifenaufteilung auf vierstreifigen Richtungsfahrbahnen außerhalb der Knotenpunkte ohne Geschwindigkeitsbeschränkung. Die Kurven wurden an die Mittelwerte der Fahrstreifenaufteilung von drei repräsentativen Querschnitten im Bereich der freien Strecke angepasst.

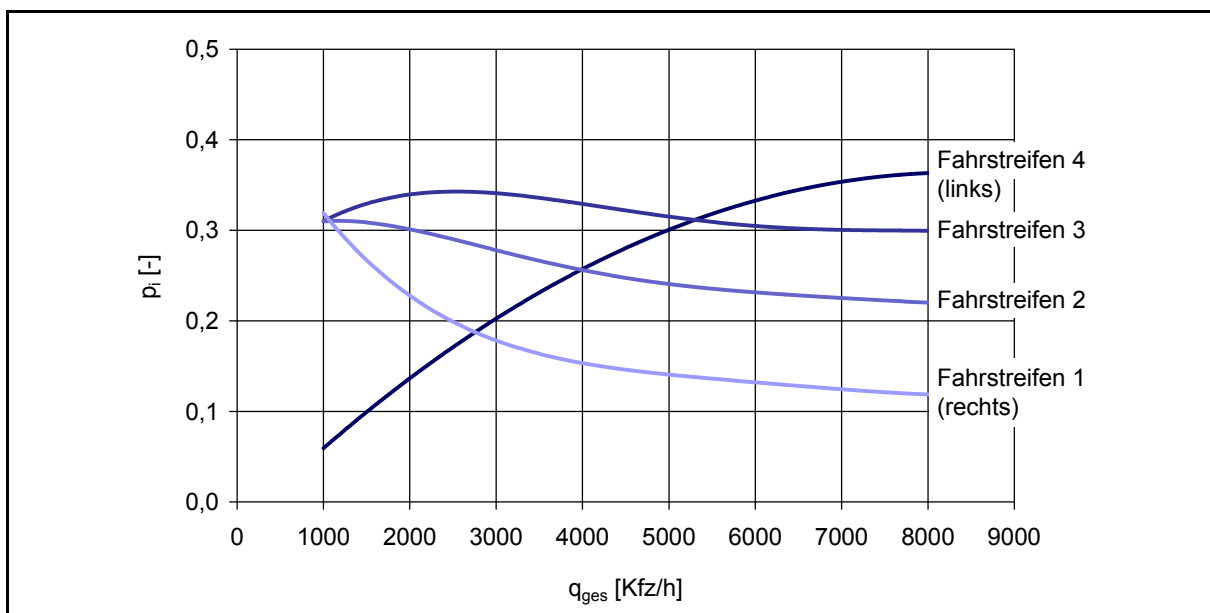


Bild 4: Fahrstreifenaufteilung auf vierstreifigen Richtungsfahrbahnen außerhalb der Knotenpunkte ohne Geschwindigkeitsbeschränkung

3.4 Geschwindigkeits- und Abstandsverhalten

Die Analyse des Geschwindigkeits- und Abstandsverhaltens der Verkehrsteilnehmer auf vierstreifigen Richtungsfahrbahnen außerhalb der Knotenpunkte erfolgte durch die Auswertung der Verkehrsmessung an der Autobahn A 5 in Höhe der Ortschaft Gräfenhausen in Fahrtrichtung Nord. Der Messstandort ist jeweils rund 2 km von der Tank- und Rastanlage Gräfenhausen im Norden und der Anschlussstelle Weiterstadt im Süden entfernt. Auf dem betrachteten Streckenabschnitt ist keine Geschwindigkeitsbeschränkung angeordnet. Während der dreistündigen Messung wurden in 5-Minuten-Intervallen Verkehrsstärken zwischen 3.468 und 7.800 Kfz/h gemessen. Dabei wurden ausschließlich Verkehrszustände im oberen Ast des q-v-Diagramms beobachtet.

Zur Beschreibung des Geschwindigkeitsverhaltens der Verkehrsteilnehmer auf vierstreifigen Richtungsfahrbahnen wurden Verteilungsfunktionen der Wunschgeschwindigkeit ermittelt. Die Wunschgeschwindigkeit v_w bezeichnet die Geschwindigkeit, die ein Fahrer auf ebener Strecke wählt, wenn er nicht durch andere Verkehrsteilnehmer beeinflusst wird. Für die Ermittlung der Verteilungsfunktionen der Wunschgeschwindigkeit wurde ein neuartiges Verfahren angewandt, das auf einer Unterscheidung zwischen zensierten und unzensierten Beobachtungen basiert (Details: siehe [12]). Zensierte Werte sind die Geschwindigkeiten der Fahrzeuge, bei denen aufgrund einer geringen Zeitlücke zum vorausfahrenden Fahrzeug und der fehlenden Überholmöglichkeit von einer Beeinflussung des Geschwindigkeitsverhaltens auszugehen ist. Die ermittelten Verteilungsfunktionen der Wunschgeschwindigkeit sind in Bild 5 den Verteilungen der gemessenen Geschwindigkeiten gegenübergestellt. Die mittlere Wunschgeschwindigkeit beträgt 160,2 km/h bei den Pkw und 91,6 km/h bei den Lkw. Die Gegenüberstellung zeigt, dass insbesondere die Verteilung der Wunschgeschwindigkeiten der Pkw-Fahrer deutlich über der Verteilung der gefahrenen Geschwindigkeiten liegt.

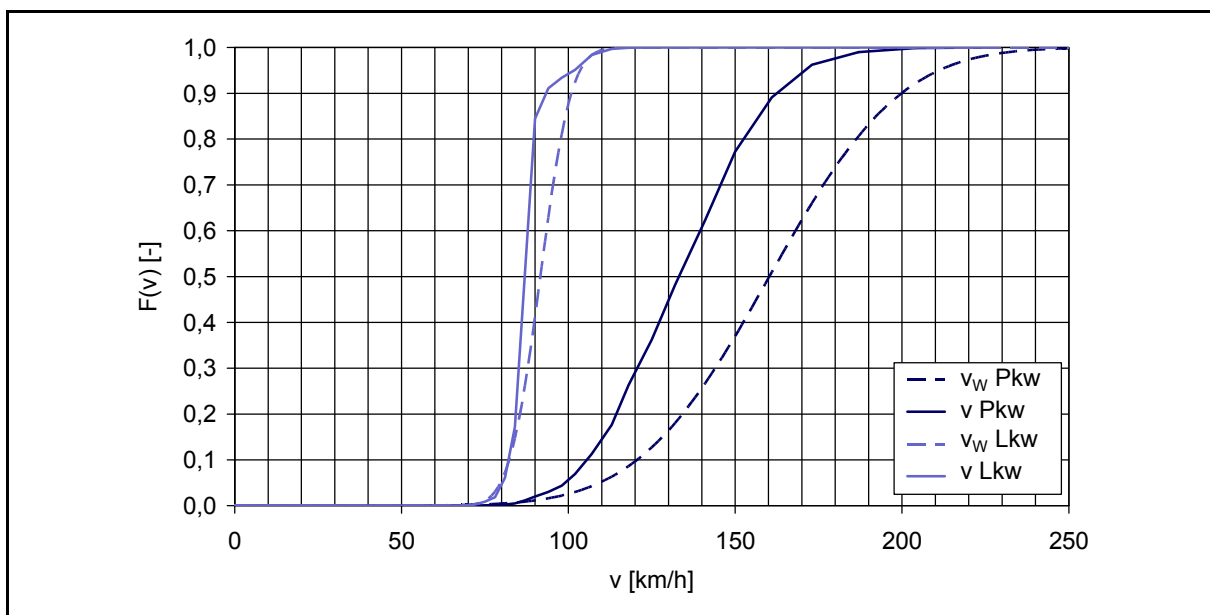


Bild 5: Verteilungsfunktionen der Geschwindigkeit v und der Wunschgeschwindigkeit v_w für Pkw und Lkw auf der Autobahn A 5 in Höhe der Ortschaft Gräfenhausen

Die Auswertung der Bruttozeitlücken zwischen Fahrzeugen, die auf demselben Fahrstreifen hintereinander fahren, ergab die in Bild 6 dargestellten Zeitlückenverteilungen für den Gesamtquerschnitt und die einzelnen Fahrstreifen der Richtungsfahrbahn. Die Verteilungen repräsentieren die mittleren Verkehrsverhältnisse während der Messung ohne eine Differenzierung nach der Verkehrsstärke. Mit insgesamt rund 60 % ist der Anteil der Bruttozeitlücken unter 2 Sekunden sehr hoch. Die Unterschiede zwischen den fahrbahnenbezogenen Zeit-

lückenverteilungen sind im Wesentlichen auf die unterschiedlichen Verkehrsstärken auf den einzelnen Fahrstreifen (vgl. Bild 4) zurückzuführen. Sehr geringe Abstände waren insbesondere auf dem linken Fahrstreifen zu beobachten, der bei mittleren und hohen Verkehrsstärken am stärksten belastet ist. In etwa 40 % der Fälle war hier die Bruttozeitlücke kleiner als 1 Sekunde, nur rund 23 % der gemessenen Zeitlücken waren größer als 2 Sekunden. Eine differenzierte Betrachtung der Folgevorgänge Pkw-Lkw, Lkw-Pkw und Lkw-Lkw ergab Kurvenverläufe, die mit der Gesamt-Zeitlückenverteilung des rechten Fahrstreifens vergleichbar sind.

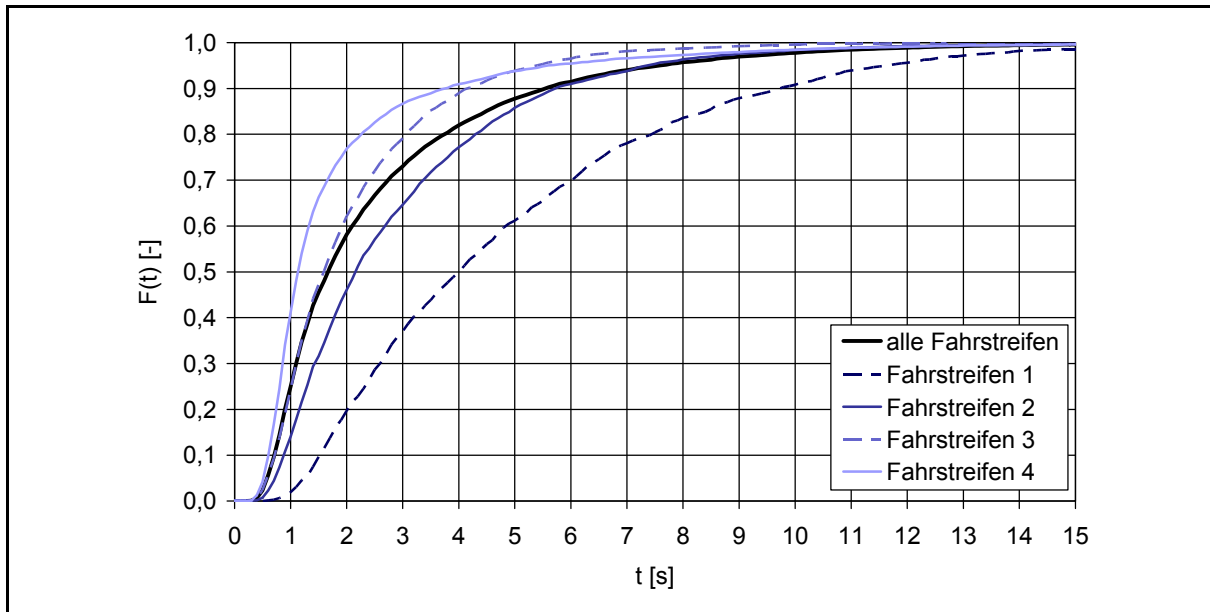


Bild 6: Zeitlückenverteilungen auf der Autobahn A 5 in Höhe der Ortschaft Gräfenhausen

3.5 Verkehrsablauf an Knotenpunkten

Im Mittelpunkt der empirischen Analyse des Verkehrsablaufs an Anschlussstellen und Autobahnknotenpunkten im Zuge vierstreifiger Richtungsfahrbahnen stand das Fahrstreifenwechselverhalten der ausfahrenden Verkehrsteilnehmer. Mit den Untersuchungen sollten in erster Linie Erkenntnisse hinsichtlich der Rechtzeitigkeit der Wegweisung gewonnen werden.

An der Ausfahrt der Anschlussstelle Langen/Mörfelden im Zuge der Autobahn A 5 in Fahrtrichtung Süd wurden alle ausfahrenden Verkehrsteilnehmer über eine Strecke von 900 m vor dem Beginn des Ausfädelungstreifens zurückverfolgt. Die Geometrie der Ausfahrt entspricht Typ A1 nach den RAA [13]. Die Auswertung ergab, dass 54 der insgesamt 56 zurückverfolgten Lkw und Busse bereits am Beginn des Erfassungsbereiches in 900 m Entfernung von der Ausfahrt auf dem rechten Fahrstreifen fuhren und bis zur Ausfahrt nicht mehr den Fahrstreifen wechselten. Für die insgesamt 1.236 erfassten Pkw und Motorräder ist in Bild 7 dargestellt, bis zu welcher Entfernung vom Beginn des Ausfädelungstreifens die Fahrzeuge letztmalig den vierten, dritten, zweiten und ersten Fahrstreifen befuhren. Für diese Auswertung wurden nur die jeweils letzten Fahrstreifenwechsel nach rechts innerhalb des Erfassungsbereiches berücksichtigt, weil Fahrstreifenwechsel nach links nicht mit der Absicht, die Autobahn an der Anschlussstelle zu verlassen, zusammenhängen. 38 % der ausfahrenden Fahrzeuge fuhren bereits am Beginn des Erfassungsbereiches in 900 m Entfernung von der Ausfahrt auf dem rechten Fahrstreifen und blieben dort bis zur Ausfahrt, wohingegen nur 4 % der Fahrzeuge noch den linken Fahrstreifen befuhren. Im Vergleich zur üblichen Fahrstreifenaufteilung auf vierstreifigen Richtungsfahrbahnen außerhalb der Knotenpunkte (vgl. Bild 4) bedeutet dies, dass sich die Mehrzahl der ausfahrenden Verkehrsteil-

nehmer sehr frühzeitig in Richtung der beiden rechten Fahrstreifen orientiert. Im Bereich des Vorwegweisers 500 m vor der Ausfahrt hatten 68 % der ausfahrenden Fahrzeuge endgültig den rechten Fahrstreifen erreicht. Rund 5 % der ausfahrenden Fahrzeuge wechselten dagegen erst unmittelbar an der Ausfahrt in einem Zug vom zweiten Fahrstreifen in den Ausfädelungstreifen.

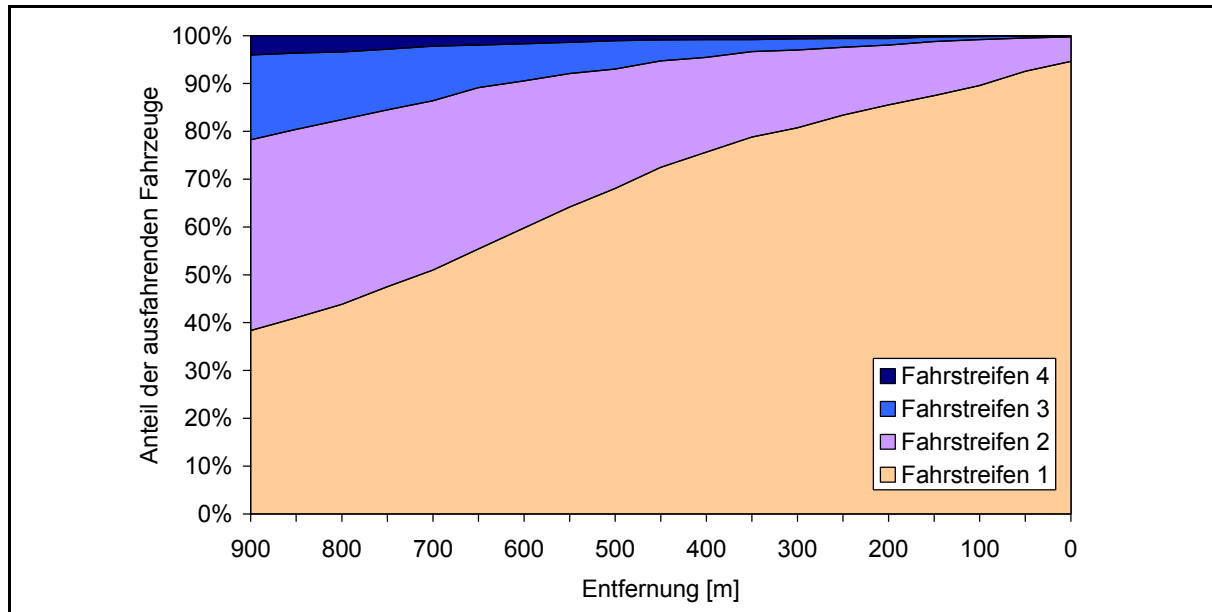


Bild 7: Anteil der ausfahrenden Pkw und Motorräder, die letztmalig vor der Ausfahrt den vierten, dritten, zweiten und ersten Fahrstreifen befahren, in Abhängigkeit von der Entfernung zum Beginn des Ausfädelungstreifens (Autobahn A 5, Anschlussstelle Langen/Mörfelden in Fahrtrichtung Süd)

Für die Analyse des Ausfahrverhaltens der Verkehrsteilnehmer an großen Knotenpunkten wurde der Verkehrsablauf vor der Ausfahrt am Frankfurter Kreuz im Zuge der Autobahn A 5 in Fahrtrichtung Süd betrachtet. In 1.200 m Entfernung von der Ausfädelung der Verteilerrahrbahn wird hier ein weiterer Fahrstreifen auf der rechten Fahrbahnseite addiert, so dass sich ein fünfstreifiger Sortierbereich ergibt (vgl. Skizze in Bild 8). Die drei linken (durchgehenden) Fahrstreifen des Sortierbereichs sind durch eine Breitstrichmarkierung von den rechten beiden Ausfädelungstreifen getrennt. Die Ausfahrt entspricht prinzipiell Typ A4 nach den RAA [13], die Länge des Sortierbereichs ist mit ca. 1.200 m allerdings deutlich größer als die Vorgabe in den Richtlinien. Der Autobahnknotenpunkt wird durch Ankündigungstafeln in 4.000 und 1.500 m Entfernung angekündigt, im Sortierbereich sind drei Portalwegweiser im Abstand von etwa 1.190, 690 und 190 m von der Trenninselspitze angeordnet.

Wegen der Länge des Sortierbereichs, der teilweisen Verdeckung von Fahrzeugen durch Lkw und der hohen Verkehrsstärken war eine Verfolgung sämtlicher Fahrzeuge über den gesamten Sortierbereich nicht möglich. Daher wurden stattdessen die Fahrstreifenaufteilung am Beginn und Ende des Sortierbereichs sowie die Häufigkeit der Fahrstreifenwechsel zwischen den Ausfädelungstreifen und der Durchgangsfahrbahn ausgewertet. Die Analyse der Fahrstreifenaufteilung ergab, dass der rechte Fahrstreifen vor dem Beginn des Sortierbereichs mit einem Verkehrsstärkeanteil von etwa 30 bis 35 % bei mittleren und hohen Verkehrsstärken am stärksten belastet ist. Dieser Bereich stellt demnach den maßgebenden Engpass vor der Ausfahrt dar. In Bild 8 ist die Häufigkeit der Fahrstreifenwechsel zwischen dem rechten Fahrstreifen der durchgehenden Fahrbahn und dem linken der beiden Ausfädelungstreifen in Abhängigkeit von der Entfernung von der Markierungsspitze der Ausfahrt angegeben. Fahrstreifenwechsel zwischen diesen beiden Fahrstreifen repräsentieren den Sortiervorgang zwischen der Durchgangsfahrbahn und der Ausfahrt. Die Häufigkeit der

Fahrstreifenwechsel nach rechts geht mit abnehmender Entfernung zur Markierungsspitze kontinuierlich zurück. Lediglich im Bereich des zweiten Portalwegweisers wird dieser Trend unterbrochen. Die Häufigkeit der Fahrstreifenwechsel nach links ist – auf wesentlich niedrigerem Niveau – ebenfalls am Beginn des Sortierraums am größten. Hinter der Markierungsspitze wurden während der Messung noch 18 Fahrstreifenwechsel nach rechts sowie 4 Fahrstreifenwechsel nach links beobachtet, bei denen Fahrzeuge verbotswidrig die durchgezogene Linie zwischen der Durchgangsfahrbahn und der Ausfahrt kreuzten.

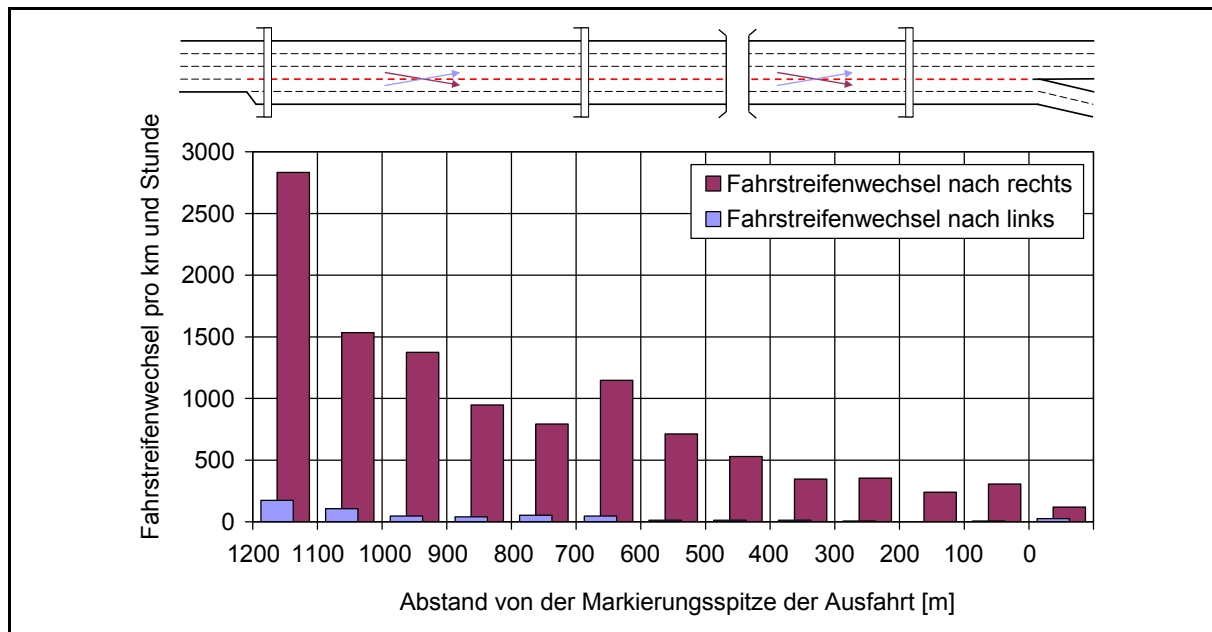


Bild 8: Häufigkeit der Fahrstreifenwechsel zwischen dem rechten durchgehenden Fahrstreifen und dem linken Ausfädelungstreifen in Abhängigkeit von der Entfernung zur Markierungsspitze der Fahrstreifenabstraktion (Ausfahrt der Autobahn A 5 am Frankfurter Kreuz in Fahrtrichtung Süd)

Aus der geringen Anzahl der Fahrstreifenwechsel vom Ausfädelungstreifen nach links auf die Durchgangsfahrbahn lässt sich ableiten, dass sich die meisten der durchfahrenden Verkehrsteilnehmer vor dem Beginn des Sortierbereichs auf den drei linken Fahrstreifen einordnen. Bemerkenswert ist insbesondere, dass etwa 90 % der durchfahrenden Lkw bereits vor dem Beginn des Sortierbereichs auf dem zweiten Fahrstreifen (von rechts) fahren. Demnach verfolgen die meisten Fahrer bei der Wahl ihres Fahrstreifens die Strategie, bereits weit vor dem Knotenpunkt einen für sie weiterführenden Fahrstreifen zu benutzen. Von besonderem Interesse für die Beurteilung des Verkehrsablaufs im Hinblick auf Anforderungen an die Rechtzeitigkeit der Wegweisung sind die Fahrzeuge, die erst unmittelbar vor der Fahrstreifenabstraktion auf den Ausfädelungstreifen wechseln. Die Auswertung der Videoaufzeichnungen ergab, dass unter diesen Fahrzeugen viele Taxis waren. Dies deutet darauf hin, dass vor allem ortskundige Fahrer erst spät auf die Ausfädelungstreifen wechseln. Demnach lassen sich keine Defizite hinsichtlich der Rechtzeitigkeit der Wegweisung ableiten.

4 Verkehrssicherheit

Die Verkehrssicherheit auf Autobahnen mit vierstreifigen Richtungsfahrbahnen wurde auf der Grundlage von Unfalldaten der Autobahn A 5 zwischen Westkreuz Frankfurt/Main und Darmstädter Kreuz untersucht. Mit einer Länge von 28,5 km handelt es sich um den einzigen Autobahnabschnitt in Deutschland, der über eine längere Strecke achtstreifig ausgebaut ist.

Grundlage für die Analyse des Unfallgeschehens bildeten die Unfälle mit Personenschaden der Jahre 2001 bis 2003. Dabei wurden ausschließlich die Unfälle auf der Hauptfahrbahn berücksichtigt. Um den Einfluss unterschiedlicher Streckencharakteristika auf das Unfallgeschehen zu erfassen, wurde die Untersuchungsstrecke in drei Teilabschnitte unterteilt:

- (1) Westkreuz Frankfurt/Main – AS Zeppelinheim: Abschnitt mit dichter Folge von Anschlussstellen und Autobahnknotenpunkten, DTV = ca. 150.000 Kfz/Tag.
- (2) AS Zeppelinheim – AS Weiterstadt: freie Strecke ohne Geschwindigkeitsbeschränkung mit großen Abständen zwischen den Anschlussstellen, DTV = ca. 120.000 Kfz/Tag.
- (3) AS Weiterstadt – Darmstädter Kreuz: Übergangsbereich zwischen der freien Strecke und zwei dicht aufeinander folgenden Autobahnknotenpunkten, DTV = ca. 110.000 Kfz/Tag.

Zu Vergleichszwecken wurden mittlere Unfallkenngrößen und Verteilungen der Unfallmerkmale für das gesamte deutsche Autobahnnetz aus der amtlichen Unfallstatistik [14, 15, 16] abgeleitet.

Auf der Autobahn A 5 zwischen Westkreuz Frankfurt/Main und Darmstädter Kreuz ereigneten sich im Untersuchungszeitraum 346 Unfälle mit Personenschaden, darunter 8 Unfälle mit Getöteten. In Tab. 3 sind die ermittelten Unfallkenngrößen für die einzelnen Abschnitte der Untersuchungsstrecke sowie die aus der amtlichen Unfallstatistik abgeleiteten Vergleichswerte für das gesamte deutsche Autobahnnetz angegeben. Die Berechnung der Unfallkosten erfolgte unter Verwendung der pauschalen Unfallkostensätze nach [17].

	Abschnitt	Untersuchungsstrecke der Autobahn A 5				alle Bundesautobahnen
		1 (Nord)	2 (Mitte)	3 (Süd)	gesamt	
Dichten	UD(P) [U/(km·a)]	4,96	3,59	3,85	4,05	2,06
	UD(SP) [U/(km·a)]	0,85	0,83	0,59	0,80	0,50
	UKD(P) [T€/ (km·a)]	381,54	333,75	278,32	339,51	216,47
Raten	UR(P) [U/(10 ⁹ Kfz·km)]	91,47	84,04	92,58	87,92	115,50
	UR(SP) [U/(10 ⁹ Kfz·km)]	15,60	19,35	14,24	17,28	28,29
	UKR(P) [€/ (10 ³ Kfz·km)]	7,03	7,81	6,70	7,37	11,19

Tab. 3: Unfallkenngrößen der Autobahn A 5 im Vergleich zum gesamten Netz der Bundesautobahnen für den Zeitraum 2001 bis 2003 (Bezeichnungen nach [17])

Als Maß für die Beurteilung des Unfallgeschehens eignen sich vor allem fahrleistungsbezogene Kenngrößen, weil diese das Unfallrisiko für den einzelnen Verkehrsteilnehmer am besten repräsentieren. Wie aus Tab. 3 hervorgeht, weist der achtstreifige Abschnitt der Autobahn A 5 unterdurchschnittliche Unfallraten im Vergleich zu den Mittelwerten des gesamten deutschen Autobahnnetzes auf. Die fahrleistungsbezogenen Kosten der Unfälle mit Personenschaden sind auf der A 5 um etwa 40 % geringer als im gesamten Autobahnnetz. Im Vergleich der einzelnen Teilabschnitte der Untersuchungsstrecke weist Abschnitt 2 zwischen Anschlussstelle Zeppelinheim und Anschlussstelle Weiterstadt die geringste Rate der Unfälle mit Personenschaden, aber die höchste Rate der Unfälle mit schwerem Personenschaden sowie die höchste Unfallkostenrate auf. Dies bedeutet, dass die im Abschnitt 2 aufgetretenen Unfälle besonders schwerwiegende Folgen hatten. Eine mögliche Ursache dafür ist das hohe Geschwindigkeitsniveau im Bereich der freien Strecke.

Eine weitergehende Analyse der Verteilungen der Unfalltypen, Unfallarten und Unfallumstände ergab keine wesentlichen Unterschiede zwischen der achtstreifigen Untersuchungsstrecke und dem Gesamtnetz der Bundesautobahnen. Insbesondere zeigten sich keine Auffälligkeiten hinsichtlich des Unfallgeschehens bei nasser Fahrbahn.

Der Zusammenhang zwischen dem Unfallgeschehen und der Verkehrsbelastung wurde für den mittleren Abschnitt der Untersuchungsstrecke zwischen Anschlussstelle Zeppelinheim und Anschlussstelle Weiterstadt näher untersucht. Dazu wurde die Verkehrsstärke zum jeweiligen Zeitpunkt der in diesem Abschnitt aufgetretenen Unfälle anhand der Verkehrsdaten von automatischen Dauerzählstellen rekonstruiert. Um ausschließlich solche Unfälle zu erfassen, deren Eintreten durch die Verkehrssituation unmittelbar beeinflusst wird, wurden Unfälle bei winterglatter Straße sowie Alkoholunfälle aus der Analyse ausgeschlossen. Für die Auswertung wurden Verkehrsstärkeklassen der Breite 1.000 Kfz/h gebildet. Maßgebend für die Zuordnung der Unfälle zu den Verkehrsstärkeklassen war der Stundenwert der Verkehrsstärke zum Unfallzeitpunkt. Anhand typisierter Tagesganglinien wurden mögliche Auswirkungen des Unfalls auf die Verkehrsstärke zum Unfallzeitpunkt geprüft und die Verkehrsstärke ggf. korrigiert.

Die für den Abschnitt der Autobahn A 5 zwischen Zeppelinheim und Weiterstadt ermittelten Funktionen der Unfallrate und der Unfallkostenrate in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke sind in Bild 9 dargestellt. Bei Verkehrsstärken unter 1.000 Kfz/h ist die Unfallrate mehr als dreimal so hoch und die Unfallkostenrate mehr als viermal so hoch wie der Mittelwert über alle Belastungsstufen. Der Unterschied zwischen den Funktionen der Unfallrate und der Unfallkostenrate zeigt, dass Unfälle bei geringen Verkehrsstärken besonders schwerwiegende Folgen haben. Der ermittelte Zusammenhang zwischen der Unfallrate und der Verkehrsstärke stimmt qualitativ mit den Ergebnissen der Untersuchung von PÖPPEL-DECKER e.a. [18] für zwei- und dreistreifige Richtungsfahrbahnen überein.

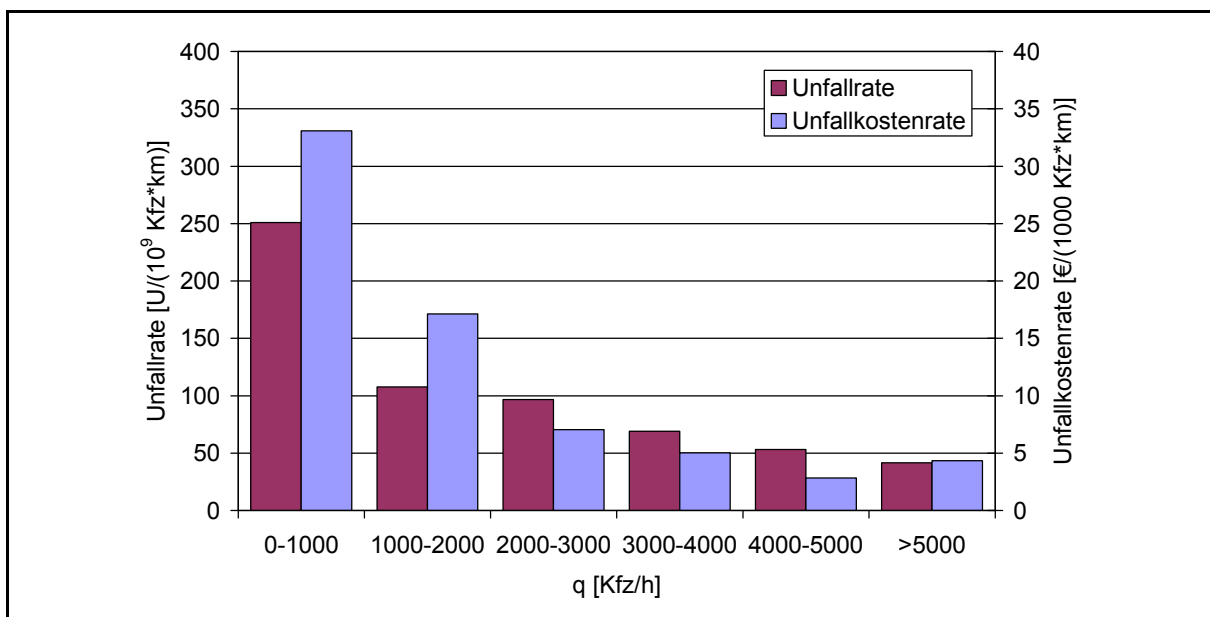


Bild 9: Unfallrate und Unfallkostenrate in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke für die Autobahn A 5 zwischen AS Zeppelinheim und AS Weiterstadt (Unfälle mit Personenschaden der Jahre 2001 bis 2003, ohne Glätte- und Alkoholunfälle)

5 Entwurfstechnik

5.1 Regelquerschnitt

In den RAA [13] wird der in Bild 10 dargestellte Regelquerschnitt RQ 43,5 für Autobahnen mit vierstreifigen Richtungsfahrbahnen der EKA 1 angegeben. Die Abmessungen dieses Querschnitts entsprechen der Systematik der übrigen in den RAA [13] enthaltenen Regel-

Autobahnknotenpunkten im Zuge vierstreifiger Richtungsfahrbahnen ist zur Gewährleistung eines flüssigen und sicheren Verkehrsablaufs eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Fahrstreifenwechsel über längere Strecken vor dem Knotenpunkt anzustreben. Daraus können sich insbesondere für die Wegweisung an komplexen Knotenpunkten Sonderlösungen mit größeren Entfernungen der Vorwegweiser zum Verzweigungspunkt ergeben.

Vor allem aus Gründen der Verkehrssicherheit und des Straßenbetriebs sollten Autobahnen mit vierstreifigen Richtungsfahrbahnen generell mit Verkehrsbeeinflussungsanlagen ausgerüstet sein. Vor dem Hintergrund der hohen Verkehrsbelastung und der Breite der Fahrbahn sind Verkehrsbeeinflussungsanlagen vor allem für die Absicherung von Gefahrenstellen sowie zur Sicherung des Betriebsdienstes wichtig. Vor dem Hintergrund der Erfahrungen aus dem Inland und dem europäischen Ausland ist die generelle Ausrüstung vierstreifiger Richtungsfahrbahnen mit Verkehrsbeeinflussungsanlagen als Stand der Technik anzusehen. Im Vergleich zur Anordnung eines Standstreifens auf der linken Fahrbahnseite stellen Verkehrsbeeinflussungsanlagen eine flexibler einsetzbare und wirtschaftlichere Möglichkeit zur Absicherung von havarierten Fahrzeugen dar.

6 Zusammenfassung

Im Rahmen eines Forschungsprojekts wurden Autobahnen mit vierstreifigen Richtungsfahrbahnen hinsichtlich des Verkehrsablaufs, der Verkehrssicherheit und der Entwurfstechnik analysiert. Ausgehend von einer Dokumentation des Kenntnis- und Erfahrungsstands wurden umfangreiche empirische Analysen durchgeführt und Empfehlungen für die verkehrstechnische Bemessung, den Entwurf und Betrieb von vierstreifigen Richtungsfahrbahnen erarbeitet.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass vierstreifige Richtungsfahrbahnen eine leistungsfähige und relativ sichere Ausbauf orm darstellen. Gravierende Probleme ergeben sich aus der Breite der Fahrbahn nicht. Dennoch sind z.B. hinsichtlich der Wegweisung an komplexen Knotenpunkten und der Entwässerung in Verwindungsbereichen spezifische Anforderungen zu beachten, um einen flüssigen und sicheren Verkehrsablauf zu gewährleisten. Unter den Gesichtspunkten der Verkehrssicherheit und des Straßenbetriebs ist die Ausstattung vierstreifiger Richtungsfahrbahnen mit Verkehrsbeeinflussungsanlagen zu empfehlen.

7 Literatur

- 1 BMVBW (2003): Bundesverkehrswegeplan 2003: Beschluss der Bundesregierung vom 2. Juli 2003. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Berlin.
- 2 BRILON, W., GEISTEFELDT, J., LIPPOLD, C., KUCZORA, V. (2007): Autobahnen und Autobahnknotenpunkte mit vierstreifigen Richtungsfahrbahnen – Gestaltung und Bemessung. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 967, Bonn.
- 3 AASHTO (2004): A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, 5th Edition. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C.
- 4 ROA (1993): Richtlijnen voor het Ontwerp van Autosnelwegen. Rijkswaterstaat Adviesdienst Verkeer en Vervoer (Hrsg.), Rotterdam.
- 5 NOA (2007): Nieuwe Ontwerprichtlijn Autosnelwegen. Rijkswaterstaat Adviesdienst Verkeer en Vervoer (Hrsg.), Rotterdam.
- 6 HBS (2001): Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln.

- 7 BRILON, W., PONZLET, M. (1995): Application of traffic flow models. Proceedings of the Workshop in Traffic and Granular Flow. World Scientific, Singapore.
- 8 FGSV (2000): Begriffsbestimmungen – Teil: Verkehrsplanung, Straßenentwurf und Straßenbetrieb. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln.
- 9 VAN AERDE, M. (1995): A Single Regime Speed-Flow-Density Relationship for Freeways and Arterials. Proceedings of the 74th TRB Annual Meeting. Washington D.C.
- 10 BRILON, W., ZURLINDEN, H. (2003): Überlastungswahrscheinlichkeiten und Verkehrsleistung als Bemessungskriterium für Straßenverkehrsanlagen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 870, Bonn.
- 11 HARDING, J. (2007): Modellierung und mikroskopische Simulation des Autobahnverkehrs. Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum, Heft 29.
- 12 GEISTEFELDT, J. (2007): Verkehrsablauf und Verkehrssicherheit auf Autobahnen mit vierstreifigen Richtungsfahrbahnen. Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum, Heft 30.
- 13 RAA (2008): Richtlinien für die Anlage von Autobahnen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln.
- 14 STATISTISCHES BUNDESAMT (2002): Verkehrsunfälle 2001. Statistisches Bundesamt (Hrsg.), Fachserie 8 / Reihe 7, Wiesbaden.
- 15 STATISTISCHES BUNDESAMT (2003): Verkehrsunfälle 2002. Statistisches Bundesamt (Hrsg.), Fachserie 8 / Reihe 7, Wiesbaden.
- 16 STATISTISCHES BUNDESAMT (2004): Verkehrsunfälle 2003. Statistisches Bundesamt (Hrsg.), Fachserie 8 / Reihe 7, Wiesbaden.
- 17 FGSV (2003): Merkblatt für die Auswertung von Straßenverkehrsunfällen, Teil 1: Führen und Auswerten von Unfalltypen-Steckkarten. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln.
- 18 PÖPPEL-DECKER, M., SCHEPERS, A., KOSSMANN, I. (2003): Grundlagen streckenbezogener Unfallanalysen auf Bundesautobahnen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft M 153, Bergisch Gladbach.
- 19 RESSEL, W., HERRMANN, S. R. (2008): Aquaplaning und Verkehrssicherheit in Verwindungsbereichen dreistreifiger Richtungsfahrbahnen – Berechnung der Wasserfilmdicke. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 997, Bonn.
- 20 RWBA (2000): Richtlinien für die wegweisende Beschilderung auf Autobahnen. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (Hrsg.), Berlin.