

Untersuchung des Einflusses von Lang-Lkw auf den Verkehrsablauf

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Verkehrstechnik Heft V 259

bast

Untersuchung des Einflusses von Lang-Lkw auf den Verkehrsablauf

von

Justin Geistefeldt
Ariane Sievers

Ruhr Universität Bochum
Lehrstuhl für Verkehrswesen –
Planung und Management

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 259

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M - Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Schünemann Verlag GmbH, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST)** zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BAST-Archiv ELBA zur Verfügung.
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

**Ergänzung zum Bericht zum Forschungsprojekt
FE 03.0459/2009/OGB: Berücksichtigung des Schwerverkehrs bei der Modellierung
des Verkehrsablaufs an planfreien Knotenpunkten**

Dieser Forschungsbericht wurde im Rahmen der interdisziplinären wissenschaftlichen Begleituntersuchung zum Feldversuch mit Lang-Lkw erstellt.

Fachbetreuung

Marco Irzik

Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

Redaktion

Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag

Fachverlag NW in der
Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9331

ISBN 978-3-95606-183-7

Bergisch Gladbach, Juli 2015

Kurzfassung – Abstract

Berücksichtigung des Schwerverkehrs bei der Modellierung des Verkehrsablaufs an planfreien Knotenpunkten – Untersuchung des Einflusses von Fahrzeugen und Fahrzeugkombinationen mit Überlänge (Lang-Lkw) auf den Verkehrsablauf

Im Rahmen der Untersuchung wurde der Einfluss von Lang-Lkw auf den Verkehrsablauf an planfreien Knotenpunkten mithilfe des mikroskopischen Simulationsprogramms BABSIM analysiert. Dazu wurde der Verkehrsablauf an verschiedenen Typen von Ausfahrten und Einfahrten sowie einer Verflechtungsstrecke nachgebildet.

Die Simulationsmodelle der Untersuchungsstellen wurden anhand der Daten von Dauerzählstellen für Schwerverkehrsanteile zwischen 10 % und 15 % kalibriert und validiert. Für jede Untersuchungsstelle wurden Simulationen mit Lang-Lkw-Anteilen von 0 %, 1 %, 2 % und 5 % der Gesamtverkehrsstärke sowie in der Regel drei unterschiedlichen Verkehrsstärkeanteilen des ein- bzw. ausfahrenden Verkehrs durchgeführt. In einem weiteren Ansatz wurden Szenarien verglichen, bei denen die Transportleistung von drei herkömmlichen Lkw durch zwei Lang-Lkw ersetzt wurde. Für jedes Szenario wurde der Mittelwert der Verkehrsstärken vor Zusammenbrüchen des Verkehrsflusses als Schätzwert der Kapazität ermittelt.

Insgesamt liefern die Ergebnisse der Verkehrsflusssimulationen einen Anhaltspunkt dafür, dass die Kapazität von planfreien Knotenpunkten bei den hier analysierten hohen Lang-Lkw-Anteilen von 1 bis 5 % der Gesamtverkehrsstärke im Allgemeinen nur gering beeinflusst wird. Die ermittelten Auswirkungen der Lang-Lkw auf die Kapazität liegen in der Größenordnung der Bandbreite der Kapazität, die in der Realität auch im Vergleich unterschiedlicher Knotenpunkte mit ähnlichen verkehrlichen und streckengeometrischen Randbedingungen auftreten.

Consideration of heavy vehicle traffic in modeling traffic flow at freeway interchanges – Analysis of the influence of long heavy vehicles and vehicle combinations on traffic flow

In this research project, the influence of long heavy vehicles on traffic flow at freeway interchanges was analyzed by using the microscopic simulation tool BABSIM. The sample consists of different exit and entrance types as well as a weaving area.

The simulation models were calibrated and validated for heavy vehicle percentages between 10% and 15% with data from loop detectors. For each investigation site, simulations were conducted with a percentage of long heavy vehicles of 0%, 1%, 2% and 5% as well as three different scenarios with different proportions of entering and exiting vehicles. Another approach was to compare scenarios in which three regular heavy vehicles were substituted by two long heavy vehicles. For each scenario, ten simulation runs were conducted. The mean traffic breakdown volume was used to estimate the capacity and to compare the different scenarios.

Overall, the results of the simulation study indicate that percentages of long heavy vehicles between 1 and 5% of the total traffic volume do not significantly influence the capacity of freeway interchanges. The effects of long heavy vehicles on interchange capacity are in the range of the capacity differences between different interchanges that can be observed in the field even under similar geometric and traffic conditions.

Inhalt

1	Einleitung	7	6	Ermittlung von Pkw-Gleichwerten für Lang-Lkw	27
2	Untersuchungskonzept	7	6.1	Ausfahrten	28
2.1	Kontext der Untersuchung	7	6.2	Einfahrten	30
2.2	Methodik	7	6.3	Verflechtungsstrecke	33
3	Literaturanalyse	8	7	Zusammenfassung	34
4	Mikroskopische Verkehrsfluss simulation	9	8	Literatur	35
4.1	Simulationsprogramm	9	Anhang	37	
4.2	Kalibrierung und Validierung	11			
4.3	Modellierung der Untersuchungsstellen	14			
4.4	Verkehrszusammensetzung	17			
4.5	Bewertung des Verkehrsablaufs	18			
5	Simulationsergebnisse	19			
5.1	Ausfahrten	19			
5.1.1	Ausfahrttyp A 1	19			
5.1.2	Ausfahrttyp A 4	21			
5.1.3	Ausfahrttyp A 6	21			
5.2	Einfahrten	21			
5.2.1	Einfahrttyp E 1	21			
5.2.2	Einfahrttyp E 3	24			
5.2.3	Einfahrttyp E 4	24			
5.2.4	Einfahrttyp E 5	24			
5.3	Verflechtungsstrecken	26			
5.4	Zusammenfassung und Signifikanztest	26			

1 Einleitung

Für die kommenden Jahre wird von einer erheblichen Zunahme des Schwerverkehrs auf Bundesautobahnen ausgegangen, während für den Pkw-Verkehr nur noch geringe Zuwächse prognostiziert werden (BMVBS 2011). Die steigende Transportleistung des Schwerverkehrs kann einerseits mit mehr Fahrzeugen erbracht werden, andererseits können überlange Fahrzeuge eingesetzt werden, um so ein größeres Transportvolumen mit einem Fahrzeug transportieren zu können. In Deutschland wurde am 1. Januar 2012 ein Feldversuch gestartet, indem Fahrzeuge mit Überlänge (Lang-Lkw), aber dem gleichen zulässigen Gesamtgewicht wie bei herkömmlichen Lkw, in der Praxis erprobt werden. Der Feldversuch wird von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) wissenschaftlich begleitet.

Durch den Einsatz von Lang-Lkw auf Bundesautobahnen ergeben sich an die Gestaltung und Bemessung von planfreien Knotenpunkten besondere Anforderungen. Möglich sind Behinderungen von ein- und ausfahrenden Fahrzeugen sowie Störungen des Verkehrsablaufs durch die Lang-Lkw. Auch durch Ein- und Ausfädelungsvorgänge von Lang-Lkw können bei hohen Verkehrsstärken Störungen induziert werden. Um den Einfluss von Lang-Lkw auf den Verkehrsfluss auf Autobahnen anhand verkehrstechnischer Kenngrößen analysieren zu können, ist die Anzahl der während des Feldversuchs in Deutschland fahrenden Lang-Lkw allerdings nicht ausreichend. Daher wird der Einfluss der Lang-Lkw in der vorliegenden Untersuchung, die eine Erweiterung des Forschungsprojekts „Berücksichtigung des Schwerverkehrs bei der Modellierung des Verkehrsablaufs an planfreien Knotenpunkten“ darstellt, mit Hilfe des mikroskopischen Simulationsprogramms BABSIM modellbasiert untersucht. Dafür ist eine Anpassung des Programmes notwendig, bei der die Lang-Lkw als neue Schwerverkehrsgruppe integriert werden. Mit dem Programm BABSIM wird der Verkehrsablauf an planfreien Knotenpunkten unter Variation des Anteils der Lang-Lkw am Schwerverkehrsaufkommen nachgebildet und hinsichtlich des Einflusses der Lang-Lkw auf die Kapazität unterschiedlicher Ein- und Ausfahrttypen analysiert.

2 Untersuchungskonzept

2.1 Kontext der Untersuchung

Das Forschungsprojekt „Berücksichtigung des Schwerverkehrs bei der Modellierung des Verkehrsablaufs an planfreien Knotenpunkten“ hat zum Ziel, ein geeignetes Modell für die Beschreibung und Bewertung des Schwerverkehrs an planfreien Knotenpunkten zu entwickeln. Aufbauend auf einer umfassenden Literaturrecherche wurden umfangreiche empirische Daten analysiert. Dabei wurden Daten von Dauerzählstellen ausgewertet sowie Messungen zur Erfassung mikroskopischer Parameter des Verkehrsablaufs an ausgewählten Untersuchungsstellen durchgeführt. Die Datengrundlage wurde mit Hilfe des mikroskopischen Simulationsprogramms BABSIM erweitert, um auch Verkehrsbelastungen mit hohen Schwerverkehrsanteilen im Bereich der höchsten Verkehrsstärken abbilden zu können, die bislang im deutschen Autobahnnetz in der Regel nicht auftreten. Für die Kalibrierung und Validierung des Simulationsprogramms wurden die empirischen Verkehrsdaten herangezogen. Anschließend wurden verschiedene Verfahren zur Modellierung des Verkehrsablaufs entwickelt, überprüft und hinsichtlich ihrer Eignung zur Berücksichtigung des Schwerverkehrs bewertet.

2.2 Methodik

Das Ziel der vorliegenden Untersuchung ist die Erforschung des Einflusses von Lang-Lkw auf den Verkehrsablauf an planfreien Knotenpunkten. Die Anzahl der in Deutschland fahrenden Lang-Lkw ist während des Feldversuchs zu gering, um einen Einfluss auf den Verkehrsablauf empirisch analysieren zu können. Als erste Annäherung können daher nur Simulationsuntersuchungen durchgeführt werden. Dafür liegen bereits verschiedene Simulationsnetze vor, die für die ergänzenden Untersuchungen zum Einfluss von Lang-Lkw verwendet werden können. Die entsprechenden Knotenpunkte sind in einer Übersicht in Tabelle 1 angegeben und werden ausführlich im Anhang dargestellt.

Nr.	BAB/ AS-Nr.	Name	Fahrt- richtung	Fahr- streifen HFB	Typ	Messung	Simulation	DTV [Kfz/d]	DTV _{SV} [Lkw/d]	SV- Anteil	DTV _{E/A} [Kfz/d]	DTV _{E/A,SV} [Lkw/d]	SV- Anteil
1	2/1	AK Oberhausen	W	3	A 1		•	56.077	9.805	17,5 %	12.269	6.367*	51,9 %*
2	2/3	AS/AK Bottrop	O	3	A 1		•	54.980	10.796	19,6 %	-	-	-
3	5/3	AS Alsfeld-West	N	2	A 1		•	30.528	6.289	20,6 %	3.465	234	6,8 %
4	3/14	AK Kaiserberg	N	3	A 4		•	52.627	6.255	11,9 %	16.654	2.893	17,4 %
5	1/101	AK Köln-Nord	S	3/2	A 6		•	45.757	5.811	12,7 %	15.728	1.051	6,7 %
6	5/3	AS Alsfeld-West	N	2	E 1		•	30.528	6.289	20,6 %	2.524	407	16,1 %
8	3/22	AS Leverkusen-Opladen	N	3	E 1		•	52.057	6.287	12,1 %	4.436	1.215	27,4 %
9	1/101	AK Köln-Nord	O	2/3	E 3		•	26.303	5.046	19,2 %	14.345	715	5,0 %
10	67/6	AK Darmstadt	S	2	E 4		•	24.594	3.321	13,5 %	8.848	1.219	13,8 %
11	3/14	AK Kaiserberg	S	3	E 5		•	53.460	6.540	12,2 %	11.037	2.178	19,7 %
12	1/98	AK Leverkusen	S	3	VR 1		•	17.055	2.119	12,4 %	15.955	2.124	13,3 %

Tab. 1: Untersuchungsstellen

3 Literaturanalyse

Im Vorfeld des bundesweiten Feldversuchs führten bereits einige Länder Untersuchungen zur Einführung von Fahrzeugen und Fahrzeugkombinationen mit Überlänge (Lang-Lkw) durch. Der Fokus der Untersuchungen lag dabei meist bei der Auswertung der Erfahrungen von beteiligten Speditionen. Im Schlussbericht des Projekts „Auswertung des niedersächsischen Modellversuchs zum Einsatz von GigaLinern“ (FRIEDRICH et al. 2007) finden sich nur wenige Aussagen über die Beeinflussung des Verkehrsflusses durch Lang-Lkw. Die Studie erwartet dabei für Autobahnen keine gravierenden Probleme durch den Einsatz von Lang-Lkw, allerdings nahmen an der Studie nur drei Lang-Lkw teil.

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlichte 2008 den Schlussbericht zu „Auswirkungen neuer Fahrzeugkonzepte“ (GLAESER et al. 2008). Bezüglich der Beeinflussung des Verkehrsablaufs werden hier die Bereiche der Ein- und Ausfahrten an Anschlussstellen als kritische Punkte identifiziert. Die Untersuchung zur Abschätzung der Auswirkungen wurde mit Hilfe eines Testfahrzeugs durchgeführt, welches an mehreren Tagen auf einer Teststrecke begleitet wurde. An Einfahrten konnten sowohl an zweistreifigen als auch an dreistreifigen Richtungsfahrbahnen keine negativen Auswirkungen der Lang-Lkw festgestellt werden. An Ausfahrten wurde vereinzelt beobachtet, dass sich Pkw frühzeitig hinter einem Lang-Lkw einordneten. Ins-

besondere bei hohen Verkehrsstärken in der Ausfahrt verursachte dies eine Reduzierung der Pkw-Geschwindigkeiten auf der Hauptfahrbahn.

Im Modellversuch NRW „Technische Erprobung von Fahrzeugkombinationen mit einer Gesamtlänge bis 25,25 m“ (WANGRIN et al. 2009) wurden neben verschiedenen empirischen Untersuchungen auch Simulationen des Verkehrsflusses auf Autobahnen mit Lang-Lkw durchgeführt. Das verwendete Simulationsprogramm PELOPS wurde in Zusammenarbeit mit BMW entwickelt und wird von der Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen Aachen (fka) vertrieben. In der Untersuchung wurden zwei Netzmodelle analysiert. Im ersten Modell wurde eine Fahrstreifenreduktion von 3 auf 2 Fahrstreifen vor einer Baustelle simuliert, im zweiten Modell eine Kombination aus Ein- und Ausfahrten an der zweistreifigen Richtungsfahrbahn der Autobahn A 40 zwischen den Anschlussstellen Gelsenkirchen-Süd und Bochum-Stahlhausen. Bei jeder Simulation wurde zwischen drei verschiedenen Verkehrsnachfrageszenarien unterschieden. Die einzelnen Szenarien betreffen

- die Abbildung der Daten von Verkehrsmessungen aus dem Jahr 2009,
- die Steigerung des Schwerverkehrsanteils auf den für 2012 im Gutachten der Bundesanstalt für Straßenwesen zu überlangen Fahrzeugkombinationen (GLAESER et al. 2008) prognostizierten Wert und

- die Modellierung des für 2012 prognostizierten Schwerverkehrsanteils mit Verwendung von Lang-Lkw, unter der Bedingung, dass 45 % der Transportleistung durch Lang-Lkw übernommen wird.

Die Simulationen der Fahrstreifenreduktion zeigten, dass nur geringe Unterschiede zwischen den einzelnen Verkehrsnachfrageszenarien festzustellen sind. Als Begründung wird dabei angeführt, dass sich der Schwerverkehr überwiegend auf dem rechten Fahrstreifen befindet und so kaum von der Fahrstreifenreduktion betroffen ist. Die Simulationen der Kombination aus Ein- und Ausfahrten ergab größere Unterschiede. Hier konnte bei der Simulation mit Lang-Lkw durch die Reduktion der Anzahl der Schwerverkehrsfahrzeuge ein positiver Effekt auf den Verkehrsablauf festgestellt werden.

4 Mikroskopische Verkehrsflusssimulation

4.1 Simulationsprogramm

Für die mikroskopische Simulation wird das Programm BABSIM benutzt, mit dem der Verkehr auf Autobahnen nachgebildet werden kann. Das Programm BABSIM wurde an der Ruhr-Universität Bochum vom Lehrstuhl für Verkehrswesen und dem Lehrstuhl für Ingenieurinformatik im Bauwesen im Rahmen eines Forschungsauftrags der Bundesanstalt für Straßenwesen entwickelt (BRILON et al. 2005; BRILON et al. 2007). BABSIM eignet sich für die fahrzeuggenaue Simulation von zwei- bis vierstreifigen Richtungsfahrbahnen. Im Laufe der Entwicklung des Programms sind die in den RAA (2008) dargestellten Ein- und Ausfahrttypen in das Programm eingegangen (BRILON et al. 2007). Das Programm wurde bereits in zahlreichen Anwendungen für die Nachbildung des Verkehrsablaufs auf Autobahnen und an planfreien Knotenpunkten umfassend kalibriert (u. a. BRILON, GEISTEFELDT 2007; BRILON, BETZ 2008).

In mikroskopischen Simulationsmodellen werden die Regeln der Interaktion zwischen Fahrzeugen durch Rechenalgorithmen in Verhaltensmodellen beschrieben. Bei dem Simulationsprogramm BABSIM handelt es sich um ein mikroskopisches Modell, bei dem das Verhalten der Fahrer-Fahrzeug-Elemente (FFE) von dem Fahrzeugfolgeverhalten, dem Fahrstreifenwechselmodell und dem Routenwahlmodell bestimmt wird.

Für das Routing, d. h. die Überprüfung der Quelle-Ziel-Beziehung bei Initialisierung des Simulationsnetzes, wird für jedes Fahrzeug der kürzeste Weg zwischen Quelle und Ziel überprüft. Im Bereich von Knotenpunkten wird in BABSIM ein taktisches Fahrverhalten umgesetzt, das u. a. bewirkt, dass Fahrzeuge sich rechtzeitig einordnen und kurz vor der Ausfahrt nicht mehr überholen. Außerhalb von Knotenpunkten beschränkt sich die Modellierung des Fahrverhaltens auf die operationale Ebene. Für die Steuerung der Längsbewegung (Fahrzeugfolgemodell) wird das Modell nach WIEDEMANN (1974) und für das Querverhalten (Fahrstreifenwechselmodell) das Modell nach SPARMANN (1978) verwendet.

Für das absichtsbasierte Verhaltensmodell werden in BABSIM verschiedene Teilbereiche definiert, die einer spezifischen Aufgabe oder Absicht zugeordnet sind (HARDING 2007). Jede dieser Absichten gibt eine situationsabhängige Empfehlung für das Fahrverhalten ab, z. B. Anpassung der Geschwindigkeit oder Wechsel des Fahrstreifens. Die Empfehlungen werden über eine Schnittstelle abgerufen und zu einer Resultierenden zusammengeführt. Weiterhin wurde ein Trägheitswert eingeführt, der ein Maß für die Zeit zwischen Absicht und Aktion darstellt. Über die Trägheit können die einzelnen Bereiche unterschiedlich gewichtet werden. Im Folgenden werden die einzelnen Absichten kurz beschrieben:

- Abstand halten
Das Modul regelt das Abstandverhalten zum Vorderfahrzeug auf dem eigenen Fahrstreifen. Es wird ein erweiterter psycho-physischer Ansatz nach WIEDEMANN (1974) verwendet.
- Überholen
Hier wird die Absicht eines Fahrstreifenwechsels nach links in Abhängigkeit vom Vorderfahrzeug abgebildet. Dabei werden eine Unterschreitung des angestrebten Folgeabstandes BX und die Relativgeschwindigkeit als Kriterien herangezogen. Weiterhin wurde ein Grenzwert kalibriert, der den Überholwunsch unterdrückt, wenn der linke Fahrstreifen in einer bestimmten Entfernung endet. Durch den Parameter Ungeduld wird beim Unterschreiten einer Grenzgeschwindigkeit eine Abminderung der akzeptierten Zeitlücken auf dem links liegenden Fahrstreifen bewirkt. Dieser Parameter wird allerdings nur für Pkw überprüft.

- Rechtsfahrgebot

Das Rechtsfahrgebot regelt den Fahrstreifenwechsel nach rechts und verbietet das Rechtsvorbeifahren. Für die Abbildung des Rechtsfahrgebotes wird das Modell von Sparmann verwendet, das von einem Fahrstreifenwechselwunsch ausgeht, wenn das Vorderfahrzeug auf dem rechts angrenzenden Fahrstreifen nicht von dem Fahrstreifenwechsel beeinflusst wird oder das nachfolgende Fahrzeug drängt. Bei Lkw wird zusätzlich der Wechselwunsch angeregt, wenn das Fahrzeug auf dem rechtsliegenden Fahrstreifen ein Pkw ist. Der Fahrstreifenwechselwunsch wird außerdem, analog zum Modul „Überholen“, unterdrückt, wenn der Fahrstreifen in einer bestimmten Entfernung endet.

- Seitenabstand

Diese Absicht stellt eine Kontrolle des Fahrstreifenwechsels dar. Es wird ein Votum für oder gegen den Fahrstreifenwechsel in Abhängigkeit von vorhandenen Fahrzeugen auf den benachbarten Fahrstreifen abgegeben. Durch die Größe „Abminderung“ können die Zeitlücken z. B. im Bereich von Ein- und Ausfahrten reduziert werden, um einen Fahrstreifenwechsel zu erzwingen oder ein anderes Fahrzeug zu unterstützen. Der Parameter „Toleranzbereich“ gibt die mögliche Beeinträchtigung des hinteren Interaktionspartners auf dem links angrenzenden Fahrstreifen an.

- Route folgen

Hier wird das Fahrverhalten der zugeordneten Route angepasst. Dabei werden bei jedem Simulationsschritt die Entfernung zur nächsten Verzweigung und die Anzahl der zu wechselnden Fahrstreifen überprüft. Das Fahrverhalten ändert sich, je näher das Fahrzeug der Verzweigung kommt.

- Unterstützen

Das Modul steuert das kooperative Verhalten eines Fahrzeuges, wie z. B. das Verzögern zum Vergrößern einer Lücke, das Akzeptieren kleiner Folgeabstände oder Fahrstreifenwechsel als Assistenz an einer Einfahrt. Die Unterstützung kann von einem anderen Fahrzeug durch die Absicht „Route folgen“ angefordert werden. Dieses wird dann unterstützt, bis es den Fahrstreifenwechsel durchgeführt hat.

Für die vorliegende Untersuchung war es notwendig, das Simulationsprogramm BABSIM hinsicht-

lich der Einstellmöglichkeiten für die Schwerverkehrsfahrzeuge zu erweitern. Eine Anpassung erfolgte dabei hinsichtlich der Eingabe der Verkehrsstärken. BABSIM bietet zwei Möglichkeiten, die Schwerverkehrsstärke anzugeben. Zum einen kann ein prozentualer Anteil der maximalen Verkehrsstärke verwendet werden, sodass die Schwerverkehrsstärke über den gesamten Simulationsverlauf konstant ist. Die zweite Möglichkeit ist die Angabe eines konstanten Schwerverkehrsanteils. Auch wenn letztere Möglichkeit dem Anwender mehr Genauigkeit bei der Nachbildung realer Verkehrszusammensetzungen bietet, so ist sie bei einer detaillierteren Untersuchung des Schwerverkehrs trotzdem nicht flexibel genug. Aus diesem Grund wurde BABSIM so erweitert, dass eigene Ganglinien für den Schwerverkehrsanteil angelegt werden können. Dies ermöglicht eine genauere Nachbildung von Messdaten im Simulationsprogramm und liefert realistischere Ergebnisse.

Für die Simulation von Lang-Lkw musste der Quellcode der aktuellen BABSIM-Version erweitert werden. Daher wurde analog zu den bereits bestehenden Java-Klassen „Pkw“ und „Lkw“ eine neue Klasse „LangLkw“ hinzugefügt, die von der Klasse „Lkw“ abstammt. Um Fahrzeuge dieser Typen in der Simulation verwenden zu können, müssen im Programm die sogenannten Schwerlastanteile eingestellt werden. Der Eingabedialog im Programm wurde dazu entsprechend erweitert (siehe Bild 1).

Jede Fahrzeugklasse in BABSIM hat eine Wunschgeschwindigkeitsverteilung. Diese gibt zu jeder im Programm wählbaren zulässigen Höchstgeschwindigkeit die Wunschgeschwindigkeit und deren Standardabweichung an. Die Werte können über

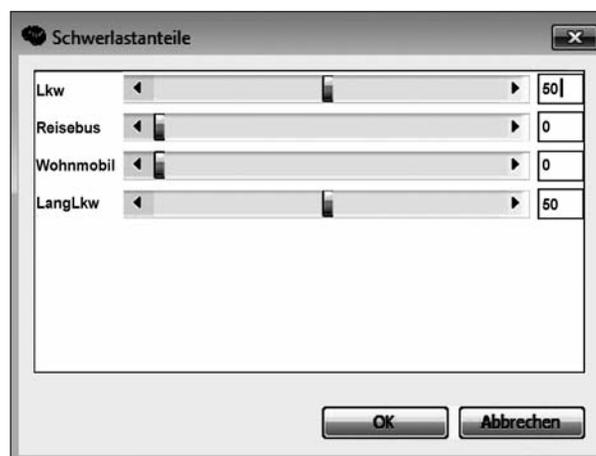


Bild 1: Eingabedialog für die Schwerlastanteile

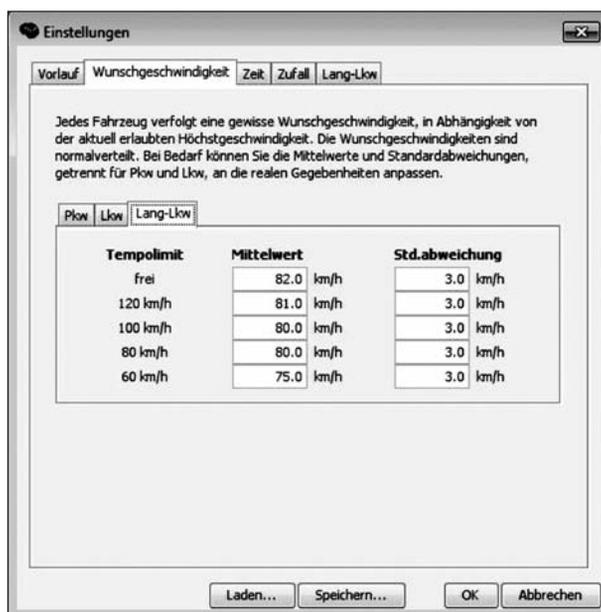


Bild 2: Eingabedialog für die Wunschgeschwindigkeitsverteilungen

die grafische Benutzeroberfläche geändert werden. Auch hier wurde der Eingabedialog um eine Eingabemöglichkeit für Lang-Lkw erweitert (siehe Bild 2). Ebenso wurde für die Lang-Lkw ein generelles Überholverbot implementiert.

In BABSIM können sogenannte Querschnittsmessungen gesetzt werden, um an bestimmten Punkten Daten über den Verkehrszustand (Verkehrsstärke und mittlere Geschwindigkeit) zu erfassen. Diese Daten können dann zu weiteren Auswertungszwecken im CSV-Format exportiert werden. Um detaillierte Analysen des Einflusses von Lang-Lkw auf den Gesamtverkehr zu ermöglichen, wurde diese Export-Funktion um Lang-Lkw-spezifische Daten erweitert.

4.2 Kalibrierung und Validierung

Die Kalibrierung des Simulationsprogramms erfolgt auf der Grundlage der Daten von Dauerzählstellen. In den „Hinweisen zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation“ (FGSV 2006) wird als Maß zur Beurteilung der Güte der RMS-Fehler herangezogen. Für die Betrachtung planfreier Knotenpunkte wird die Fahrstreifenaufteilung als Zielgröße empfohlen. Die maximale Abweichung vom Mittelwert, die mittels des prozentualen RMS-Fehlers bestimmt werden kann, beträgt 5 %.

Die Gleichung zur Ermittlung des prozentualen RMS-Fehlers (RMSPE) lautet:

$$\text{RMSPE} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N \left(\frac{x_n^{\text{sim}} - x_n^{\text{obs}}}{x_n^{\text{obs}}} \right)^2} \quad (4-1)$$

mit

x_n^{sim} ausgewählte Auswertegrößen des Modells in der Simulation

x_n^{obs} ausgewählte Auswertegrößen des Modells aus der Empirie

Bei der Durchführung erster Simulationen wurde deutlich, dass mit den Standardparametern von BABSIM das Fahrverhalten des Schwerverkehrs bei hohen Schwerverkehrsanteilen nicht mehr realistisch nachgebildet werden kann. Beispielsweise hat die Standardeinstellung des Parameters TraegheitUeberholen für den Fahrstreifenwechsel vom rechten Fahrstreifen auf den links angrenzenden Fahrstreifen den Wert 1,0. Dies führt dazu, dass die Fahrstreifenwechsel von allen Fahrzeugen relativ schnell ausgeführt werden, wenn sie sich einem langsameren vorausfahrenden Fahrzeug nähern. Während dieses Verhalten für Pkw als realistisch anzusehen ist, führt es bei Schwerverkehrsfahrzeugen zu einer erhöhten Anzahl von Fahrstreifenwechseln, die den Verkehrsablauf – gerade bei hohen Schwerverkehrsstärken – maßgeblich beeinflusst und sogar Rückstaus verursachen kann. Weitere Unterschiede im Fahrverhalten betreffen nicht nur die Parameter für das Fahrstreifenwechselverhalten, sondern auch andere Parametereinstellungen in BABSIM. Für das weitere Vorgehen war eine genauere Abbildung des Fahrverhaltens des Schwerverkehrs in BABSIM nötig, um auch belastbare Ergebnisse für Simulationen mit einem hohen Schwerverkehrsanteil zu erhalten. BABSIM wurde daher dahingehend angepasst, dass die Parameter getrennt für Pkw und Lkw einstellbar sind. Als Ausgangswerte der Parametereinstellung für die ausstehende Kalibrierung der Simulationsnetze für die einzelnen Untersuchungsstellen werden die in Tabelle 2 angegebenen Werte angesetzt. Aus vorhergehenden Untersuchungen (u. a. SCHNÜLL 2000, FRIEDRICH et al. 2008, BRILON und GEISTEFELDT 2007) geht hervor, dass Schwerverkehrsfahrzeuge sich an Knotenpunkten größtenteils sehr frühzeitig auf ihrem Zielfahrstreifen einordnen. Parameter, die das Verhalten des Schwerverkehrs bezüglich des Einordnens steuern, müssen entsprechend angepasst werden. Im Rahmen von Messungen konnte außerdem beobachtet werden, dass Lkw nach einem Fahrstreifenwechsel

Standardparameter	Pkw	Lkw	Bemerkungen
WIEDEMANN			
Zeitluecke	0,55	0,55	
Troedelwahrscheinlichkeit	0,99	0,99	
Troedelzeit	3,0	3,0	
ABSICHTABSTANDHALTEN			
TraegheitAbstandHalten	1,0	1,0	
ABSICHTRECHTSUEBERHOLEN			
TraegheitRechtsfahrgebot	0,1	1	Lkw wechseln nach dem Überholen schneller auf FS 1
DistanzFahrstreifensubtraktion	500,0	1.000,0	Bewirkt ein früheres Einordnen vor Ein- und Ausfahrten
ToleranzGeschwindigkeit	60,0	60,0	
ToleranzRelativgeschwindigkeit	5,0	5,0	
ABSICHTROUTEFOLGEN			
TraegheitRouteFolgen	0,5	0,5	
DistanzNormierung	600,0	1.000,0	Der Fahrstreifenwechsel der Lkw wird früher vorbereitet
InteraktionsschwelleLinks	500,0	1.000,0	
InteraktionsschwelleRechts	500,0	500,0	
Komfordistanz	1.000,0	1.000,0	
KritischeZeitlueckeLinks	5,0	5,0	
KritischeZeitlueckeRechts	3,0	3,0	
Unterstuetzungsschwelle	500,0	500,0	
ABSICHTSEITENABSTAND			
MinTC	2,0	3,0	Erhöhung der minimalen und maximalen Zeitlücken, die das Wechselverhalten beeinflussen
MaxTC	4,0	5,0	
ToleranzHintenLinks	2,5	2,5	
ABSICHTUEBERHOLEN			
TraegheitUeberholen	1,0	0,1	Erhöhung der Trägheit für die Fahrstreifenwechsel der Lkw
TraegheitUeberholenFahrstreifen1	0,1	Diese Parameter haben nur Einfluss auf das Fahrverhalten der Pkw.	
TraegheitUeberholenFahrstreifen2	0,05		
DistanzFahrstreifeneinzug	500,0		
Ungeduld	20,0		
ABSICHTUNTERSTUETZEN			
TraegheitUnterstuetzen	1,0	0,5	Verminderung, Relevanz für Einfädelungsvorgang, konstantere Geschwindigkeit der Lkw
MinimalGeschwindigkeit	15,0	15,0	
MaximaleBremsverzoegerung	-1,0	-1,0	

Tab. 2: Standardparameter in BABSIM für Pkw und Lkw (grau hinterlegte Zeilen enthalten Werte, die bei Pkw und Lkw gleich sind)

meist sehr früh, teilweise mit Hilfestellung des überholten Lkw, wieder einscheren. Für die Nachbildung dieses Effekts in der Simulation wurde der Wert des Parameters TraegheitRechtsfahrgebot für den Schwerverkehr deutlich erhöht. Der Parameter TraegheitUeberholen wurde für Lkw deutlich verringert und entspricht nun dem Wert der Pkw für den Fahrstreifenwechsel vom zweiten auf den dritten Fahrstreifen. Erste Simulationen der Anschluss-

stelle Leverkusener-Opladen mit einem Schwerverkehranteil $b_{SV} = 10\%$ ergaben mit diesen Einstellungen gute Übereinstimmungen und bei einer Kalibrierung über die Pkw-Geschwindigkeit einen prozentualen RMS-Fehler unter 5 %.

In den USA veröffentlichte COHEN (2004) eine Untersuchung, bei der für das Fahrstreifenwechselmodell im Mikrosimulationsprogramm FRESIM

eine neue Prozedur implementiert wurde, die als Relaxation bezeichnet wird. Relaxation bedeutet, dass ein Fahrzeug nach einem Fahrstreifenwechsel – ebenso wie sein neuer Nachfolger – über einen Zeitraum von etwa 20 Sekunden einen sehr kurzen Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug einhält, der dann langsam wieder dem Normalzustand angepasst wird. COHEN beobachtete dabei, dass weder das wechselnde Fahrzeug noch das neue Folgefahrzeug die Geschwindigkeit signifikant reduzierten. DAAMEN et al. (2010) konnten in einer Studie über das Einfädelverhalten an Autobahneinfahrten in den Niederlanden bestätigen, dass sehr kleine Folgeabstände an Anschlussstellen akzeptiert werden, die über die Zeit wieder wachsen, also eine Relaxation stattfindet. Eine Implementierung des Relaxationsverhaltens in das Simulationsmodell ist sehr aufwendig. Eine Möglichkeit, ein neues Fahrstreifenwechselmodell zu umgehen, stellt die Definition von Streckenabschnitten am untersuchten Knotenpunktelement mit anderen Parametersätzen dar, in denen kürzere Folgeabstände akzeptiert werden. Dieser Ansatz hat sich bei stark belasteten Knotenpunkten bewährt.

Für die Kalibrierung und Validierung eines Simulationsmodells werden zwei Datensätze benötigt. In den Simulationen werden bei den späteren Szenarien die Schwerverkehrsanteile variiert. Für die vorliegende Untersuchung wurde daher für jede Untersuchungsstelle anhand des q - b_{SV} -Diagramms (s. Anhang) analysiert, wie hoch die Schwerverkehrsanteile sind, die während der höchsten Belastungen auftreten. Der erste Datensatz für die Kalibrierung besteht aus q - v -Daten mit geringeren Schwerverkehrsanteil (meist $b_{SV} = 10\%$) und der Datensatz zur Validierung aus q - v -Daten mit höherem Schwerverkehrsanteil (meist $b_{SV} = 15\%$). Durch dieses Vorgehen wird die Veränderung des q - v -Diagramms durch den Schwerverkehr mit abgebildet. Die Berechnung des RMSPE erfolgt anhand der mittleren Pkw-Geschwindigkeiten. Dafür wird zunächst an die beiden empirischen Datensätze das im HBS (2001) verwendete Verkehrsflussmodell nach BRILON, PONZLET (1995) angepasst:

$$v(q) = \frac{v_0}{1 + \frac{v_0}{L_0 \cdot (C_0 - q)}} \quad (4-2)$$

mit

L_0, v_0, C_0 = Modellparameter

Das Ergebnis hieraus sind zwei Sätze von Parametern des Verkehrsflussmodells für einen Schwerverkehrsanteil von 10 bzw. 15 %. Für die Kalibrierung und Validierung wird für die in der Simulation erzeugten q - v -Datenpaare die Abweichung vom zugehörigen empirischen q - v -Diagramm anhand des RMSPE berechnet.

Durch die Funktion des Verkehrsflussmodells wird die Reduktion der Pkw-Geschwindigkeiten bei höheren Verkehrsstärken abgebildet. Die Kalibrierung der maximalen Verkehrsstärke wird zusätzlich auch manuell anhand der Gestalt der Punktwolke im Bereich der maximalen Verkehrsstärken vorgenommen. Weil durch die Aufspaltung der Datensätze für die Kalibrierung und Validierung in den einzelnen Datensätzen Daten mit sehr hohen Verkehrsstärken unterschiedlich oft vorhanden sind, wäre die Berechnung eines Mittelwertes der höchsten Verkehrsstärken teilweise nicht aussagekräftig.

Bis auf eine Untersuchungsstelle konnte bei jeder Kalibrierung und Validierung das nach FGSV (2006) empfohlene Fehlermaß von 5 % eingehalten werden (s. Tabelle 3). Die Ausnahme betrifft die Simulation der Anschlussstelle Alsfeld-West im Zuge der Autobahn A 5, da hier schon in den empirischen Daten eine hohe Streuung der Geschwindigkeiten vorlag, die durch die Modellfunktion nur unzureichend dargestellt werden kann. Der RMSPE liegt hier bei 6,1 % für die Kalibrierung und 6,8 % für die Validierung. Im Kapitel 4.3 werden die einzelnen Simulationsmodelle beschrieben.

Elementtyp, Untersuchungsstelle	RMSPE	
	Kalibrierung	Validierung
A 1, AK Oberhausen	2,5 %	3,6 %
A 1 und E 1, AS Alsfeld-West	6,1 %	6,8 %
A 1, AS Bottrop	3,6 %	2,7 %
A 4, AK Kaiserberg	3,7 %	4,6 %
A 6, AK Köln-Nord	2,1 %	4,3 %
E 1, AS Leverkusen-Opladen	2,7 %	4,9 %
E 3, AK Köln-Nord	4,1 %	3,7 %
E 4, AK Darmstadt	4,6 %	3,3 %
E 5, AK Kaiserberg	3,9 %	4,1 %
VR 1, AK Leverkusen ($q(v_{VU})$ / $q(v_A)$)	3,7 %/ 4,9 %	4,6 %/ 4,1 %

Tab. 3: Fehlermaße (RMSPE) der Untersuchungsstellen

4.3 Modellierung der Untersuchungsstellen

Die Simulationsnetze wurden anhand von Luftbildaufnahmen der Untersuchungsstellen modelliert. Die Lage der Querschnittsmessungen in der Simulation wurde an die Lage der Dauerzählstellen angepasst, um bei der Kalibrierung und Validierung eine möglichst genaue Anpassung der Simulationsergebnisse an die empirischen Daten gewährleisten zu können. Die Strecken wurden außerhalb des Knotenpunktbereichs so verlängert, dass die Stabilisierung des Verkehrsflusses an Einfahrten und das Einordnen der Fahrzeugelemente an Ausfahrten hinreichend abgebildet wurden. Zusätzlich wurde ein virtueller Vorlauf mit einer Länge von 1.000 m vorgesehen, um eine leichte Pulkbildung im Zulauf, die in der Realität durch die Streuung der Wunschgeschwindigkeiten eintritt, nachzubilden.

Der Ausfahrtstyp A 1 wurde an drei verschiedenen Untersuchungsstellen analysiert. An allen Untersuchungsstellen ist das Überholen für Lkw erlaubt.

Die erste Untersuchungsstelle ist Teil des Autobahnkreuzes Oberhausen, das die Autobahnen A 2 und A 3 verbindet. Die Ausfahrt an der Autobahn A 2 in Fahrtrichtung West ist nach Typ A 1 ausge-

bildet, allerdings mit einem verlängerten Ausfädelungstreifen von ca. 400 m (s. Bild 3). Die Ausfahrtverkehrsstärken sind für einen Ausfahrtstyp A 1 mit bis zu 1.400 Kfz/h verhältnismäßig hoch. Zusätzlich liegen in der Ausfahrt hohe Schwerverkehrsstärken vor. Für die Simulation war nur ein Parametersatz erforderlich, um die Kalibrierung und Validierung erfolgreich durchzuführen.

Die Anschlussstelle und das Autobahnkreuz Bottrop werden gemeinsam über eine Verteilerfahrbahn mit einer Ausfahrt des Typs A 1 an die Autobahn A 2 in Fahrtrichtung Ost angeschlossen (Bild 4). In der Ausfahrt sind keine Dauerzählstellen vorhanden. Durch Differenzenbildung mit einem stromabwärts liegenden Messquerschnitt konnte allerdings festgestellt werden, dass die Ausfahrtverkehrsstärken sehr hoch sind und auch in Spitzenstunden einen hohen Schwerverkehrsanteil aufweisen. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde an dieser Untersuchungsstelle eine Verkehrsmessung durchgeführt, welche die hohen Ausfahrtverkehrsstärken bestätigte. Die Verkehrsmessung zeigte außerdem, dass es zu einer starken Verdichtung des Verkehrs auf dem rechten Fahrstreifen vor der Ausfahrt kommt. Die Kalibrierung und Validierung wurde hier anhand der Dauerzählstellen und der Daten aus der Verkehrsmes-

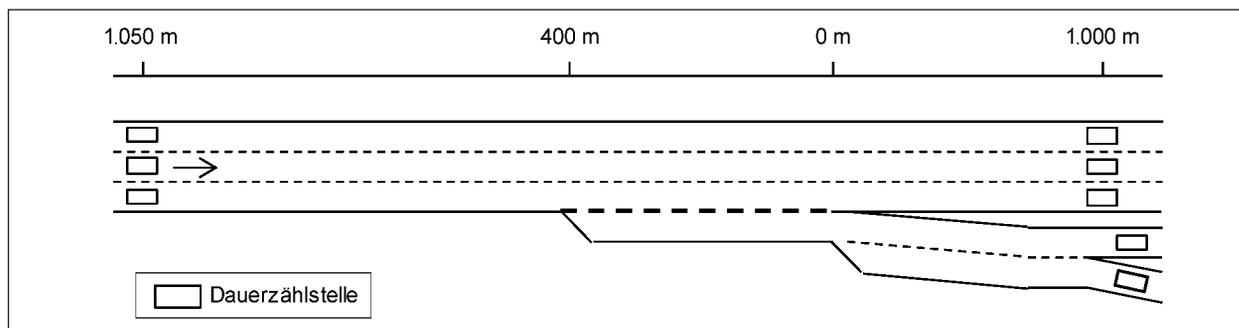


Bild 3: Simulationsmodell AK Oberhausen, Ausfahrtstyp A 1

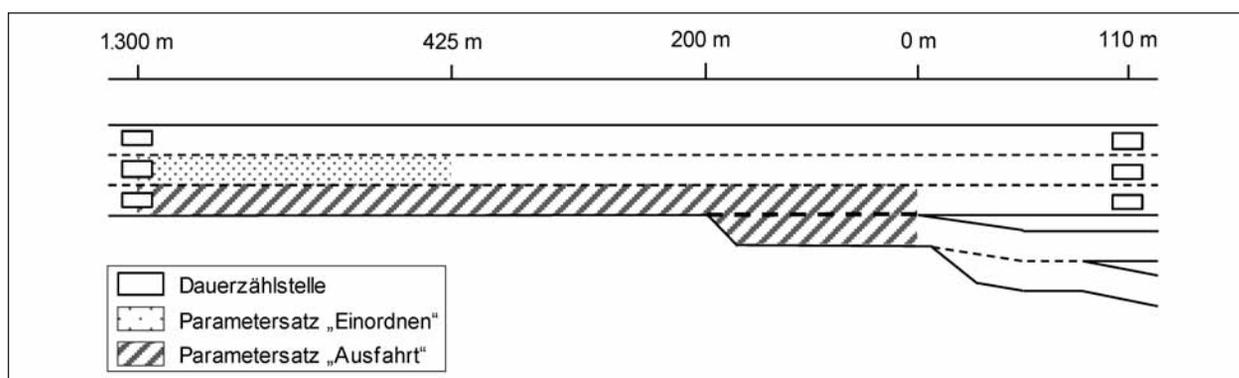


Bild 4: Simulationsmodell AS/AK Bottrop, Ausfahrtstyp A 1

sung durchgeführt. Für die Abbildung des bei der Verkehrsmessung erfassten Zustands musste im Simulationsmodell ein weiterer Parametersatz „Ausfahrt“ eingefügt werden, bei dem der Parameter „Zeitlücke“ verringert wurde und der Parameter „Trödelwahrscheinlichkeit“ auf 1,0 erhöht wurde. Zudem wurde ein weiterer Parametersatz „Einordnen“ eingesetzt, um den ansonsten in der Simulation recht kleinen Bereich des Einordnens der ausfahrenden Fahrzeuge auf dem rechten Fahrstreifen zu verlängern, damit sich die wechselnden Fahrzeuge nicht gegenseitig behindern.

Eine weitere Untersuchungsstelle des Ausfahrtstyps A 1 ist die Anschlussstelle Alsfeld-West an der Autobahn A 5. Die Anschlussstelle ist RAA-konform ausgebildet und liegt an einer zweistreifigen Richtungsfahrbahn (Bild 5). Das Simulationsmodell umfasst die gesamte Anschlussstelle in Fahrtrichtung

Nord, um eventuelle Einflüsse der vorgelagerten Ausfahrt auf den Verkehrsfluss an der Einfahrt mit abbilden zu können. Insgesamt entspricht die Untersuchungsstelle einer Standard-Anschlussstelle im deutschen Autobahnnetz.

Der Ausfahrtstyp A 4 wurde anhand der Ausfahrt an der Autobahn A 3 am Autobahnkreuz Kaiserberg in Fahrtrichtung Nord untersucht (Bild 6). Für die Simulation war nur ein Parametersatz erforderlich.

Als Untersuchungsstelle für den Ausfahrtstyp A 6 wurde die Ausfahrt am Autobahnkreuz Köln-Nord auf der Autobahn A 1 in Fahrtrichtung Süd gewählt (Bild 7). In der Simulation sollte insbesondere überprüft werden, ob sich die Fahrstreifenwechsel der durchfahrenden Schwerverkehrsfahrzeuge vom rechten auf den mittleren Fahrstreifen negativ auf den Verkehrsablauf und damit auf die Kapazität der

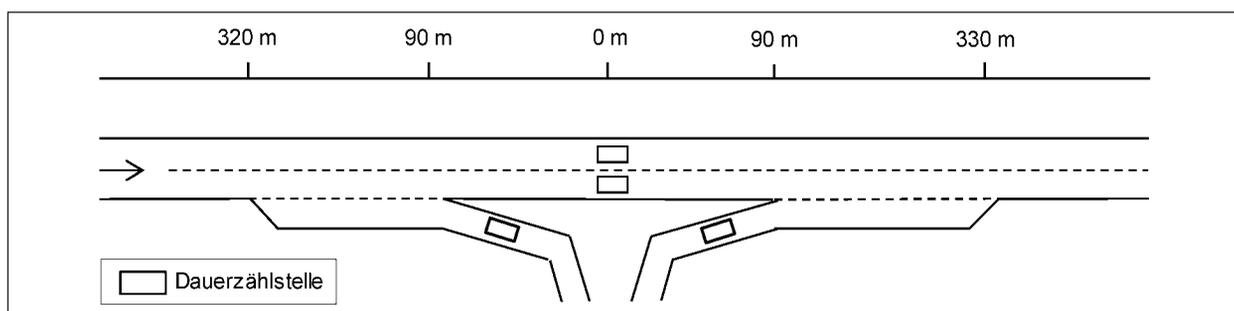


Bild 5: Simulationsmodell AS Alsfeld-West, Ausfahrtstyp A 1 und Einfahrtstyp E 1

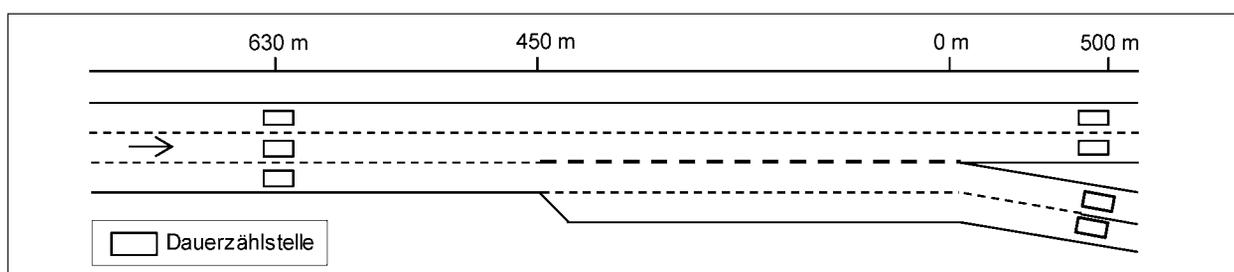


Bild 6: Simulationsmodell AK Kaiserberg, Ausfahrtstyp A 4

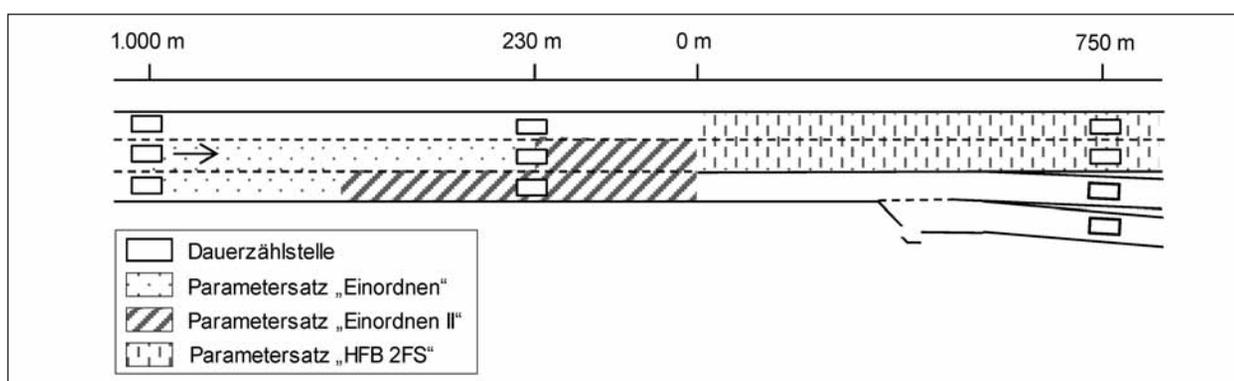


Bild 7: Simulationsmodell AK Köln-Nord, Ausfahrtstyp A 6

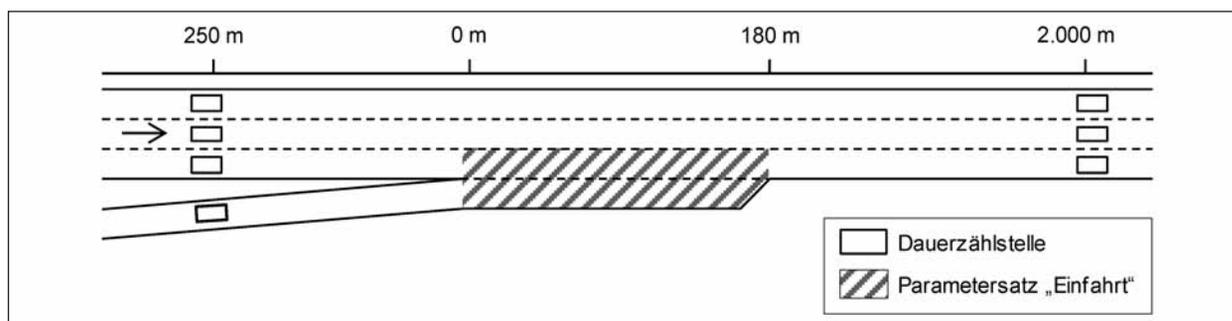


Bild 8: Simulationsmodell AS Leverkusen-Opladen, Einfahrtstyp E 1

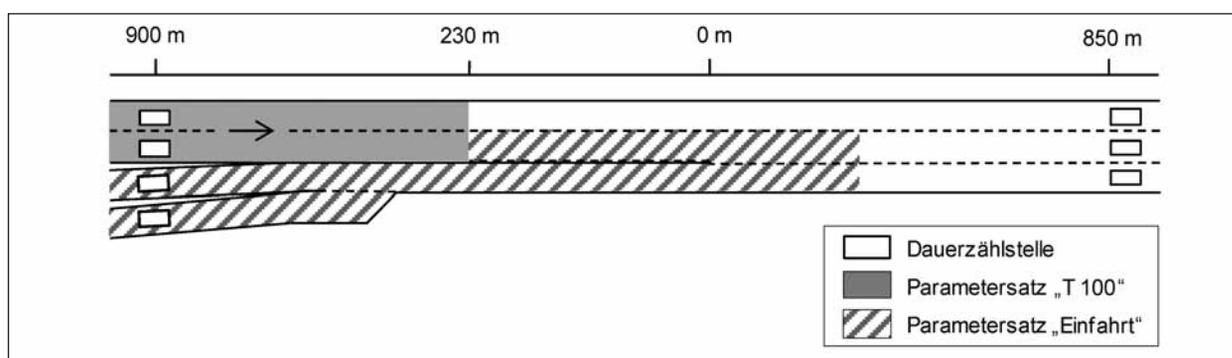


Bild 9: Simulationsmodell AK Köln-Nord, Einfahrtstyp E 3

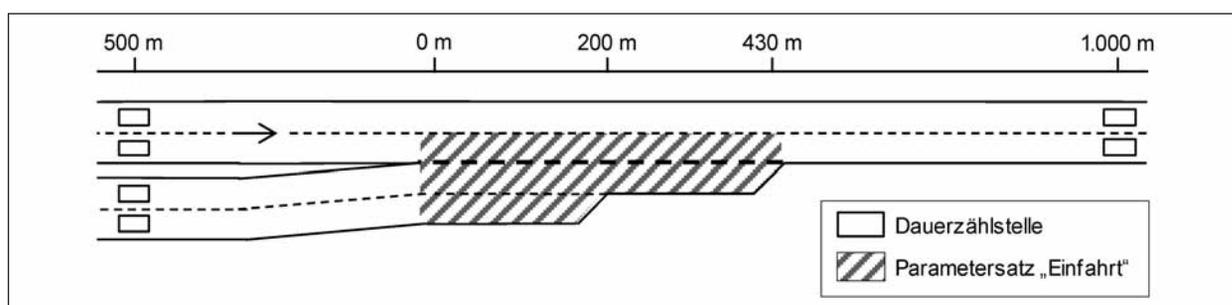


Bild 10: Simulationsmodell AK Darmstadt, Einfahrtstyp E 4

Ausfahrt auswirken. Für die Kalibrierung und Validierung des Simulationsnetzes waren 4 Parametersätze erforderlich.

Der Verkehrsablauf an Einfahrten des Typs E 1 wurde an zwei Untersuchungsstellen analysiert. Die erste Untersuchungsstelle an einer zweistreifigen Hauptfahrbahn liegt an der Anschlussstelle Alsfeld-Ost im Zuge der Autobahn A 5 in Fahrtrichtung Nord (Bild 5). Die zweite Untersuchungsstelle ist die Anschlussstelle Leverkusen-Opladen an der Autobahn A 3 in Fahrtrichtung Nord (Bild 8). Die Simulation der hochbelasteten Einfahrten erforderte für die Kalibrierung und Validierung einen weiteren Parametersatz „Einfahrt“. In diesem Bereich werden kleinere Zeitlücken zwischen den Fahrzeugen akzeptiert, die sich nach dem Ende des Einfädelvorgangs wieder entzerren.

Die Untersuchungsstelle für den Einfahrtstyp E 3 liegt – wie die Untersuchungsstelle des Ausfahrtstyps A 6 – am Autobahnkreuz Köln-Nord an der Autobahn A 1 in Fahrtrichtung Nord (Bild 9). Stromaufwärts der Einfahrt ist eine Geschwindigkeitsbeschränkung auf 100 km/h angeordnet. Im Bereich der Einfahrt wird die Geschwindigkeitsbeschränkung auf 120 km/h angehoben. Für die Modellierung der Einfahrt waren daher jeweils ein Parametersatz für die Einfahrt und ein Parametersatz für den auf 100 km/h beschränkten Bereich notwendig.

Für die Untersuchung des Einfahrtstyps E 4 wurde die Einfahrt am Darmstädter Kreuz im Zuge der A 67 in Fahrtrichtung Süd gewählt (Bild 10). Die Kalibrierung und Validierung des Netzes erforderte einen weiteren Parametersatz für die Einfahrt, um den Einfädelungsvorgang realistisch nachzubilden.

und ausfahrenden Verkehrsstärken variiert. In den Simulationsmodellen von Knotenpunktelementen an Autobahnkreuzen und -dreiecken wird ein einheitlicher Lang-Lkw-Anteil für alle Ströme (Durchfahrer sowie Aus- bzw. Einfahrer) angenommen. Für eine Ausfahrt des Typs A 1 und zwei Einfahrten des Typs E 1 an Anschlussstellen werden dagegen Szenarien analysiert, in denen Lang-Lkw ausschließlich im Durchgangsverkehr auftreten. Dies wäre im Falle einer allgemeinen Zulassung von Lang-Lkw in Deutschland an Anschlussstellen am häufigsten zu erwarten, da Lang-Lkw hauptsächlich lange Strecken zwischen Logistikzentren zurücklegen.

4.5 Bewertung des Verkehrsablaufs

Ziel der Simulationsrechnungen ist die Ermittlung des Einflusses von Lang-Lkw im Fahrzeugkollektiv auf die Kapazität von Elementen planfreier Knotenpunkte. Dies erfolgt auf der Grundlage einer Auswertung von Zusammenbrüchen des Verkehrsflusses in der Simulation. Bei hohen Verkehrsstärken können kleine Störungen des Verkehrsflusses an Knotenpunkten, z. B. durch ein- oder ausfahrende Lkw oder Fahrzeugpuls, einen Zusammenbruch des Verkehrsflusses verursachen. Dadurch ist eine große Streuung innerhalb der Ergebnisse eines Szenarios möglich. Für jedes Szenario werden daher zehn Simulationsläufe durchgeführt. Ein Simulationslauf besteht aus einer dreistündigen Ganglinie, bei der die Verkehrsstärke bis zur 2. Stunde gesteigert wird und anschließend wieder auf den Ausgangswert zurückgeht. Die Bandbreite der eingespeisten Verkehrsstärken liegt im Bereich von ca. 50 % bis 110 % der Kapazität nach HBS (201X). Die Simulationsläufe werden in 5-Minuten-Intervallen ausgewertet. Bei jedem Simulationslauf wird ein Zusammenbruch identifiziert. Als Kriterium für einen Zusammenbruch gilt das Unterschreiten einer Grenzggeschwindigkeit mit einer Geschwindigkeitsdifferenz von 10 km/h zum vorherigen 5-Minuten-Intervall. Die Grenzggeschwindigkeit wird für jede Untersuchungsstelle anhand der empirischen

Daten festgelegt und liegt bei 80 km/h bei Untersuchungsstellen ohne Geschwindigkeitsbeschränkung und 70 km/h bei Untersuchungsstellen mit Geschwindigkeitsbeschränkung. Für die Untersuchung der Verflechtungsstrecke am AK Leverkusen wurde eine Grenzggeschwindigkeit von 40 km/h in der Rampe festgelegt. Ausschlaggebend für die Festlegung der Grenzggeschwindigkeit am AK Leverkusen war die Grenze zwischen den Wertepaaren des fließenden und des gestauten Verkehrs im q-v-Diagramm. Der Mittelwert der in den Simulationsläufen identifizierten Verkehrsstärken vor dem Zusammenbruch dient als Anhaltspunkt für die Ermittlung der Kapazität von planfreien Knotenpunkten unter dem Einfluss von Lang-Lkw. Nach GEISTEFELDT (2013) kann der Mittelwert der Verkehrsstärke vor dem Zusammenbruch in 5-Minuten-Intervallen als Schätzwert der deterministischen Kapazität in Stunden-Intervallen angesehen werden.

Die in den Simulationsläufen ermittelten Kapazitäten werden anschließend zwischen den einzelnen Szenarien verglichen. Dafür werden zwei verschiedene Kennwerte berechnet.

Der erste Kennwert, $\Delta q_{PE,HO}$ für Ausfahrten bzw. $\Delta q_{PE,HU}$ für Einfahrten und Verflechtungsstrecken, beschreibt die relative Abweichung zwischen der Kapazität mit und ohne Einfluss von Lang-Lkw. Zunächst wird für jedes Szenario berechnet:

$$q_{PE,HO} = q_{PE,HU} + q_{PE,A} \quad (4-5)$$

mit

$q_{PE,HU}$ Verkehrsstärke der Hauptfahrbahn unterhalb der Ausfahrt [Pkw-E/h]

$P_{PE,HO}$ Verkehrsstärke der Hauptfahrbahn oberhalb der Ausfahrt [Pkw-E/h]

$q_{PE,A}$ Verkehrsstärke in der Ausfahrt [Pkw-E/h]

bzw.:

$$q_{PE,HU} = q_{PE,HO} + q_{PE,E} \quad (4-6)$$

mit

$q_{PE,HO}$ Verkehrsstärke der Hauptfahr-
bahn oberhalb der Einfahrt [Pkw-E/h]

$q_{PE,HU}$ Verkehrsstärke der Hauptfahr-
bahn unterhalb der Einfahrt [Pkw-E/h]

$q_{PE,E}$ Verkehrsstärke in der Einfahrt [Pkw-E/h]

Der Kennwert für Ausfahrten wird wie folgt berech-
net:

$$\Delta q_{PE,HO,b_{SV,LL}} = \frac{q_{E,HO,b_{SV,LL}}}{q_{PE,HO,0}} - 1 \quad (4-7)$$

mit

$b_{SV,LL}$ 1 %, 2 %, 5 %

$q_{PE,HO,0}$ Verkehrsstärke der Hauptfahr-
bahn oberhalb der Ausfahrt
für $b_{SV,LL} = 0$ % [Pkw-E/h]

Der Kennwert für Einfahrten wird analog berechnet:

$$\Delta q_{PE,HU,b_{SV,LL}} = \frac{q_{E,HU,b_{SV,LL}}}{q_{PE,HU,0}} - 1 \quad (4-8)$$

mit

$b_{SV,LL}$ 1 %, 2 %, 5 %

$q_{PE,HU,0}$ Verkehrsstärke der Hauptfahr-
bahn unterhalb der Einfahrt
für $b_{SV,LL} = 0$ % [Pkw-E/h]

Der zweite Kennwert $\Delta QSV F$ dient als Maß für die Abweichung der Ergebnisse der Simulationsläufe zu den nach HBS (201X) maßgebenden Werten. Jeder Mittelwert der Zusammenbrüche eines Szenarios besteht aus einer Verkehrsstärke auf der Hauptfahrbahn und einer Verkehrsstärke in der Ein- oder Ausfahrt. In den HBS-Bemessungsdiagrammen werden diese als x- und y-Koordinaten eingetragen. Für die Ermittlung des Kennwerts wird zunächst die Gerade durch den betrachteten Punkt und den Ursprung bestimmt. Diese Gerade hat genau einen Schnittpunkt mit der Kurve, welche die Grenze zwischen den Qualitätsstufen (QSV) E und F im Bemessungsdiagramm des HBS (201X) definiert. Der Abstand zwischen dem Ursprung und dem Schnittpunkt wird als A_{HBS} bezeichnet. Der Kennwert $\Delta QSV F$ wird dann wie folgt berechnet:

$$\Delta QSV F = \frac{A_{LL}}{A_{HBS}} = \frac{\sqrt{(q_{PE,H})^2 + (q_{PE,E/A})^2}}{A_{HBS}} - 1 \quad (4-9)$$

mit

A_{LL} Abstand vom Ursprung zum
betrachteten Kapazitätswert
eines Szenarios [Pkw-E/h]

A_{HBS} Abstand vom Ursprung zum
Schnittpunkt der Verkehrsstärke
der Hauptfahrbahn unterhalb der
Einfahrt [Pkw-E/h]

$q_{PE,H}$ Verkehrsstärke der jeweils
maßgebenden Hauptfahrbahn [Pkw-E/h]

$q_{PE,E/A}$ Verkehrsstärke in der Einfahrt/
Ausfahrt [Pkw-E/h]

5 Simulationsergebnisse

5.1 Ausfahrten

5.1.1 Ausfahrttyp A 1

Der Ausfahrttyp A 1 wurde an drei verschiedenen Untersuchungsstellen untersucht. Die Simulationsergebnisse für die Ausfahrten an dreistreifigen Hauptfahrbahnen sind in Bild 13 und Bild 14 dargestellt. In beiden Fällen sind sich die Simulationsergebnisse sehr ähnlich. Die Mittelwerte der Verkehrsstärken vor dem Zusammenbruch liegen relativ nah beieinander. In den meisten Fällen werden die höchsten Verkehrsstärken in den Szenarien ohne Lang-Lkw erreicht. Die Werte bei hohen Verkehrsstärken in der Ausfahrt liegen dabei deutlich über der Grenze zur Qualitätsstufe F nach HBS (201X).

Bild 15 zeigt die Simulationsergebnisse für die Untersuchungsstelle AS Alsfeld-West mit dem Ausfahrttyp A 1 an einer zweistreifigen Richtungsfahrbahn. Die mittleren Verkehrsstärken vor dem Zusammenbruch liegen in allen Szenarien nah an den Kapazitäten nach HBS (201X). Insgesamt unterscheiden sich die Ergebnisse für die Szenarien mit und ohne Lang-Lkw nur geringfügig. Dabei ist die Streuung der Einzelwerte vergleichsweise groß.

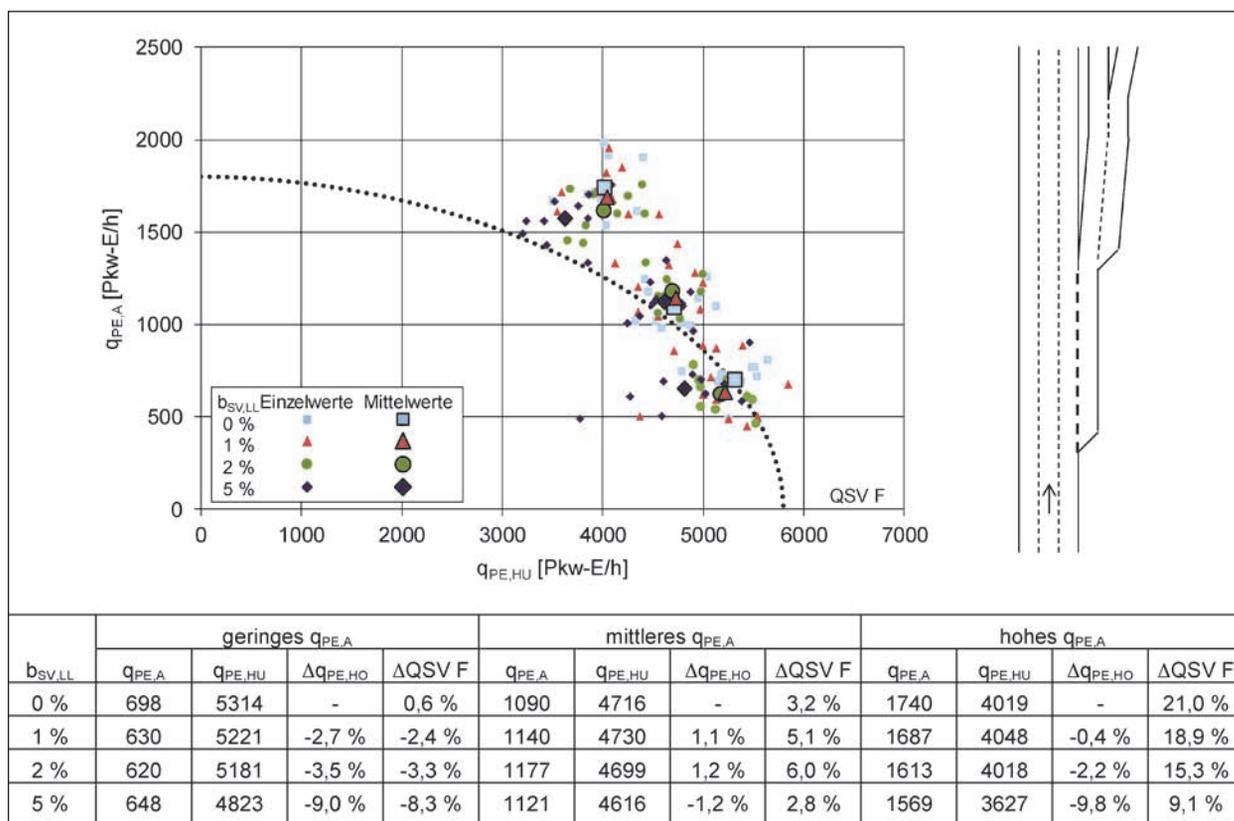


Bild 13: Simulationsergebnisse für den Ausfahrttyp A 1, AK Oberhausen, 10%-SV-Anteil mit unterschiedlichen Lang-Lkw-Anteilen

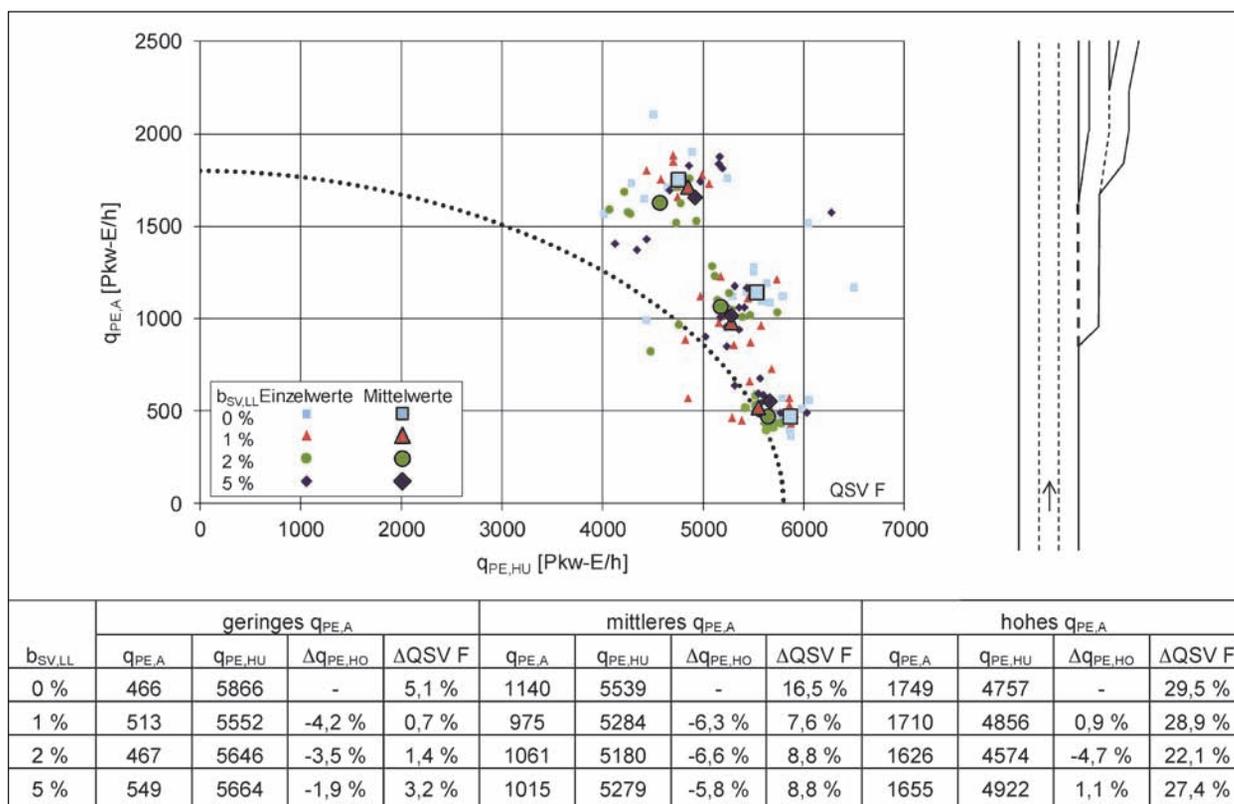


Bild 14: Simulationsergebnisse für den Ausfahrttyp A 1, AS/AK Bottrop, 10%-SV-Anteil mit unterschiedlichen Lang-Lkw-Anteilen

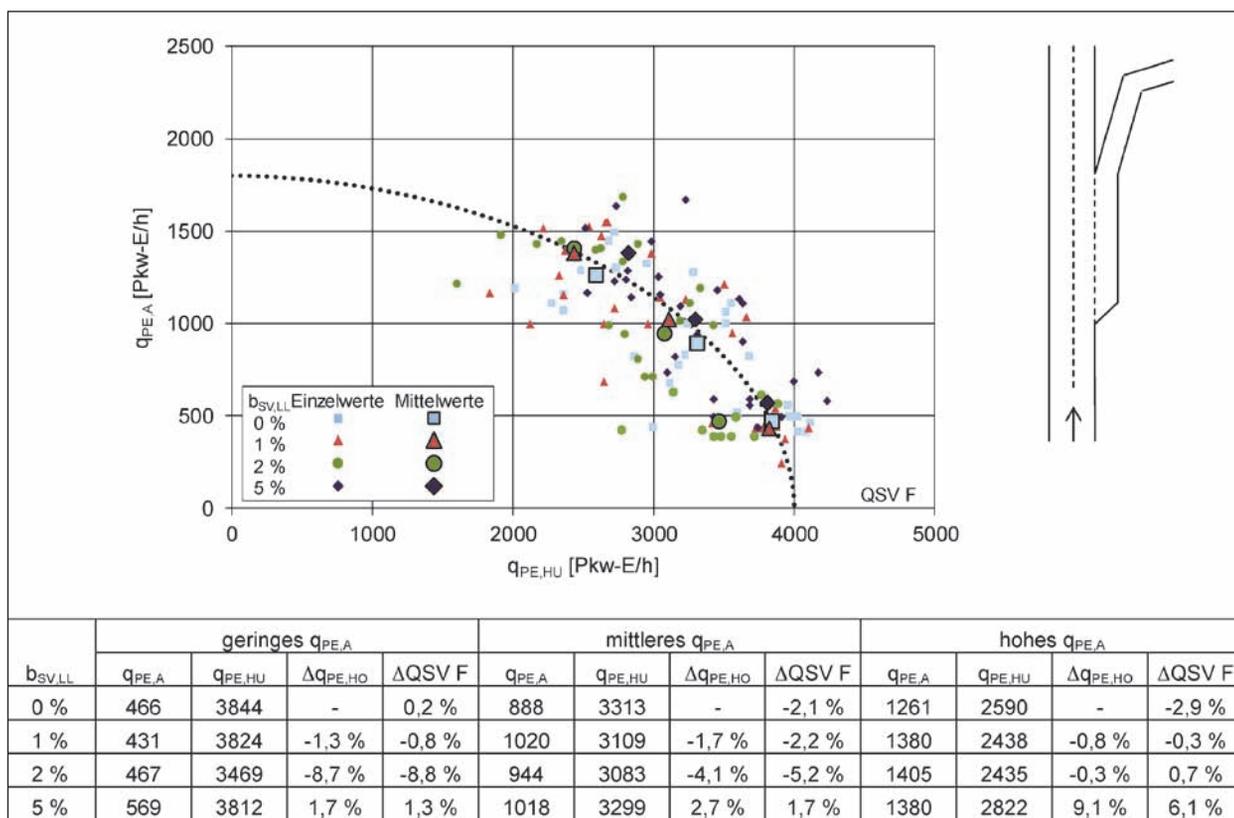


Bild 15: Simulationsergebnisse für den Ausfahrttyp A 1, AS Alsfeld-West, 10%-SV-Anteil mit unterschiedlichen Lang-Lkw-Anteilen

5.1.2 Ausfahrttyp A 4

Die Ergebnisse der Simulationen des Ausfahrttyps A 4 am AK Kaiserberg in Bild 16 zeigen, dass in allen Fällen die Kapazitäten der Szenarien mit und ohne Lang-Lkw nahe beieinander liegen. Die relative Abweichung zwischen den verschiedenen Szenarien liegt größtenteils unter 5 %. Insgesamt können keine negativen Auswirkungen der Lang-Lkw festgestellt werden.

5.1.3 Ausfahrttyp A 6

Für den Ausfahrttyp A 6 mit Fahrstreifenabstraktion am AK Köln-Nord wurde nur ein Verhältnis zwischen der Stärke des aus- und durchfahrenden Verkehrs analysiert, da bei diesem Ausfahrttyp im Wesentlichen der Einfluss von Fahrstreifenwechseln durch Lang-Lkw stromaufwärts der Ausfahrt von Bedeutung ist. Die Simulationsergebnisse in Bild 17 zeigen vergleichbare Ergebnisse für die unterschiedlichen Lang-Lkw-Anteile. Die mittlere Verkehrsstärke vor dem Zusammenbruch Kapazität liegt in allen Szenarien über der Kapazität nach HBS (201X).

5.2 Einfahrten

5.2.1 Einfahrttyp E 1

Der Einfahrttyp E 1 wurde an je einer Anschlussstelle an einer zweistreifigen und einer dreistreifigen Richtungsfahrbahn analysiert. Die ermittelten Kapazitäten der AS Leverkusen-Opladen (Bild 18) liegen im Bereich der Qualitätsstufen E und F nach HBS (201X). Die Abnahme der Kapazität infolge der Lang-Lkw beträgt bis zu 5,5 %. Bei hohen Einfahrverkehrsstärken $q_{PE,E}$ ist jedoch kaum ein Unterschied zwischen den Simulationen mit und ohne Lang-Lkw festzustellen.

Die Simulationsergebnisse der Untersuchungsstelle AS Alsfeld-West sind in Bild 19 dargestellt. Bei geringen und mittleren Einfahrverkehrsstärken liegen die Kapazitäten nahe der Grenze zwischen Qualitätsstufen E und F nach HBS (201X). Bei mittleren Einfahrverkehrsstärken liegen die Kapazitäten der Szenarien ohne Lang-Lkw und mit Lang-Lkw um maximal 10,5 % auseinander. Bei hohen Einfahrverkehrsstärken liegen alle mittleren Kapazitäten weit im Bereich der Qualitätsstufe F. Auch hier nimmt die Kapazität mit zunehmendem Lang-Lkw-Anteil ab.

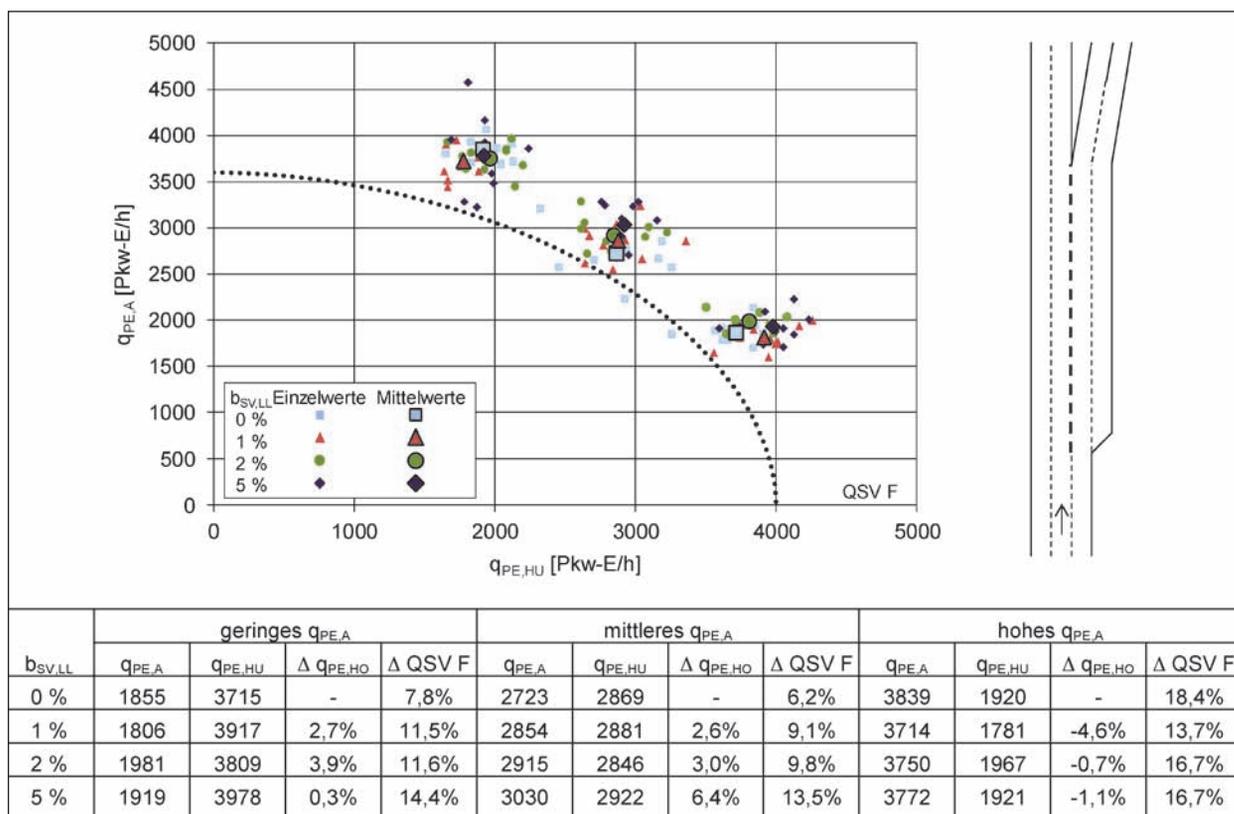


Bild 16: Simulationsergebnisse für den Ausfahrttyp A 4, AK Kaiserberg, 10%-SV-Anteil mit unterschiedlichen Lang-Lkw-Anteilen

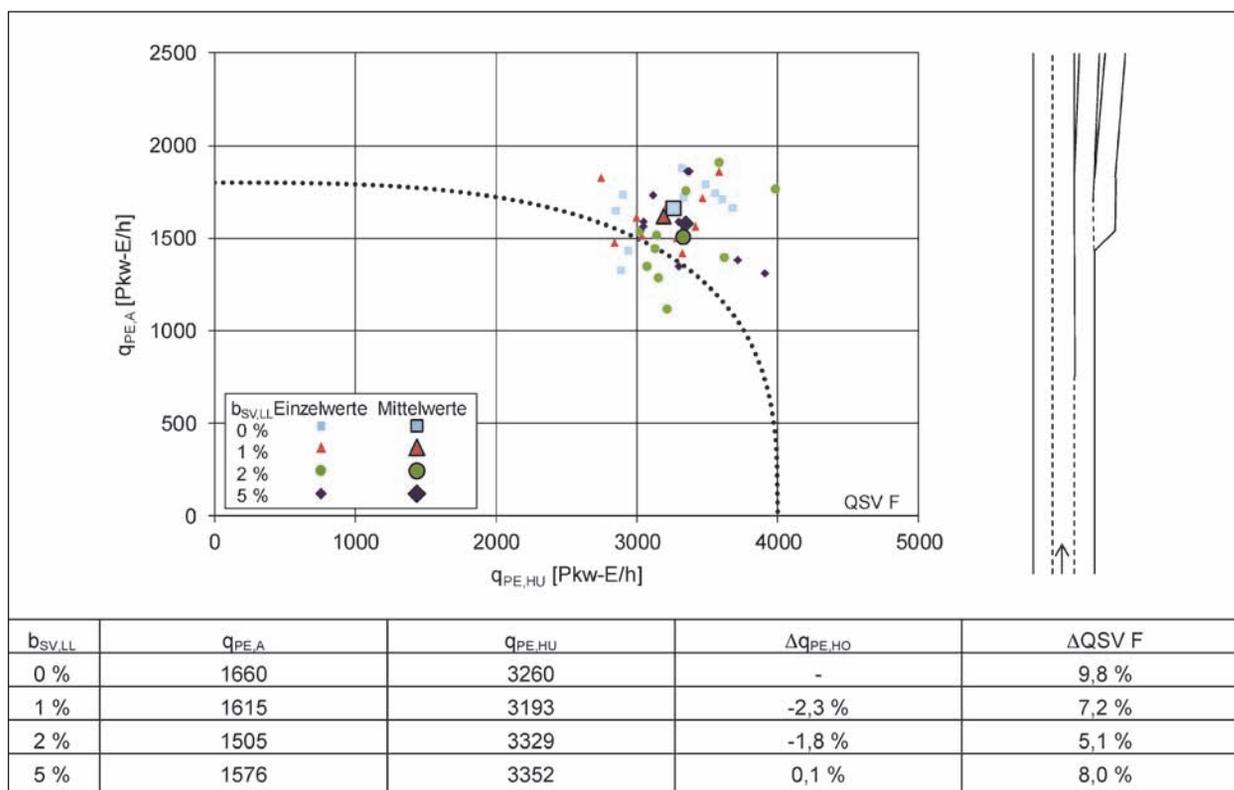


Bild 17: Simulationsergebnisse für den Ausfahrttyp A 6, AK Köln-Nord, 10%-SV-Anteil mit unterschiedlichen Lang-Lkw-Anteilen

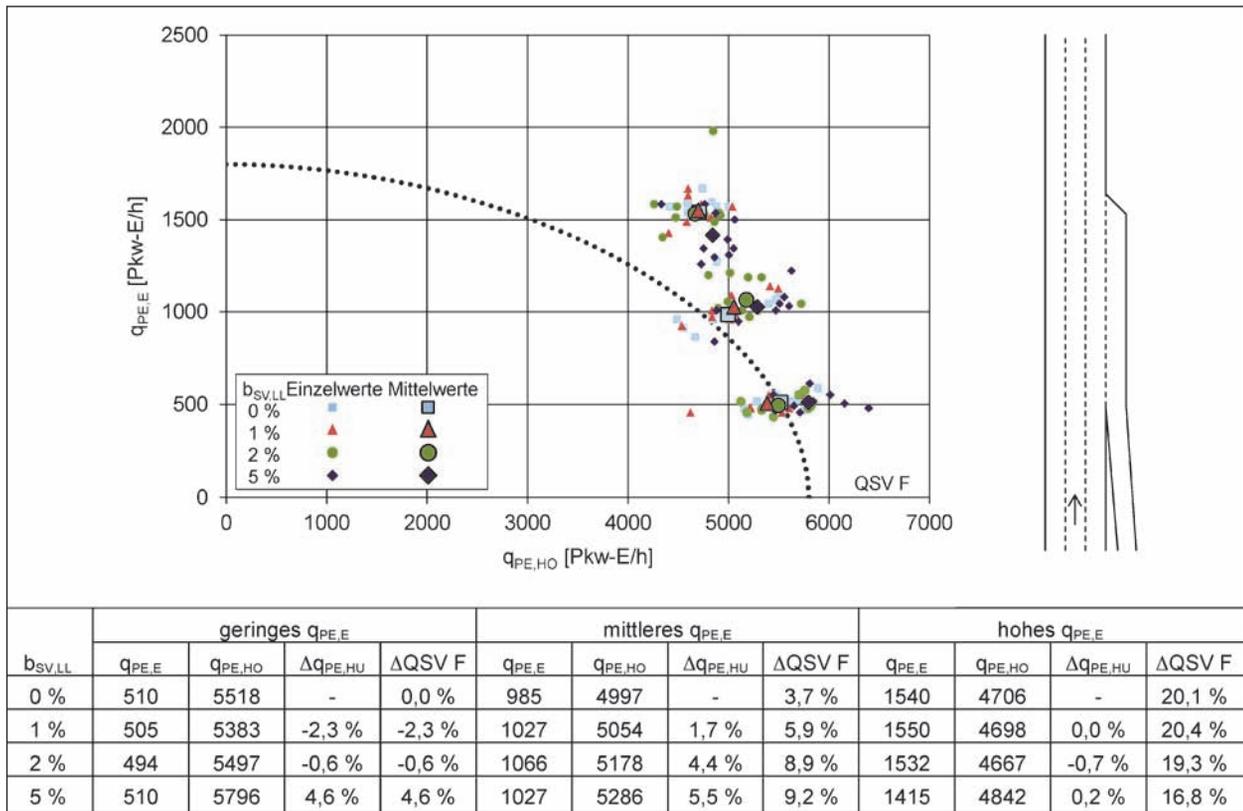


Bild 18: Simulationsergebnisse für den Einfahrtstyp E 1, AS Leverkusen-Opladen, 10%-SV-Anteil mit unterschiedlichen Lang-Lkw-Anteile

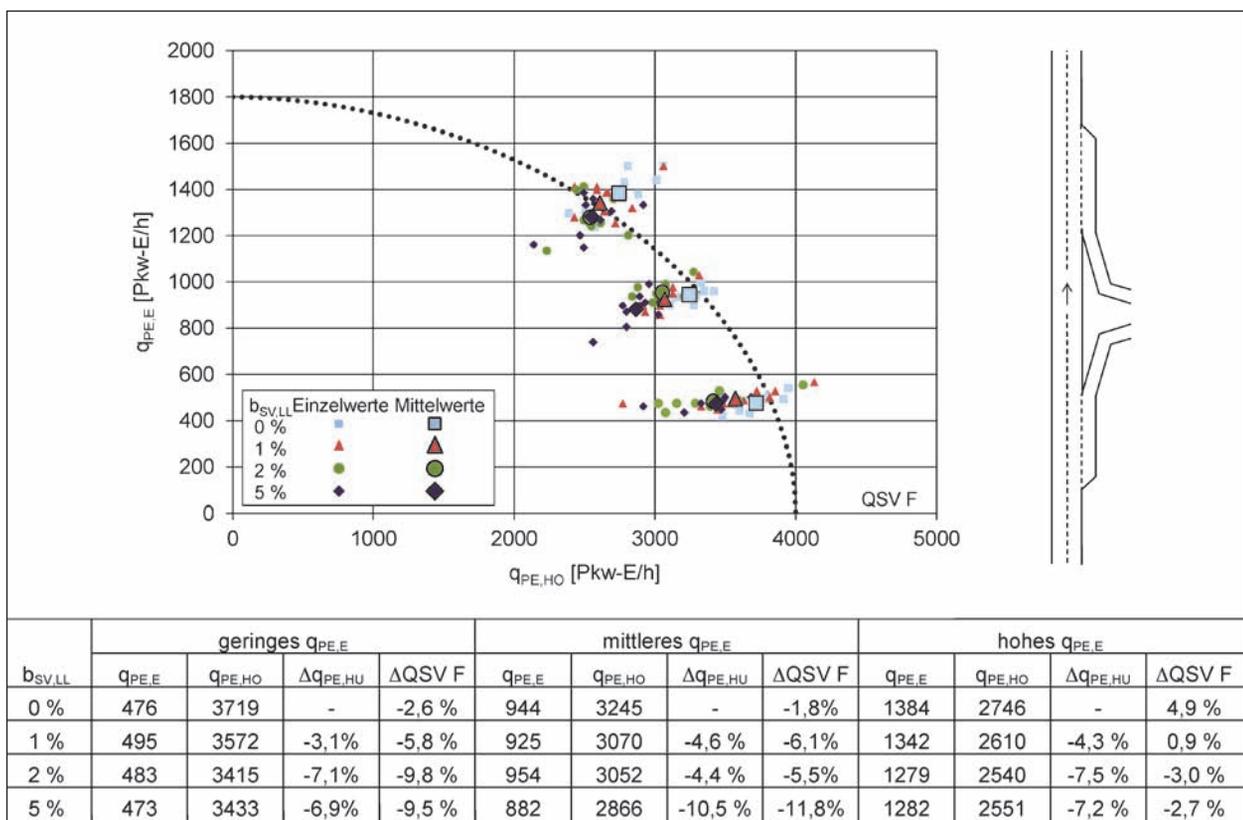


Bild 19: Simulationsergebnisse für den Einfahrtstyp E 1, AS Alsfeld-West, 10%-SV-Anteil mit unterschiedlichen Lang-Lkw-Anteilen

Die Untersuchung des Einfahrtstyps E 1 zeigt, dass der Einfluss der Lang-Lkw an einer dreistreifigen Richtungsfahrbahn (AS Leverkusen-Opladen) geringer ausfällt als an einer zweistreifigen Richtungsfahrbahn (AS Alsfeld-West).

5.2.2 Einfahrtstyp E 3

Für den Einfahrtstyp E 3 wird nur ein Verhältnis der Einfahrverkehrsstärke zur Verkehrsstärke auf der Hauptfahrbahn simuliert, da davon ausgegangen wird, dass entweder die Hauptfahrbahn vor der Fahrstreifenaddition oder die Einfahrt den Engpass darstellt. In der Simulation wurde überprüft, ob die Fahrstreifenwechsel bei hohen Verkehrsstärken auf der Hauptfahrbahn und in der Einfahrt Störungen des Verkehrsflusses verursachen, da die durchfahrenden Lang-Lkw auf den rechten Fahrstreifen wechseln müssen und gleichzeitig die einfahrenden Pkw Fahrstreifenwechsel nach links durchführen.

In Bild 20 sind die Simulationsergebnisse der drei Szenarien dargestellt. Bei einer Erhöhung des Lang-Lkw-Anteils ist keine große Veränderung der Kapazität zu erkennen.

5.2.3 Einfahrtstyp E 4

Der Einfahrtstyp E 4 wurde am AK Darmstadt an einer zweistreifigen Richtungsfahrbahn analysiert (Bild 21). Bei allen Einfahrverkehrsstärken nehmen die mittleren Verkehrsstärken vor dem Zusammenbruch mit zunehmendem Lang-Lkw-Anteil ab. Dabei liegen die Simulationsergebnisse nah an der Kapazität nach HBS (201X). Somit ergibt sich für den Einfahrtstyp E 4 ein kapazitätsmindernder Einfluss der Lang-Lkw. Bei hohen Einfahrverkehrsstärken ist der Unterschied zum Zustand ohne Lang-Lkw besonders hoch. Eine Erklärung ist, dass durch die Geometrie des Knotenpunktes einfahrende Lang-Lkw zwei Fahrstreifenwechsel durchführen müssen.

5.2.4 Einfahrtstyp E 5

Die Simulationsergebnisse der verschiedenen Szenarien für den Einfahrtstyp E 5 am AK Kaiserberg (Bild 22) weisen nur geringe Unterschiede auf. Die mittleren Verkehrsstärken vor dem Zusammenbruch in den Szenarien mit Lang-Lkw liegen bei niedrigen Einfahrverkehrsstärken im Mittel sogar geringfügig über denen des Szenarios ohne Lang-Lkw, was jedoch durch die erhebliche zufällige

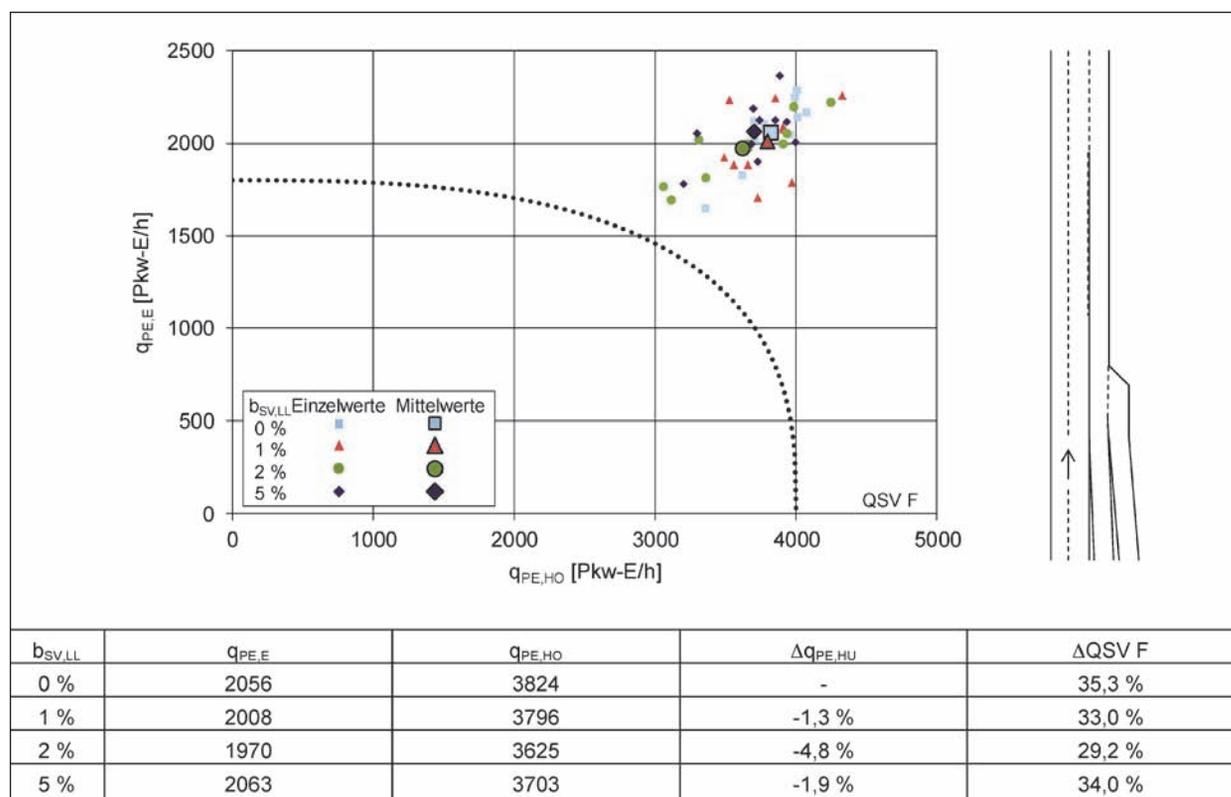


Bild 20: Simulationsergebnisse für den Einfahrtstyp E 3, AK Köln-Nord, 10%-SV-Anteil mit unterschiedlichen Lang-Lkw-Anteilen

Streuung der Einzelwerte zu erklären ist. Insgesamt zeigen sich für den Einfahrtstyp E 5 keine nennenswerten Auswirkungen der Lang-Lkw auf den Ver-

kehrsablauf. Die mittleren Verkehrsstärken vor dem Zusammenbruch liegen um etwa 10 % über der Grenze zur Qualitätsstufe F nach HBS (201X).

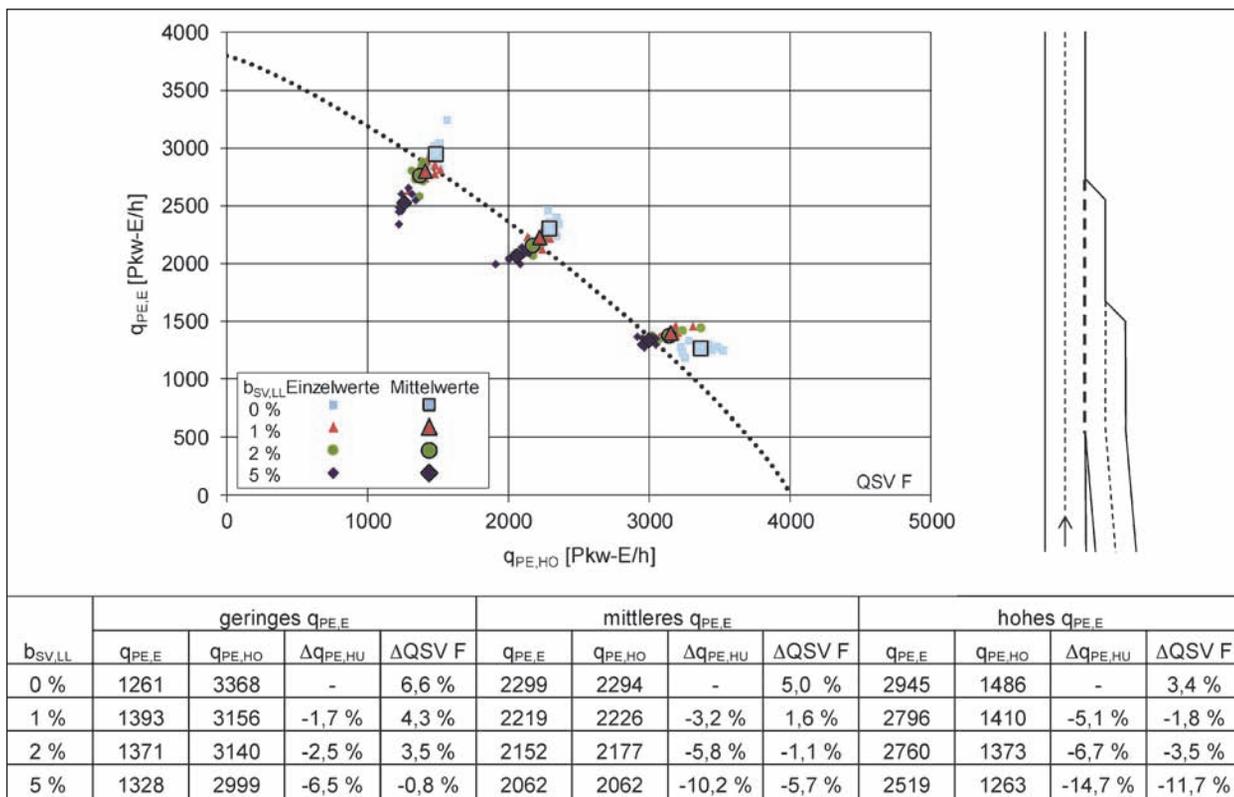


Bild 21: Simulationsergebnisse für den Einfahrtstyp E 4, AK Darmstadt, 10%-SV-Anteil mit unterschiedlichen Lang-Lkw-Anteilen

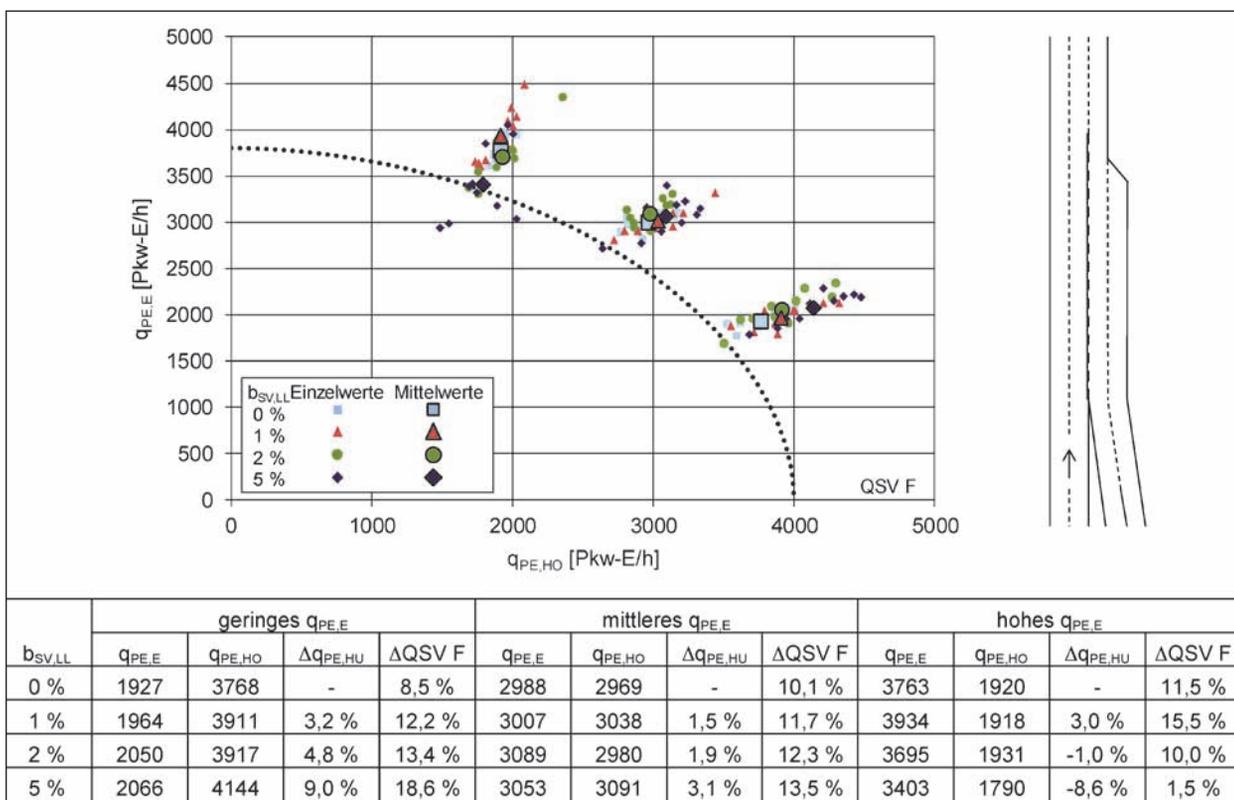


Bild 22: Simulationsergebnisse für den Einfahrtstyp E 5, AK Kaiserberg, 10%-SV-Anteil mit unterschiedlichen Lang-Lkw-Anteilen

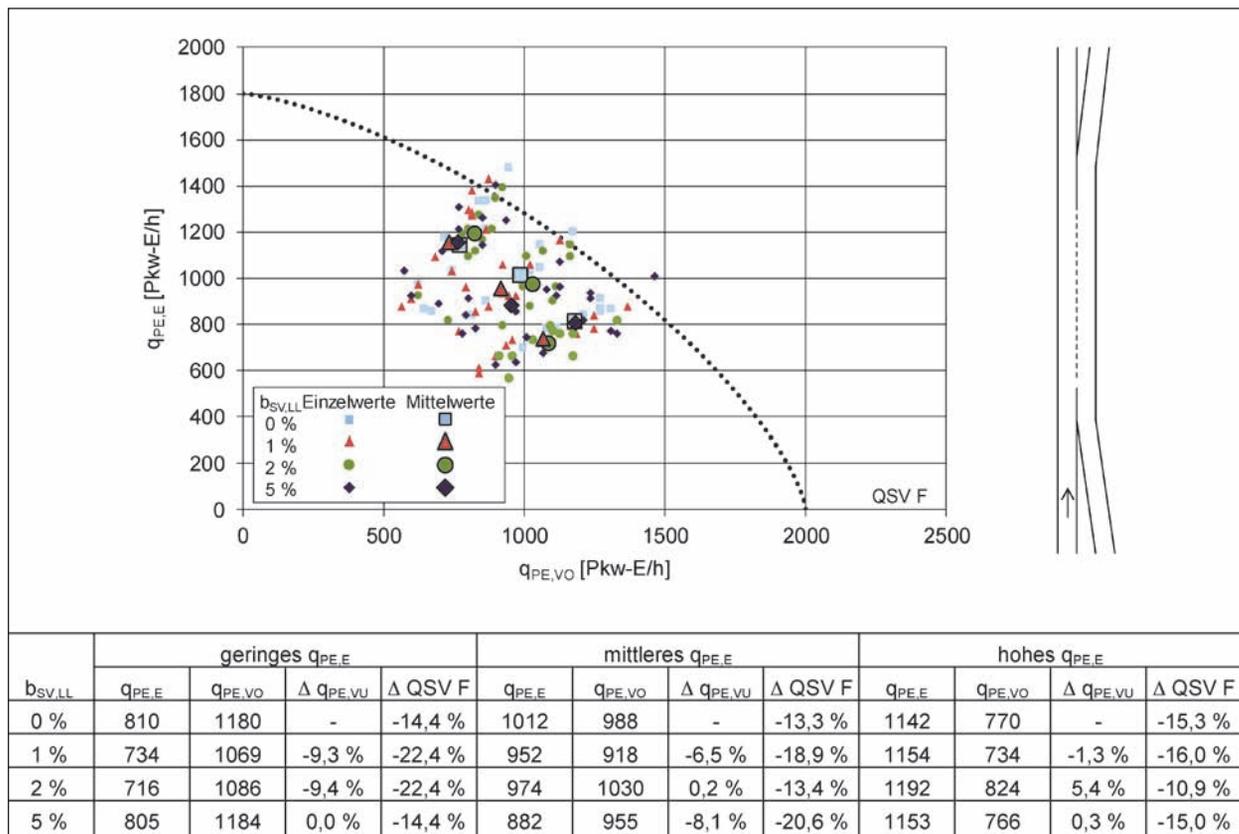


Bild 23: Simulationsergebnisse für den Verflechtungstyp VR 1, AK Leverkusen, 10%-SV-Anteil mit unterschiedlichen Lang-Lkw-Anteilen

5.3 Verflechtungsstrecken

Bei der untersuchten Verflechtungsstrecke vom Typ VR 1 am AK Leverkusen sind drei Szenarien mit unterschiedlichen Verhältnissen der Verkehrsstärken verflechtender Fahrzeugströme gewählt worden (Bild 23). Die mittleren Verkehrsstärken vor dem Zusammenbruch liegen teilweise deutlich unter der Kapazität nach HBS (201X). In allen Fällen liegen die Kapazitäten der Szenarien mit und ohne Lang-Lkw sehr nahe beieinander. Die Abweichung der verschiedenen Szenarien liegt größtenteils unter 5 %. Insgesamt können keine negativen Auswirkungen der Lang-Lkw festgestellt werden.

5.4 Zusammenfassung und Signifikanztest

Insgesamt zeigen die Simulationsergebnisse für die meisten Elemente geringe Abweichungen zwischen den mittleren Verkehrsstärken vor dem Zusammenbruch für die einzelnen Szenarien bei gleichzeitig hoher Streuung der Einzelwerte. Die Ergebnisse sämtlicher Szenarien wurden daher einem Signifikanztest (t-Test) unterzogen, um den Einfluss der

Streuung der Einzelwerte in den Simulationsläufen bei der Bewertung der Abweichungen zwischen den mittleren Kapazitäten zu berücksichtigen. Die Verkehrsstärken vor dem Zusammenbruch in jedem Szenario wurden dafür näherungsweise als normalverteilt angenommen. Als Signifikanzniveau wurde $\alpha = 5 \%$ gewählt. Das Szenario ohne Lang-Lkw diente jeweils als erste Stichprobe und wurde mit dem Szenario mit 1 %, 2 % und 5 % Lang-Lkw verglichen (zweite Stichprobe). Es wurde die Hypothese untersucht, dass die Mittelwerte der Grundgesamtheit der beiden Stichproben gleich sind. Die Fälle, in denen diese Hypothese nicht bestätigt werden konnte und somit eine signifikante Abweichung der mittleren Kapazitäten vorlag, sind in Tabelle 4 durch Fettdruck gekennzeichnet. Die Auswertung ergibt, dass die Abweichungen zwischen den Szenarien überwiegend nicht signifikant sind, d. h. dass die Lang-Lkw die Kapazität des jeweiligen Knotenelements nicht signifikant beeinflussen. Die signifikanten Abweichungen betreffen meist Rückgänge der Kapazität mit zunehmendem Lang-Lkw-Anteil. Besonders auffällig sind Ergebnisse der Untersuchungsstellen AS Alsfeld-West und AK Darmstadt, also den Einfahrtstypen E 1 und E 4 an zweistreifiger Richtungsfahrbahn. Die Simulations-

$b_{SV,LL}$	1 %			2 %			5 %		
	gering	mittel	hoch	gering	mittel	hoch	gering	mittel	hoch
A 1, AK Oberhausen, n = 3	-2,70 %	1,09 %	-0,41 %	-3,51 %	1,20 %	-2,22 %	-9,00 %	-1,20 %	-9,76 %
A 1, AS/AK Bottrop, n = 3	-4,22 %	-6,28 %	0,92 %	-3,47 %	-6,56 %	-4,71 %	-1,88 %	-5,77 %	1,08 %
A 1, AS Alsfeld-West, n = 2	-1,25 %	-1,71 %	-0,84 %	-8,66 %	-4,14 %	-0,28 %	1,67 %	2,74 %	9,13 %
A 4, AK Kaiserberg, n = 2	2,74 %	2,55 %	5,90 %	3,94 %	3,03 %	2,05 %	5,86 %	6,44 %	-1,15 %
A 6, AK Köln-Nord, n = 3	-2,27 %			-1,76 %			0,15 %		
E 1, AS Leverkusen-Opladen, n = 3	-2,31 %	1,66 %	0,04 %	-0,60 %	4,37 %	-0,75 %	4,62 %	5,54 %	0,17 %
E 1, AS Alsfeld-West, n = 2	-3,06 %	-4,62 %	-4,29 %	-7,09 %	-4,37 %	-7,52 %	-6,90 %	-10,54 %	-7,17 %
E 3, AK Köln-Nord, n = 2	-1,31 %			-4,84 %			-1,94 %		
E 4, AK Darmstadt, n = 2	-1,75 %	-3,25 %	-5,09 %	-2,55 %	-5,78 %	-6,73 %	-6,54 %	-10,23 %	-14,66 %
E 5, AK Kaiserberg, n = 2	3,16 %	1,49 %	2,96 %	4,76 %	1,87 %	-1,01 %	9,04 %	3,14 %	-8,61 %
VR 1, AK Leverkusen	-9,35 %	-6,48 %	-1,25 %	-9,41 %	0,24 %	5,40 %	0,00 %	-8,10 %	0,31 %

Tab. 4: Mittelwerte des Kennwerts $\Delta q_{PE,HO}$ (bei Ausfahrten), $\Delta q_{PE,HU}$ (bei Einfahrten) und $\Delta q_{PE,VU}$ (in Verflechtungsstrecken) in Abhängigkeit vom Lang-Lkw-Anteil, signifikante Veränderungen sind durch Fettdruck hervorgehoben, n = Anzahl der Fahrstreifen auf der Hauptfahrbahn stromaufwärts (Einfahrten) bzw. stromabwärts (Ausfahrten)

ergebnisse zeigen hier eine deutliche Reduktion der Kapazität, vor allem bei höheren Lang-Lkw-Anteilen. Im Falle des Einfahrtstyps E 4 ist dies dadurch zu erklären, dass die einfahrenden Lang-Lkw zwei Fahrstreifenwechsel durchführen müssen.

6 Ermittlung von Pkw-Gleichwerten für Lang-Lkw

Mit dem Einsatz von Lang-Lkw wird u. a. das Ziel einer Reduzierung der Anzahl der Schwerverkehrsfahrzeuge verfolgt. Hinsichtlich der Ladekapazität wird davon ausgegangen, dass zwei Lang-Lkw drei konventionelle Lkw ersetzen können. Vor diesem Hintergrund wurden an ausgewählten Untersuchungsstellen Simulationen durchgeführt, bei denen ein Referenzszenario ohne Lang-Lkw mit einem Szenario mit einem hinsichtlich der Ladekapazität äquivalenten Schwerverkehrsaufkommen verglichen wurde. Für das Referenzszenario wurde der Schwerverkehrsanteil $b_{SV} = 15\%$ gewählt, im zweiten Szenario der Schwerverkehrsanteil $b_{SV} = 14\%$ mit einem Lkw-Anteil von $b_{SV,Lkw} = 12\%$ und einem Lang-Lkw-Anteil von $b_{SV,LL} = 2\%$.

Neben dem Vergleich dieser beiden Szenarien wird anhand dieser Untersuchungsstellen auch untersucht, welcher Pkw-Gleichwert für einen Lang-Lkw angesetzt werden muss, damit die Kapazität des Szenarios mit Lang-Lkw der Kapazität im Zustand ohne Lang-Lkw entspricht. Üblicherweise kann die

Verkehrsstärke folgendermaßen umgerechnet werden:

$$q_{PE} = q_{Pkw} + f_{PE} \cdot q_{SV} \quad (6-1)$$

mit

q_{PE} Verkehrsstärke in Pkw-E/h [Pkw-E/h]

q_{Pkw} Verkehrsstärke der Pkw [Kfz/h]

f_{PE} Gleichwert zur Umrechnung der Schwerverkehrsstärke in Pkw-Einheiten 2,0 (nach HBS 201X) [Pkw-E/Lkw]

q_{SV} Verkehrsstärke des Schwerverkehrs [Kfz/h]

Für die Anpassung des Umrechnungsfaktors der Lang-Lkw wird folgende Formel verwendet:

$$q_{PE} = q_{Pkw} + f_{PE,Lkw} \cdot q_{SV,Lkw} + f_{PE,LL} \cdot q_{SV,LL} \quad (6-2)$$

mit

$f_{PE,Lkw}$ Gleichwert zur Umrechnung der Lkw-Verkehrsstärke in Pkw-Einheiten 2,0 (nach HBS 201X) [Pkw-E/Lkw]

$q_{SV,Lkw}$ Verkehrsstärke des Schwerverkehrs ohne Lang-Lkw [Kfz/h]

$f_{PE,LL}$ Gleichwert zur Umrechnung der Lang-Lkw-Verkehrsstärke in Pkw-Einheiten [Pkw-E/Lang-Lkw]

$q_{SV,LL}$ Verkehrsstärke der Lang-Lkw [Kfz/h]

Der Gleichwert für die Lang-Lkw wird für jede Untersuchungsstelle durch eine Minimierung der Fehlerquadrate zwischen den mittleren Verkehrsstärken vor dem Zusammenbruch der einzelnen Szenarien ermittelt.

6.1 Ausfahrten

In Bild 24 bis Bild 28 sind die Simulationsergebnisse der untersuchten Ausfahrten dargestellt. Aus den Simulationsergebnissen lässt sich kein eindeutiges Ergebnis ableiten, für welches Szenario sich die höhere Kapazität ergibt. Bei der Untersuchungsstelle AK Kaiserberg (Ausfahrttyp A 4) erhöhen sich die Verkehrsstärken vor dem Zusammenbruch bei einer Reduzierung des Schwerverkehrsanteils durch den Einsatz von Lang-Lkw. Beim Ausfahrttyp A 1 ist an der Untersuchungsstelle AS Alsfeld-West (zweistreifige Hauptfahrbahn) eine Reduktion der Verkehrsstärken vor

dem Zusammenbruch im Szenario mit Lang-Lkw zu erkennen. An den Untersuchungsstellen AK Oberhausen und AS/AK Bottrop mit dreistreifigen Hauptfahrbahnen ist bei niedrigen und mittleren Ausfahrtverkehrsstärken kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Szenarien zu erkennen, bei hohen Ausfahrtverkehrsstärken ergibt sich einmal eine Zunahme und einmal eine Abnahme der Verkehrsstärken vor dem Zusammenbruch im Szenario mit Lang-Lkw.

Die Auswertung der Pkw-Gleichwerte ergibt an den Untersuchungsstellen AK Bottrop, AK Kaiserberg und AK Köln-Nord durch den positiven Einfluss der Lang-Lkw einen Gleichwert unter 2,0 Pkw-E/Lang-Lkw. Der ermittelte Pkw-Gleichwert für die Untersuchungsstelle AK Oberhausen liegt bei 3,4 und für die Untersuchungsstelle AS Alsfeld-West bei 6,1.

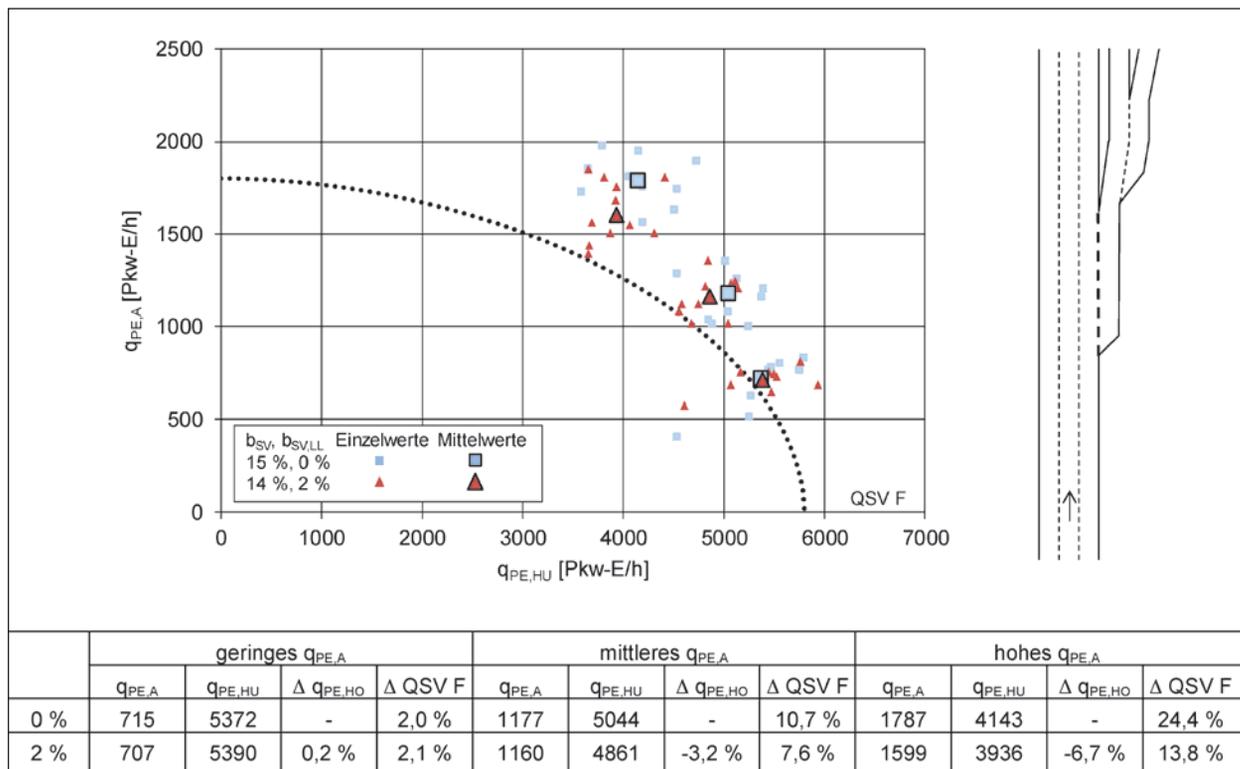


Bild 24: Simulationsergebnisse für den Ausfahrttyp A 1, AK Oberhausen, ohne Lang-Lkw und mit 2 % Lang-Lkw

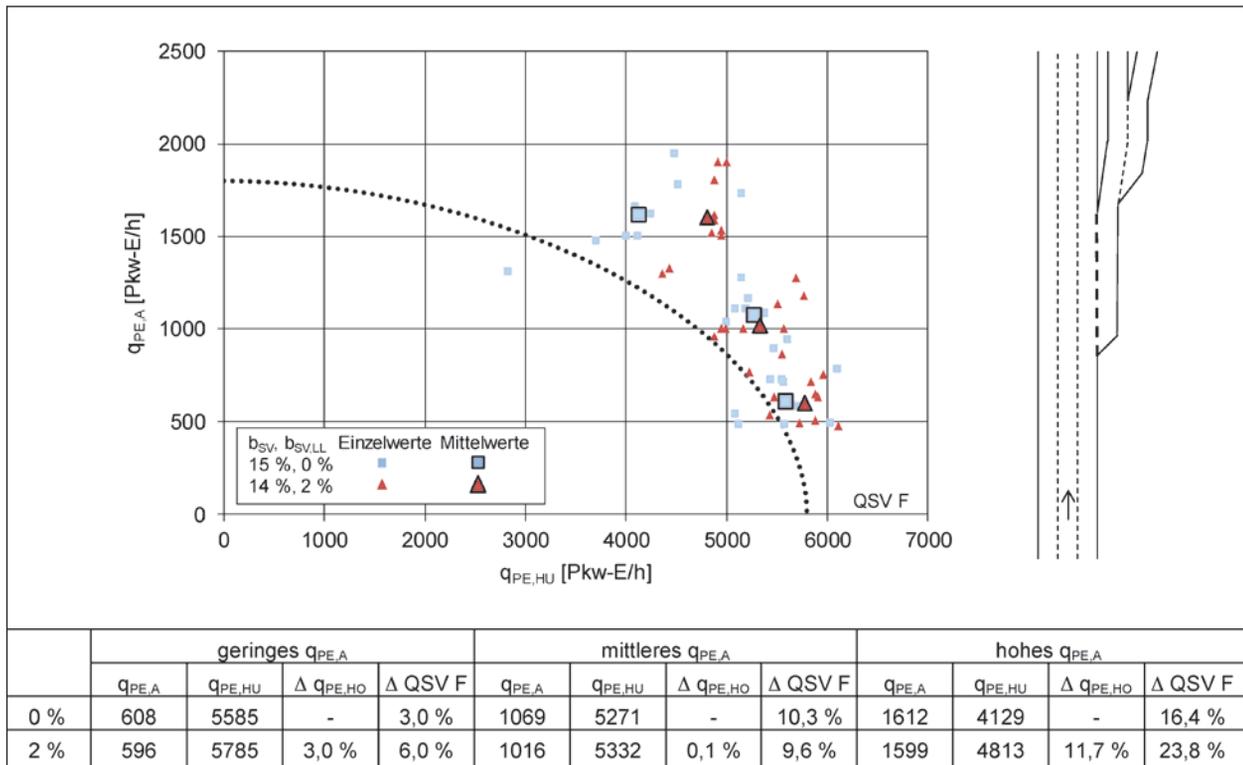


Bild 25: Simulationsergebnisse für den Ausfahrtstyp A 1, AS/AK Bottrop, ohne Lang-Lkw und mit 2 % Lang-Lkw

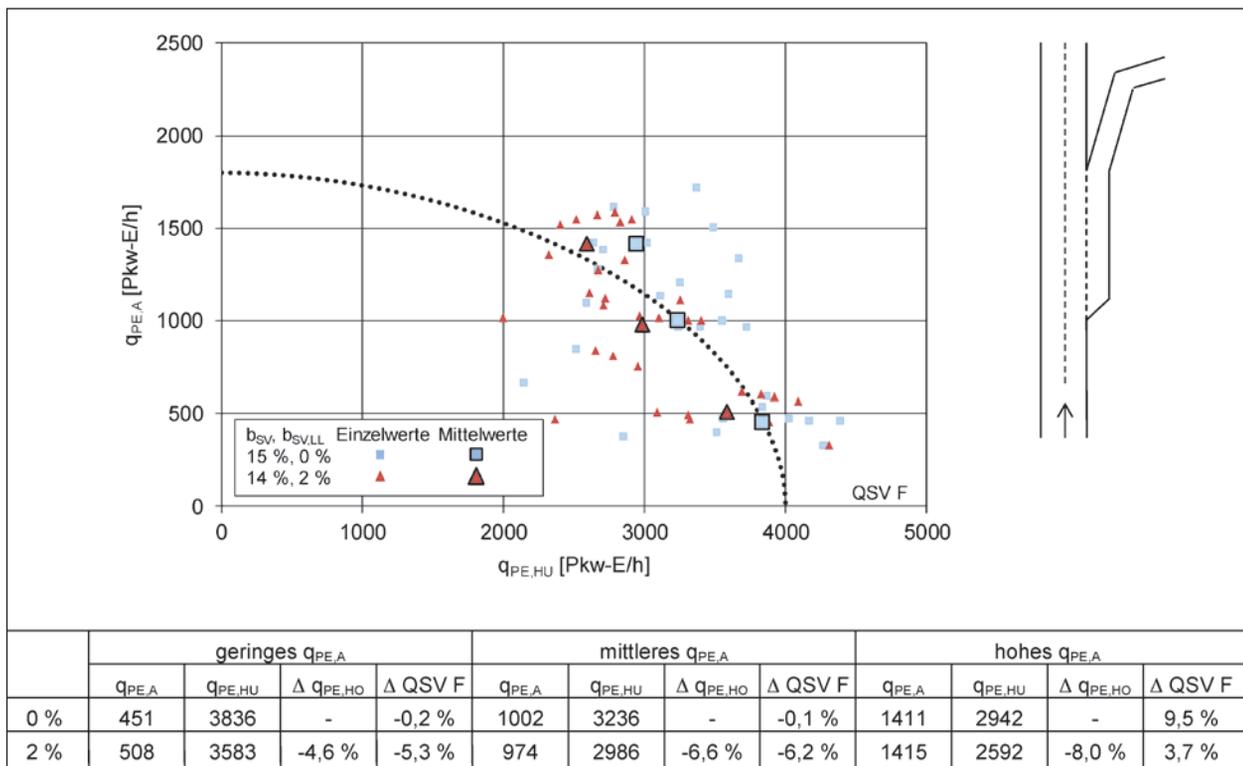


Bild 26: Simulationsergebnisse für den Ausfahrtstyp A 1, AS Alsfeld-West, ohne Lang-Lkw und mit 2 % Lang-Lkw

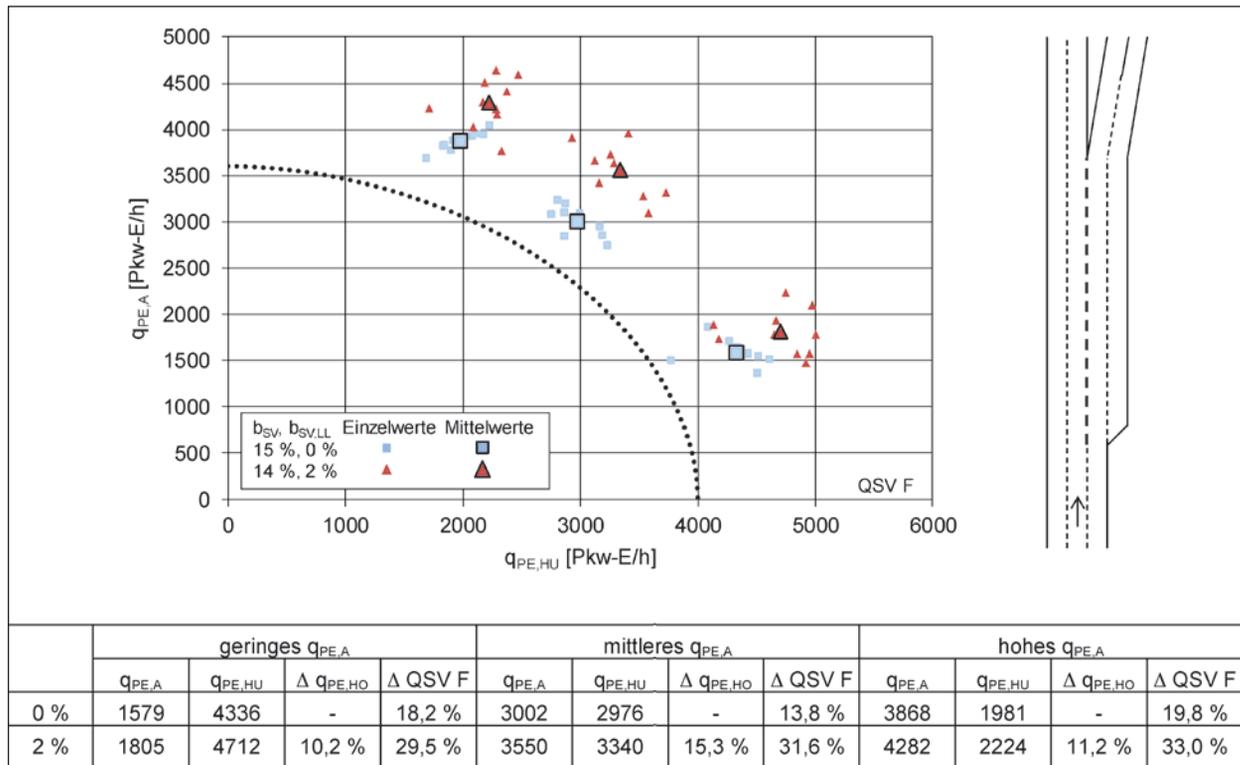


Bild 27: Simulationsergebnisse für den Ausfahrttyp A 4, AK Kaiserberg, ohne Lang-Lkw und mit 2 % Lang-Lkw

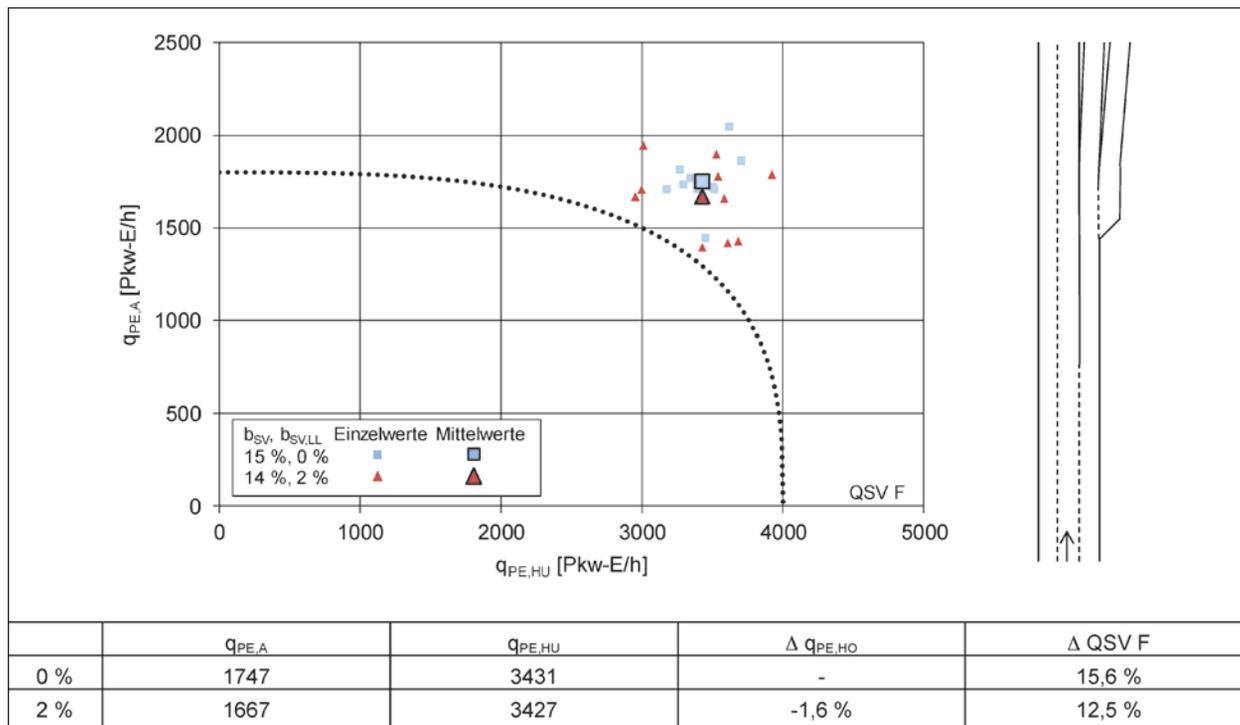


Bild 28: Simulationsergebnisse für den Ausfahrttyp A 6, AK Köln-Nord, ohne Lang-Lkw und mit 2 % Lang-Lkw

6.2 Einfahrten

In Bild 29 bis Bild 33 sind die Ergebnisse der Simulationen der untersuchten Einfahrten dargestellt. Die Ergebnisse für die Szenarien, bei denen Lkw durch Lang-Lkw ersetzt wurden, liegen an allen Un-

tersuchungsstellen sehr nah zusammen. An der Untersuchungsstelle AK Darmstadt (Einfahrttyp E 4) und auch an der Untersuchungsstelle AS Alsfeld-West (Einfahrttyp E 1) ist bei hohen Einfahrver-

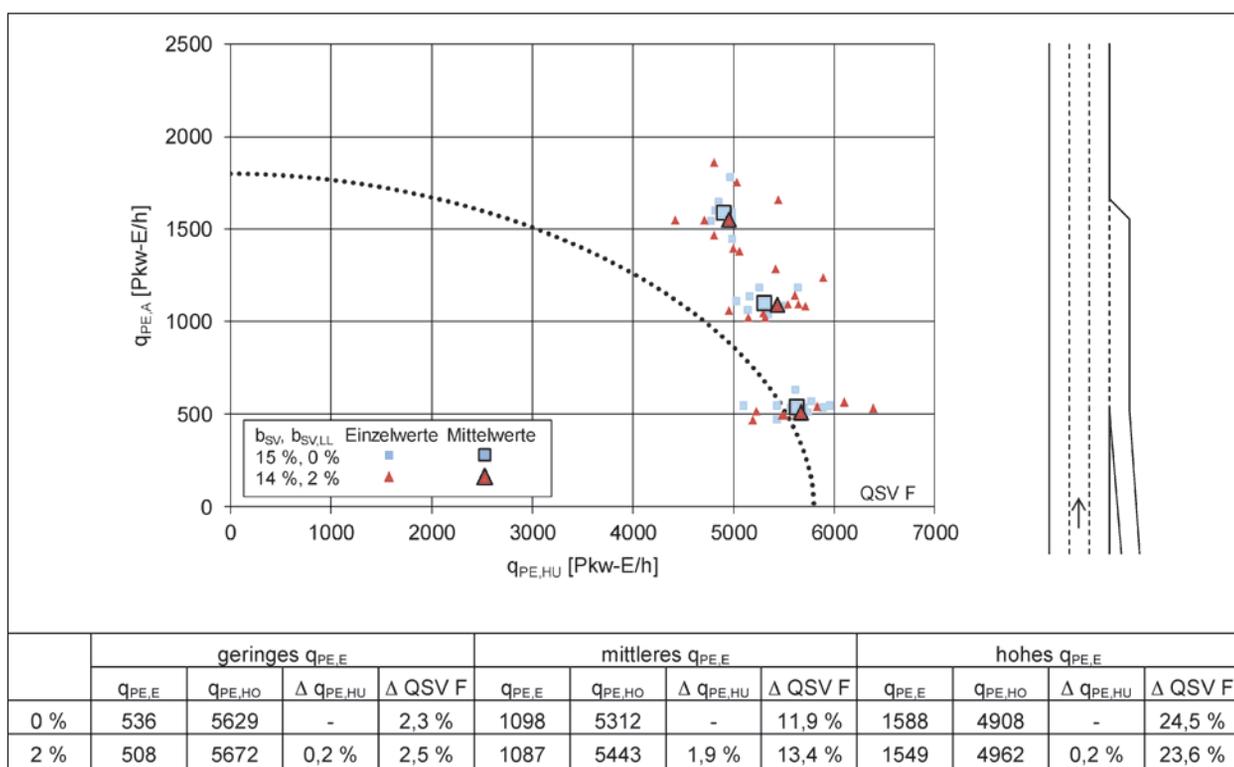


Bild 29: Simulationsergebnisse für den Einfahrtstyp E 1, AS Leverkusen-Opladen, ohne Lang-Lkw und mit 2 % Lang-Lkw

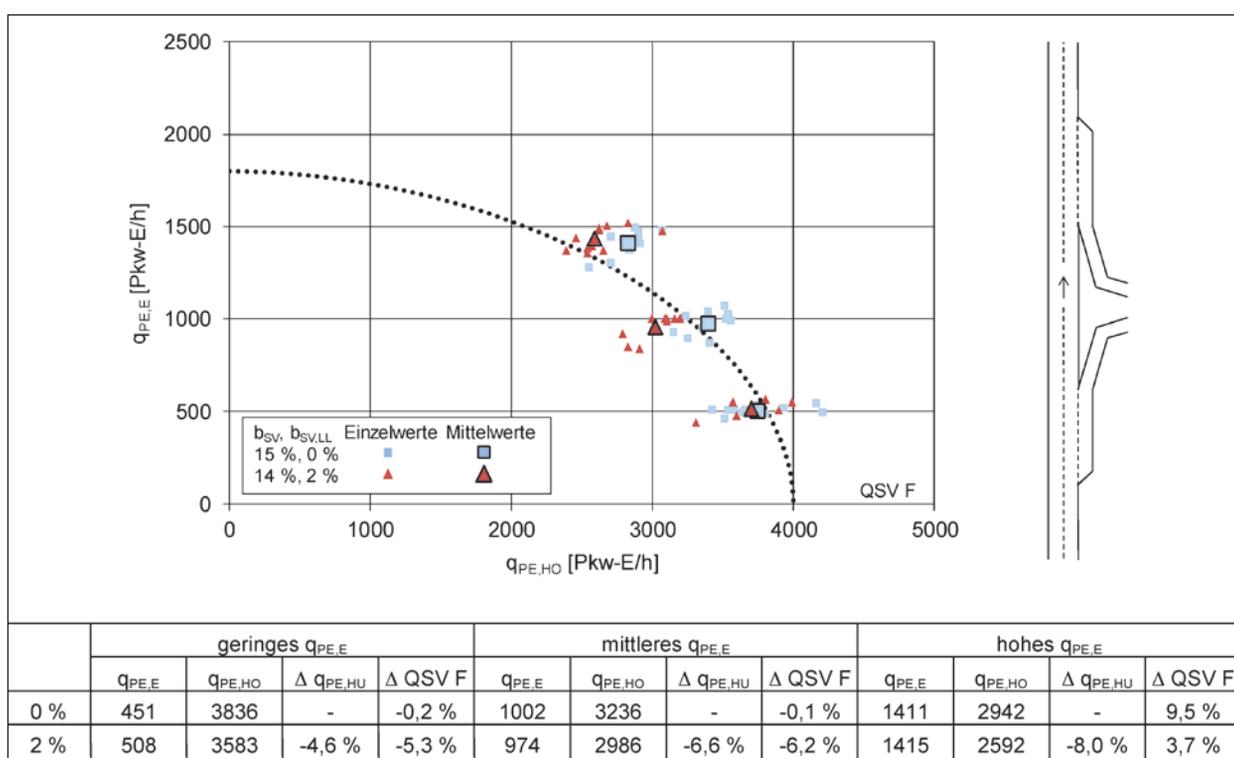


Bild.29: Simulationsergebnisse für den Einfahrtstyp E 1, AS Leverkusen-Opladen, ohne Lang-Lkw und mit 2 % Lang-Lkw

kehrstärken eine deutlich Reduktion der Verkehrsstärken vor einem Zusammenbruch zu erkennen. Dies liegt zum einen an den Einfädungsvorgängen beim Einfahrtstyp E 4, bei dem die Lang-Lkw zwei Fahrstreifenwechsel durchführen müssen. Der Pkw-

Gleichwert an der Untersuchungsstelle AK Darmstadt liegt daher bei 4,3. An der Untersuchungsstelle AS Alsfeld-West beträgt der Pkw-Gleichwert 5,1. An allen anderen Untersuchungsstellen beträgt der Pkw-Gleichwert weniger als 2,0 Pkw-E/Lang-Lkw.

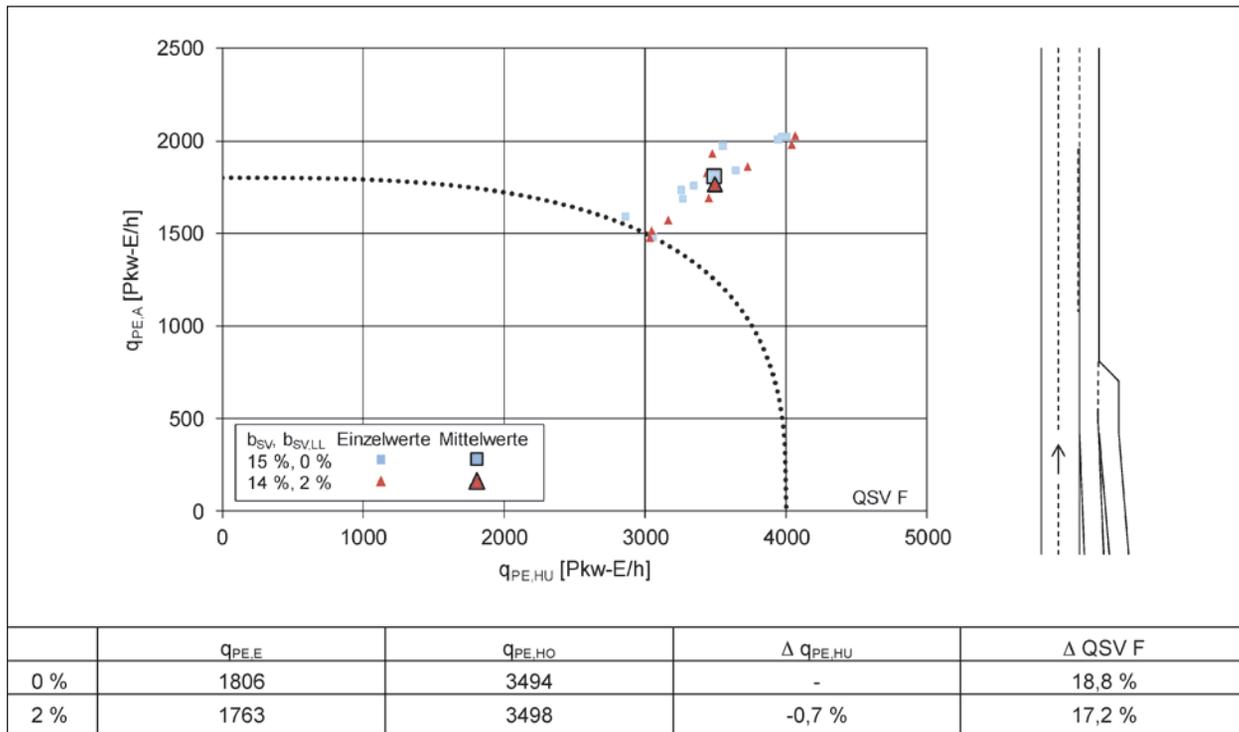


Bild 31: Simulationsergebnisse für den Einfahrtstyp E 3, AK Köln-Nord, ohne Lang-Lkw und mit 2 % Lang-Lkw

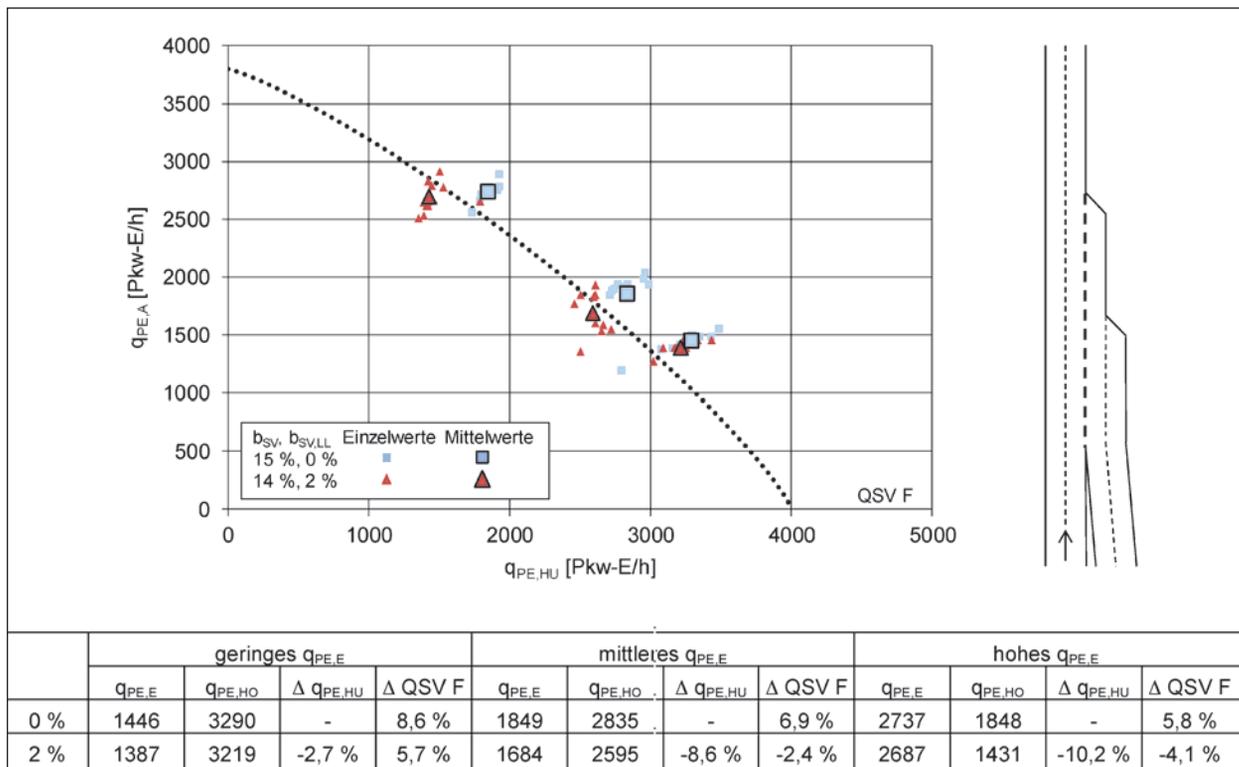


Bild 32: Simulationsergebnisse für den Einfahrtstyp E 4, AK Darmstadt, ohne Lang-Lkw und mit 2 % Lang-Lkw

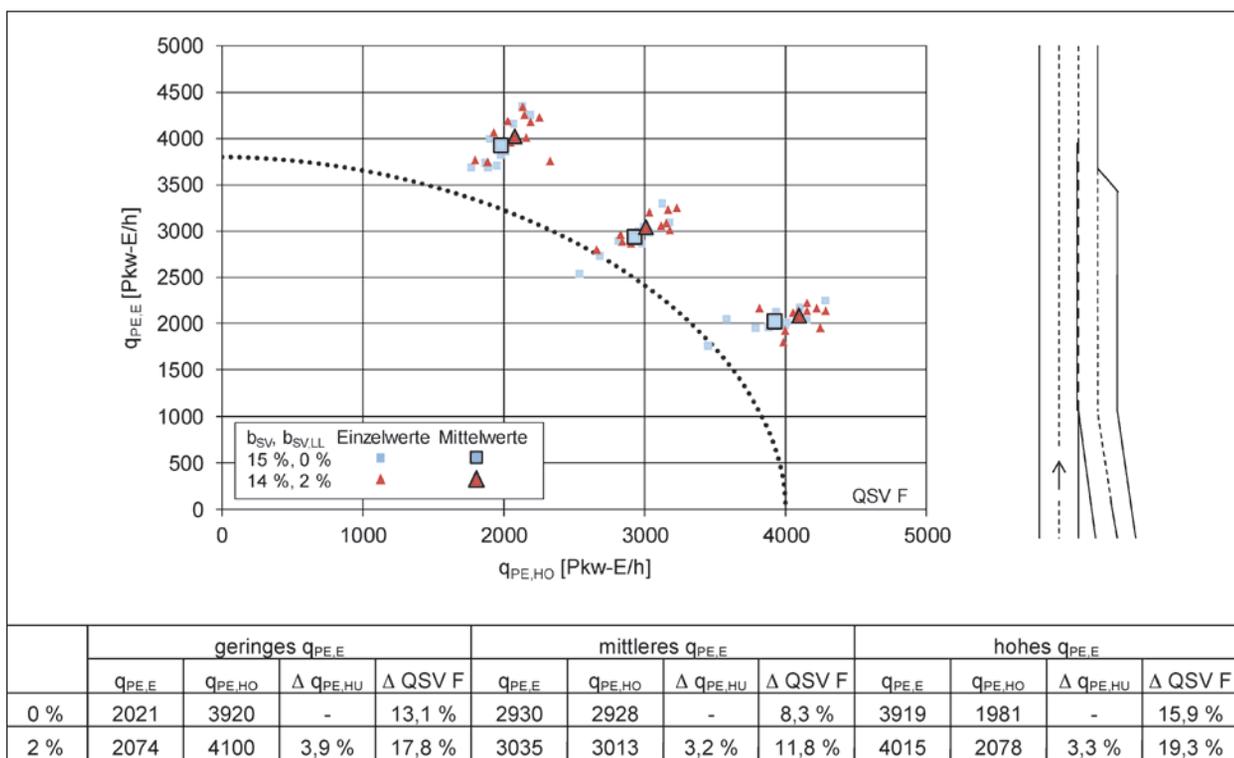


Bild 33: Simulationsergebnisse für den Einfahrtstyp E 5, AK Kaiserberg, ohne Lang-Lkw und mit 2 % Lang-Lkw

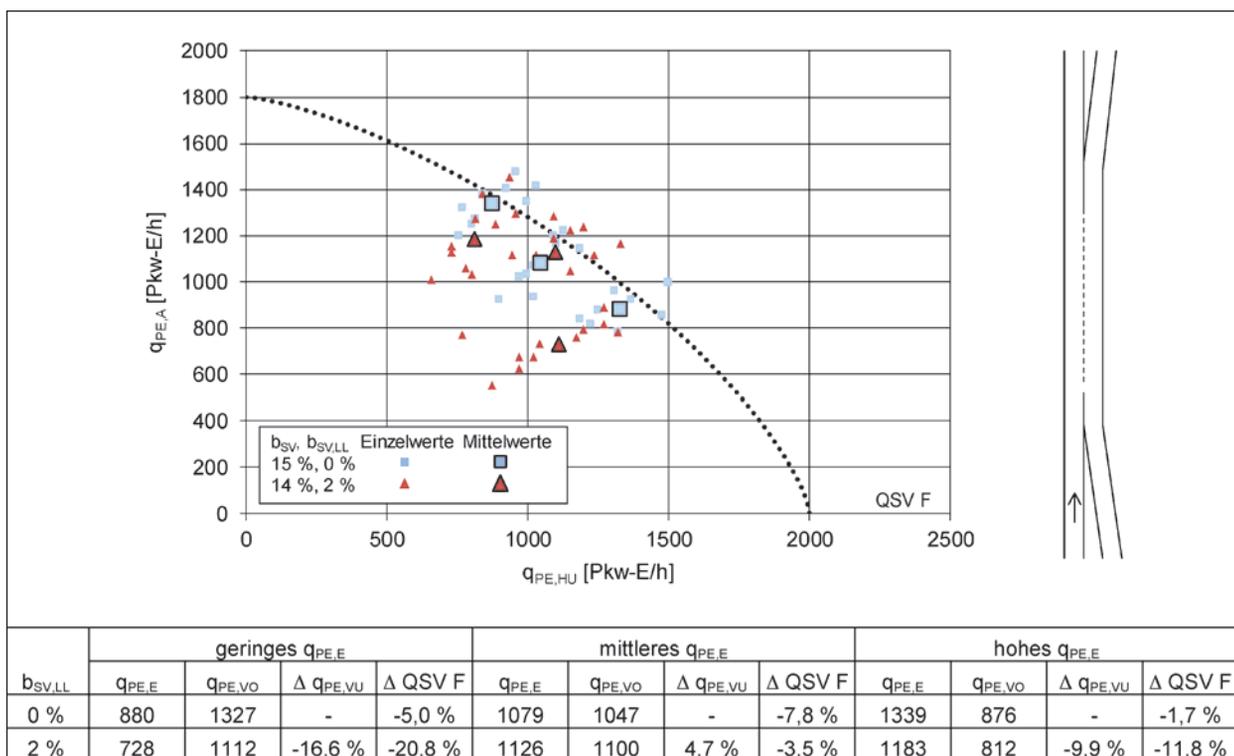


Bild 34: Simulationsergebnisse für den Verflechtungstreckentyp VR 1, AK Leverkusen, ohne Lang-Lkw und mit 2 % Lang-Lkw

6.3 Verflechtungsstrecke

In Bild 34 sind die Simulationsergebnisse am AK Leverkusen (Verflechtungstyp VR 1) dargestellt. Der Einfluss der Lang-Lkw ist deutlich zu erkennen,

der Pkw-Gleichwert an der Verflechtungstrecke für die Lang-Lkw liegt bei 3,5.

7 Zusammenfassung

Im Rahmen vorliegenden Untersuchung, die eine Erweiterung des Forschungsprojekts „Berücksichtigung des Schwerverkehrs bei der Modellierung des Verkehrsablaufs an planfreien Knotenpunkten“ darstellt, wurde der Einfluss von Fahrzeugen und Fahrzeugkombinationen mit Überlänge (Lang-Lkw) auf den Verkehrsablauf untersucht. Unter Verwendung von vorliegenden Simulationsnetzen wurden Verkehrsflusssimulationen mit verschiedenen Lang-Lkw-Anteilen mit dem mikroskopischen Simulationsprogramm BABSIM durchgeführt. Dabei kam eine weiterentwickelte Version des Programms BABSIM zum Einsatz, mit der Lang-Lkw als zusätzliche Fahrzeuggruppe in den Simulationen berücksichtigt werden können. Zu den betrachteten Netzen gehören Ausfahrten der Typen A 1, A 3, A 4 und A 6, Einfahrten der Typen E 1, E 3, E 4 und E 5 sowie eine Verflechtungsstrecke des Typs VR 1 nach RAA (2008).

Die Simulationsmodelle wurden anhand der Daten von Dauerzählstellen für Schwerverkehrsanteile zwischen 10 % und 15 % kalibriert und validiert. Für jede Untersuchungsstelle wurden Simulationen mit Lang-Lkw-Anteilen von 0 %, 1 %, 2 % und 5 % der Gesamtverkehrsstärke sowie in der Regel drei unterschiedlichen Verkehrsstärkeanteilen des ein- bzw. ausfahrenden Verkehrs durchgeführt. Für jedes Szenario wurden 10 Simulationsläufe durchgeführt, in denen die Verkehrsstärke bis zum Zusammenbruch des Verkehrsflusses gesteigert wurde. Der Mittelwert der Verkehrsstärken vor dem Zusammenbruch in 5-Minuten-Intervallen wurde als Schätzwert der Kapazität für die Bewertung des Einflusses der Lang-Lkw in den verschiedenen Szenarien verwendet.

Die Bewertung der Simulationsergebnisse erfolgte über zwei Kennwerte. Der erste Kennwert gibt das Verhältnis der Gesamtverkehrsstärke der Szenarien mit Lang-Lkw zur Gesamtverkehrsstärke des Szenarios ohne Lang-Lkw an. Als zweiter Kennwert wurde die prozentuale Abweichung der simulierten Verkehrsstärken vor dem Zusammenbruch zur Grenze zwischen den Qualitätsstufen E und F in den Bemessungsdiagrammen des HBS (201X) herangezogen.

Die Simulationsergebnisse zeigten vielen Fällen keinen signifikanten Einfluss von Lang-Lkw auf die Kapazität von planfreien Knotenpunkten. Die aufgetretenen Abweichungen zwischen den mittleren

Verkehrsstärken vor dem Zusammenbruch für die Szenarien mit unterschiedlichen Lang-Lkw-Anteilen sind somit überwiegend durch die zufällige Streuung der Einzelwerte zu erklären. Einzig an den Untersuchungsstellen mit den Einfahrtstypen E 1 und E 4 an zweistreifigen Richtungsfahrbahnen wurde in fast allen untersuchten Szenarien eine signifikante Reduktion der Kapazität festgestellt. Beim Einfahrtstyp E 4 lässt sich dies dadurch erklären, dass die einfahrenden Lang-Lkw durch die Geometrie des Knotenpunkts zwei Fahrstreifenwechsel durchführen müssen.

In einer weiteren Analyse wurden zwei Szenarien verglichen, bei dem zum einen nur herkömmliche Lkw simuliert wurden und zum anderen die Transportleistung von drei herkömmlichen Lkw durch zwei Lang-Lkw ersetzt wurde. Der Vergleich der beiden Szenarien ergab auch bei einer Reduzierung der Anzahl der Schwerverkehrsfahrzeuge keinen eindeutigen Einfluss der Lang-Lkw auf die Kapazität von planfreien Knotenpunkten. Bei der Hälfte der durchgeführten Simulationen ergab sich eine Verbesserung des Verkehrsablaufs. Bei den anderen Simulationen wurde die Kapazität durch die Lang-Lkw reduziert.

Bei der Bewertung der Ergebnisse muss berücksichtigt werden, dass die Ermittlung der Kapazität planfreier Knotenpunkte auf der Grundlage mikroskopischer Verkehrsflusssimulationen mit Unsicherheiten behaftet ist. Darüber hinaus lagen zum Zeitpunkt der Kalibrierung der Simulationsmodelle noch keine spezifischen empirischen Erkenntnisse zum Fahrverhalten von Lang-Lkw vor, sodass sich der Einfluss der Lang-Lkw in der Simulation ausschließlich aus der größeren Fahrzeuglänge und unter Berücksichtigung des Überholverbots für Lang-Lkw ergibt.

Insgesamt liefern die Ergebnisse einen Anhaltspunkt dafür, dass die Kapazität von planfreien Knotenpunkten bei den hier analysierten hohen Lang-Lkw-Anteilen von 1 bis 5 % der Gesamtverkehrsstärke im Allgemeinen nur gering beeinflusst wird. Die durch die Verkehrsflusssimulation ermittelten Auswirkungen auf die Kapazität liegen in der Größenordnung der Bandbreite der Kapazität, die in der Realität unabhängig vom Einfluss der Lang-Lkw auch im Vergleich unterschiedlicher Untersuchungsstellen mit ähnlichen verkehrlichen und streckengeometrischen Randbedingungen auftreten kann.

8 Literatur

- BMVBS (2011): Verkehr in Zahlen 2010/2011. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.), Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, Hamburg, S. 340-341
- BRILON, W., BETZ, C. (2008): Entwurf und Bemessung von Autobahnknotenpunkten unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen den Elementen. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 983, Bonn
- BRILON, W., GEISTEFELDT, J. (2007): Autobahnen und Autobahnknotenpunkte mit vierstreifigen Richtungsfahrbahnen – Gestaltung und Bemessung. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 967, Bonn
- BRILON, W., HARDING, J., ERLEMANN, K., SEIFAHRT, S. (2005): Fortentwicklung und Bereitstellung eines bundeseinheitlichen Simulationsmodells für Bundesautobahnen. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 918, Bonn
- BRILON, W., HARDING, J., HARTMANN, D., ERLEMANN, K. (2007): Weiterentwicklung des bundeseinheitlichen Simulationsmodells für Bundesautobahnen. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 974, Bonn
- BRILON, W., PONZLET, M. (1995): Application of traffic flow models. Proceedings of the Workshop in Traffic and Granular Flow. World Scientific, Singapore
- COHEN, S. L. (2004): Application of Relaxation Procedure for Lane Changing in Microscopic Simulation Models, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1883, TRB, National Research Council, Washington, D.C., S. 50-58
- DAAMEN, W., LOOT, M., HOOGENDOORN, S. P. (2010): Empirical Analysis of Merging Behavior at Freeway On-Ramp, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2188, TRB, Washington, D.C., S. 108-118
- FGSV (2000): Begriffsbestimmungen, Teil: Verkehrsplanung, Straßenentwurf und Straßenbetrieb. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln
- FGSV (2006): Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation – Grundlagen und Anwendungen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln
- FRIEDRICH, B., HOFFMANN, S., IRZIK, M., MATSCHKE, I. (2008): Zweistreifige Einfahrten an dreistreifigen Richtungsfahrbahnen – Verkehrssicherheit und Verkehrsablauf, Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 992, Bonn
- FRIEDRICH, B., HOFFMANN, S., BRÄCKELMANN, F. (2007): Auswertung des niedersächsischen Modellversuchs zum Einsatz von „GigaLinern“. Schlussbericht für das Niedersächsische Ministeriums für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr, September 2006, Hannover
- GEISTEFELDT (2013): Neue Erkenntnisse zur Kapazität von Autobahnen. In: Festschrift zu Ehren von Prof. Prof. E.h. Dr.-Ing. Werner Brilon. Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum, Heft 38
- GLAESER, K.-P., KASCHNER, R., LERNER, M., RODER, C., WEBER, R., WOLF, A., ZANDER, U. (2006): Auswirkungen von neuen Fahrzeugkonzepten auf die Infrastruktur des Bundesfernstraßennetzes. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach
- HARDING, J. (2007): Modellierung und mikroskopische Simulation des Autobahnverkehrs. Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum, Heft 29
- HBS (2001): Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln
- HBS (201X): Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen. Entwurf der fortgeschriebenen Fassung. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln
- RAA (2008): Richtlinien für die Anlage von Autobahnen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln
- SCHNÜLL, R., HOFFMANN, S., KÖLLE, M., MENNICKEN, C. (2000): Leistungsfähigkeit von Verflechtungstrecken an planfreien Knotenpunkten. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 796, Bonn

SPARMANN, U. (1978): Spurwechselforgänge auf zweispurigen BAB-Richtungsfahrbahnen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 263, Bonn

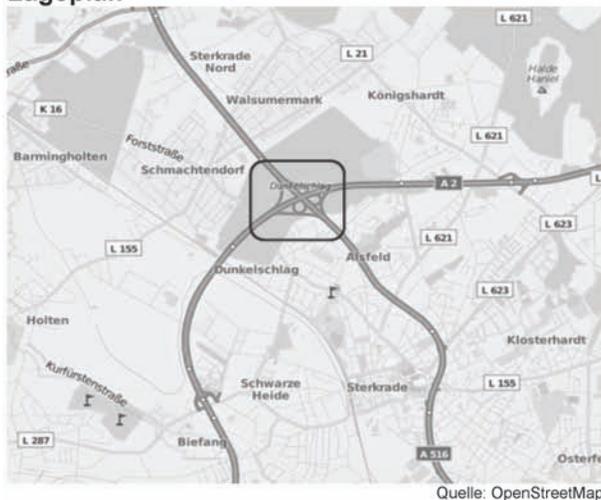
WANGRIN, G., STÜRMER, B., WÖHRMANN, M. (2009): Technische Erprobung von Fahrzeugkombinationen mit einer Gesamtlänge bis 25,25 m („Gigaliner“). Abschlussbericht zum NRW-Modellversuch im Auftrag des Ministeriums für Bauen und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen, TÜV Rheinland Kraftfahrt GmbH, Köln; TÜV Nord Mobilität, Münster, Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH, Aachen

WIEDEMANN, R. (1974): Simulation des Straßenverkehrsflusses. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, Heft 8

Anhang: Untersuchungsstellen

Autobahn A 2, AK Oberhausen, Ausfahrttyp A 1

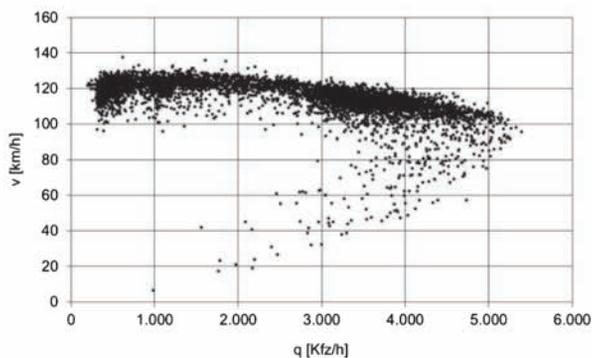
Lageplan



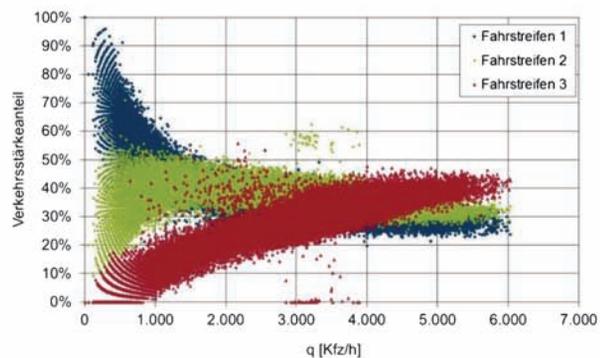
Parameter der Untersuchungsstelle

Bundesland	NRW
BAB	A 2
Knotenpunkt	1
Fahrtrichtung	Ost
Ausfahrttyp	A 1
Fahrstreifen auf der HFB	3
Geschwindigkeitsbeschränkung [km/h]	keine
DTV vor der Ausfahrt [Kfz/d]	56.077
DTV _{SV} vor der Ausfahrt [Lkw/d]	9.805
DTV in der Ausfahrt [Kfz/d]	12.269
DTV _{SV} in der Ausfahrt [Lkw/d]	6.367
Lkw-Überholverbot	Nein
Dauerzählstellen	Ja
Messung	Ja

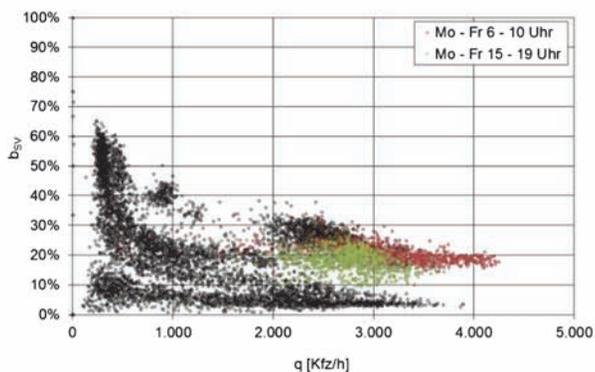
q-v-Diagramm der Hauptfahrbahn
(5-Minuten-Intervalle)



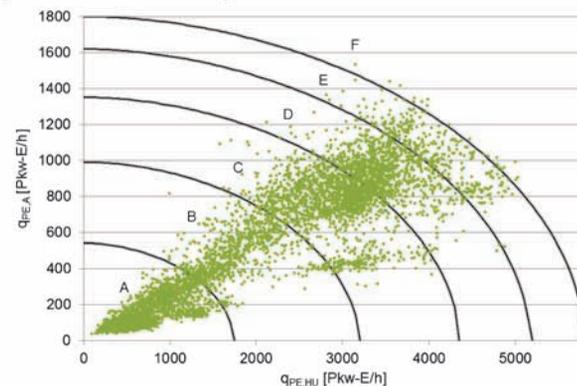
Fahrstreifenaufteilung der Hauptfahrbahn
(5-Minuten-Intervalle)



q-b_{SV}-Diagramm der Hauptfahrbahn
(Stunden-Intervalle)



q_{PE,HU}-q_{PE,A}-Diagramm mit
Qualitätsstufen nach HBS 201X
(Stunden-Intervalle)



Autobahn A 2, AS/AK Bottrop, Ausfahrttyp A 1

Lageplan

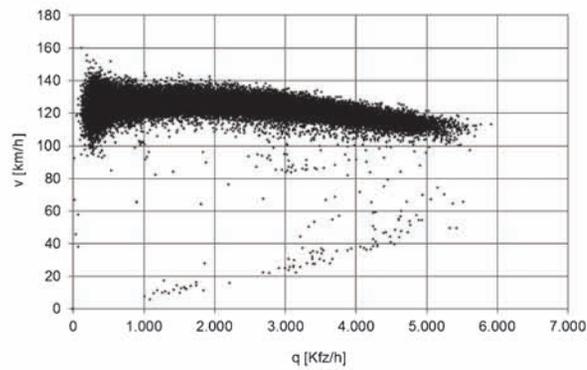


Quelle: OpenStreetMap

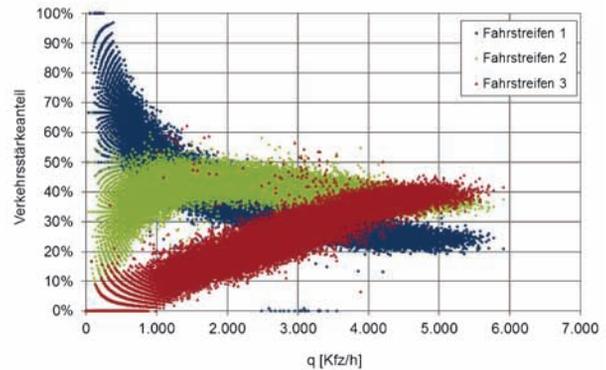
Parameter der Untersuchungsstelle

Bundesland	NRW
BAB	A 2
Knotenpunkt	3
Fahrtrichtung	
Ausfahrttyp	A 1
Fahrstreifen auf der HFB	3
Geschwindigkeitsbeschränkung [km/h]	keine
DTV vor der Ausfahrt [Kfz/d]	54980
DTV _{SV} vor der Ausfahrt [Lkw/d]	10796
DTV in der Ausfahrt [Kfz/d]	-
DTV _{SV} in der Ausfahrt [Lkw/d]	-
Lkw-Überholverbot	Nein
Dauerzählstellen	Ja
Messung	Ja

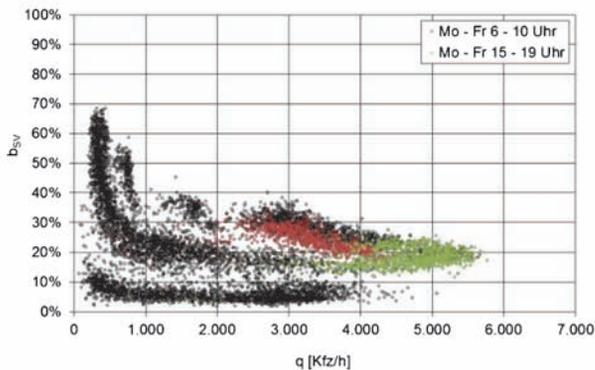
q-v-Diagramm der Hauptfahrbahn (5-Minuten-Intervalle)



Fahrstreifenaufteilung der Hauptfahrbahn (5-Minuten-Intervalle)



q-b_{SV}-Diagramm der Hauptfahrbahn (Stunden-Intervalle)



q_{PE,HU}-q_{PE,A}-Diagramm mit Qualitätsstufen nach HBS 201X (Stunden-Intervalle)

keine Dauerzählstelle in der Ausfahrt vorhanden

Autobahn A 5, AS Alsfeld-West, Ausfahrttyp A 1

Lageplan

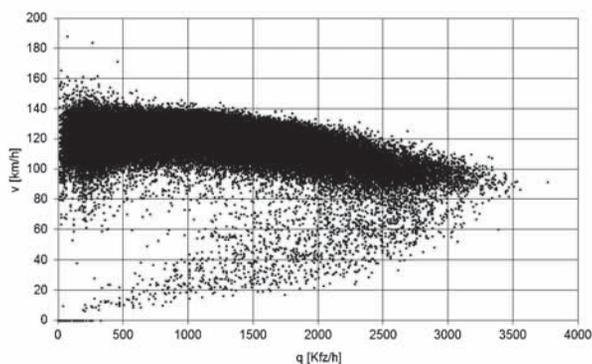


Quelle: OpenStreetMap

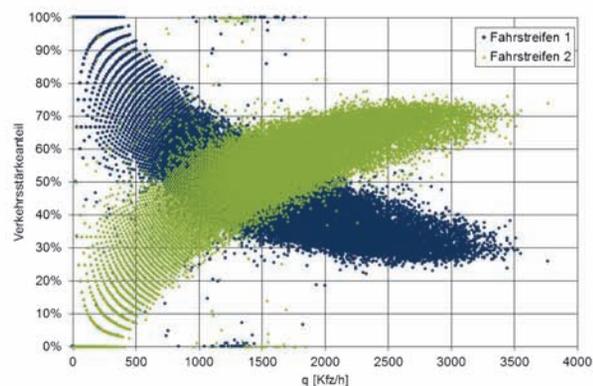
Parameter der Untersuchungsstelle

Bundesland	HE
BAB	A 5
Knotenpunkt	3
Fahrtrichtung	Nord
Ausfahrttyp	A 1
Fahrstreifen auf der HFB	2
Geschwindigkeitsbeschränkung [km/h]	keine
DTV vor der Ausfahrt [Kfz/d]	30.528
DTV _{SV} vor der Ausfahrt [Lkw/d]	6.289
DTV in der Ausfahrt [Kfz/d]	3.465
DTV _{SV} in der Ausfahrt [Lkw/d]	234
Lkw-Überholverbot	w.e.
Dauerzählstellen	Ja
Messung	Nein

q-v-Diagramm der Hauptfahrbahn (5-Minuten-Intervalle)

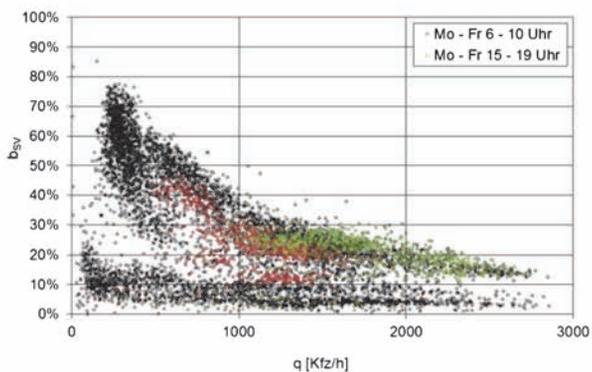


Fahrstreifenaufteilung der Hauptfahrbahn (5-Minuten-Intervalle)

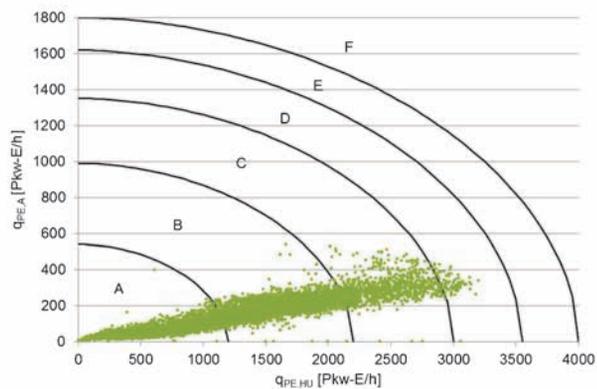


q-b_{SV}-Diagramm der Hauptfahrbahn

(Stunden-Intervalle)



q_{PE,HU}-q_{PE,A}-Diagramm mit Qualitätsstufen nach HBS 201X (Stunden-Intervalle)



Autobahn A 3, AK Kaiserberg, Ausfahrttyp A 4

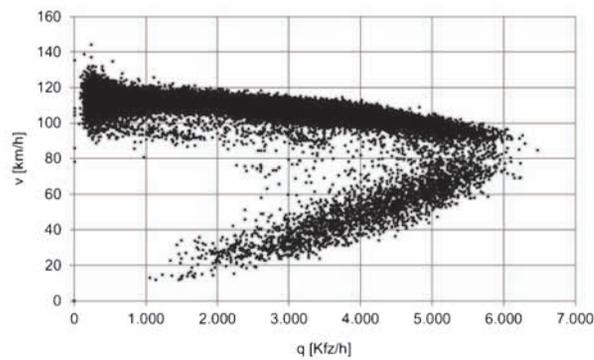
Lageplan



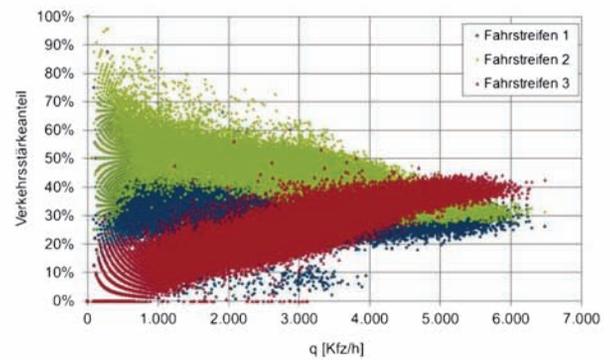
Parameter der Untersuchungsstelle

Bundesland	NRW
BAB	A 3
Knotenpunkt	14
Fahrtrichtung	Nord
Ausfahrttyp	A 4
Fahrstreifen auf der HFB	3/2
Geschwindigkeitsbeschränkung [km/h]	100
DTV vor der Ausfahrt [Kfz/d]	52.627
DTV _{SV} vor der Ausfahrt [Lkw/d]	6.255
DTV in der Ausfahrt [Kfz/d]	16.654
DTV _{SV} in der Ausfahrt [Lkw/d]	2.893
Lkw-Überholverbot	Nein
Dauerzählstellen	Ja
Messung	Ja

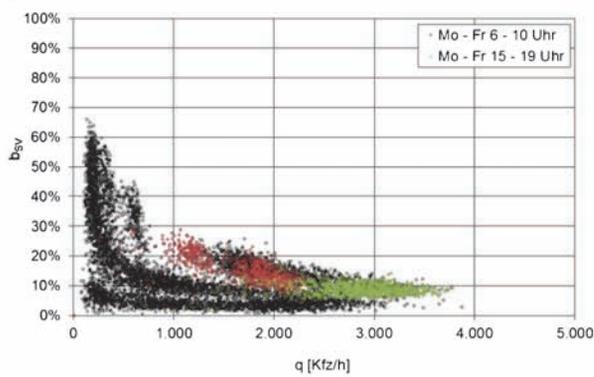
q-v-Diagramm der Hauptfahrbahn (5-Minuten-Intervalle)



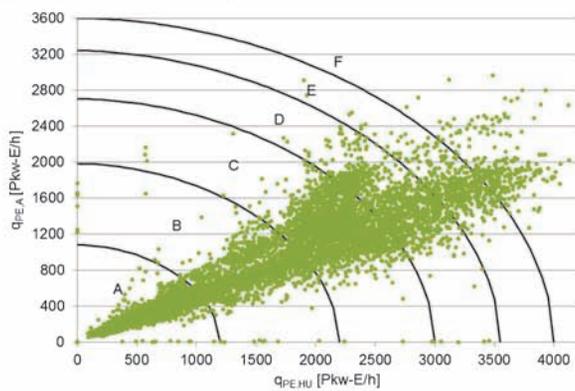
Fahrstreifenaufteilung der Hauptfahrbahn (5-Minuten-Intervalle)



q-b_{SV}-Diagramm der Hauptfahrbahn (Stunden-Intervalle)



q_{PE,HU}-q_{PE,A}-Diagramm mit Qualitätsstufen nach HBS 201X (Stunden-Intervalle)



Autobahn A 1, AK Köln-Nord, Ausfahrttyp A 6

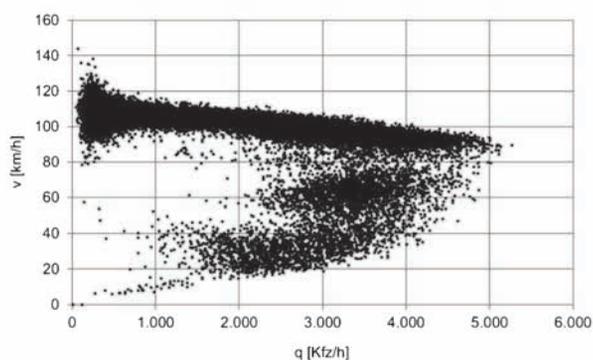
Lageplan



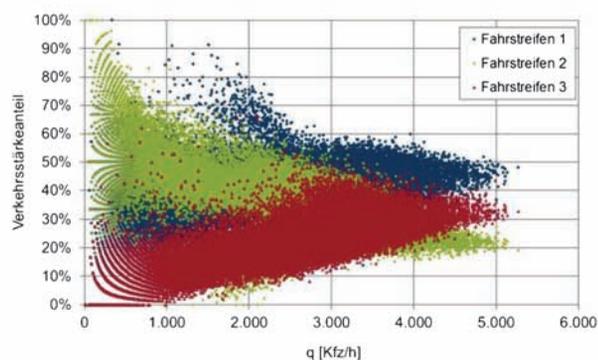
Parameter der Untersuchungsstelle

Bundesland	NRW
BAB	A 1
Knotenpunkt	101
Fahrtrichtung	Süd
Ausfahrttyp	A 6
Fahrstreifen auf der HFB	3/2
Geschwindigkeitsbeschränkung [km/h]	100
DTV vor der Ausfahrt [Kfz/d]	45.757
DTV _{SV} vor der Ausfahrt [Lkw/d]	5.811
DTV in der Ausfahrt [Kfz/d]	15.728
DTV _{SV} in der Ausfahrt [Lkw/d]	1.051
Lkw-Überholverbot	Nein
Dauerzählstellen	Ja
Messung	Ja

q-v-Diagramm der Hauptfahrbahn (5-Minuten-Intervalle)

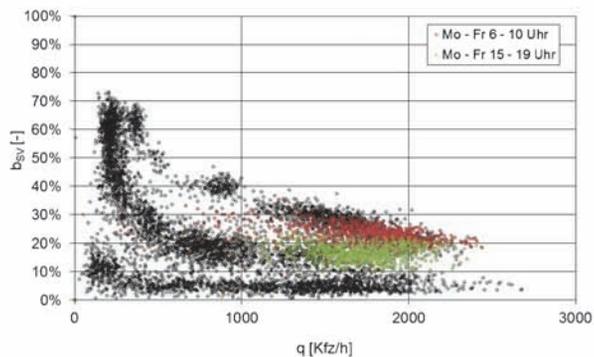


Fahrstreifenaufteilung der Hauptfahrbahn (5-Minuten-Intervalle)

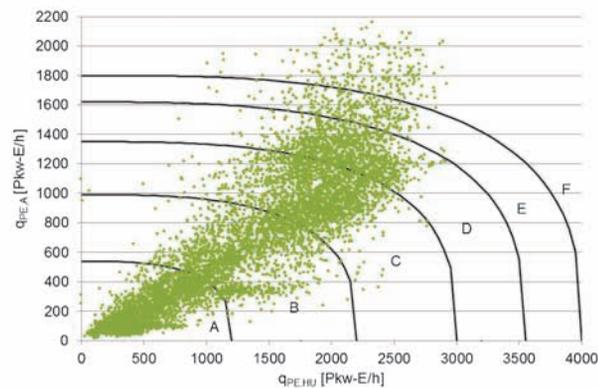


q-b_{SV}-Diagramm der Hauptfahrbahn

(Stunden-Intervalle)



q_{PE,HU}-q_{PE,A}-Diagramm mit Qualitätsstufen nach HBS 201X (Stunden-Intervalle)



Autobahn A 3, AS Leverkusen-Opladen, Einfahrtstyp E 1

Lageplan

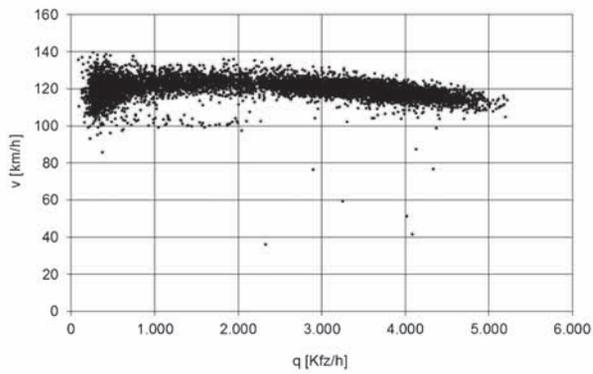


Quelle: OpenStreetMap

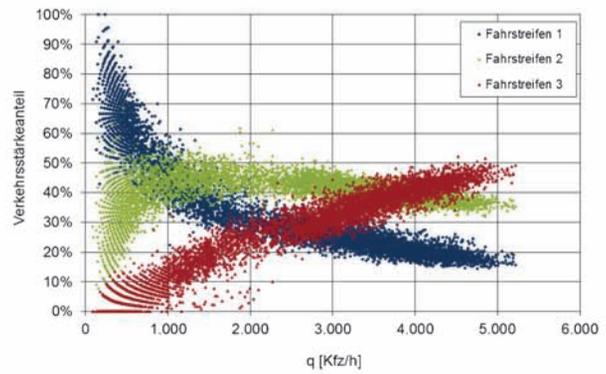
Parameter der Untersuchungsstelle

Bundesland	NRW
BAB	A 3
Knotenpunkt	22
Fahrtrichtung	Nord
Einfahrtstyp	E 1
Fahrstreifen auf der HFB	3
Geschwindigkeitsbeschränkung [km/h]	frei
DTV vor der Einfahrt [Kfz/d]	52.057
DTV _{SV} vor der Einfahrt [Lkw/d]	6.287
DTV in der Einfahrt [Kfz/d]	4.436
DTV _{SV} in der Einfahrt [Lkw/d]	1.215
Lkw-Überholverbot	Nein
Dauerzählstellen	Ja
Messung	Ja

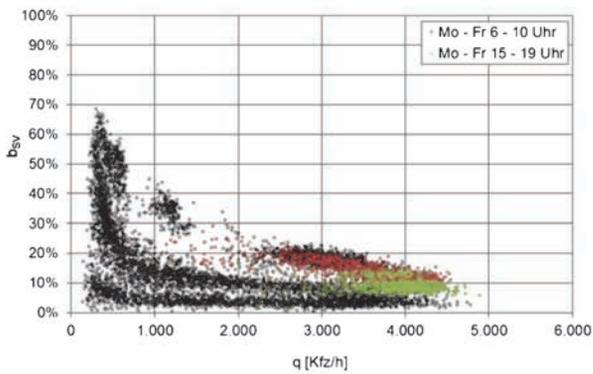
**q-v-Diagramm der Hauptfahrbahn
(5-Minuten-Intervalle)**



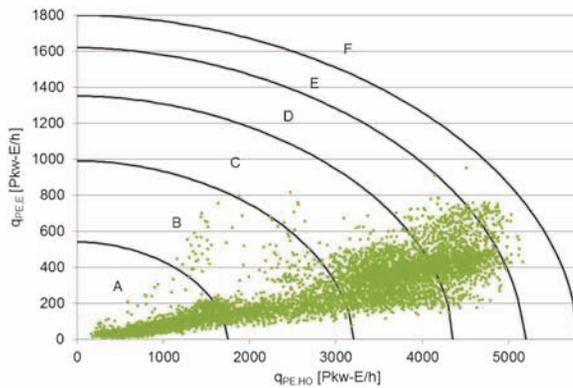
**Fahrstreifenaufteilung der Hauptfahrbahn
(5-Minuten-Intervalle)**



**q-b_{SV}-Diagramm der Hauptfahrbahn
(Stunden-Intervalle)**



**q_{PE,HO}-q_{PE,E}-Diagramm mit
Qualitätsstufen nach HBS 201X
(Stunden-Intervalle)**



Autobahn A 5, AS Alsfeld-West, Einfahrtstyp E 1

Lageplan

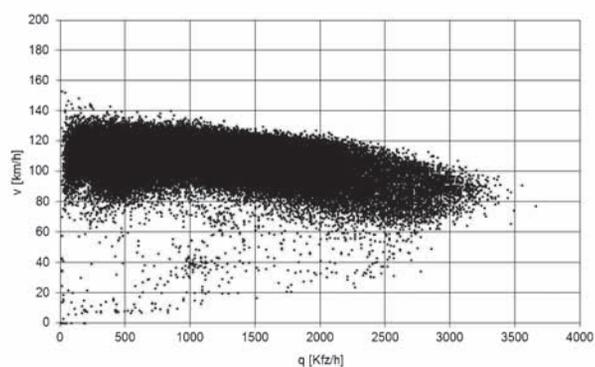


Quelle: OpenStreetMap

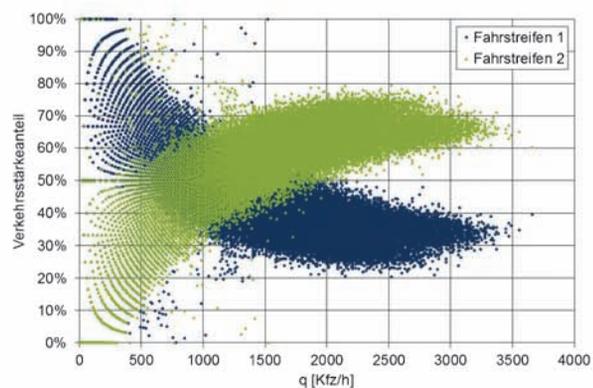
Parameter der Untersuchungsstelle

Bundesland	HE
BAB	A 5
Knotenpunkt	3
Fahrtrichtung	Süd
Einfahrtstyp	E 1
Fahrstreifen auf der HFB	2
Geschwindigkeitsbeschränkung [km/h]	keine
DTV vor der Einfahrt [Kfz/d]	30.528
DTV _{SV} vor der Einfahrt [Lkw/d]	6.289
DTV in der Einfahrt [Kfz/d]	2524
DTV _{SV} in der Einfahrt [Lkw/d]	407
Lkw-Überholverbot	Nein.
Dauerzählstellen	Ja
Messung	Nein

q-v-Diagramm der Hauptfahrbahn (5-Minuten-Intervalle)

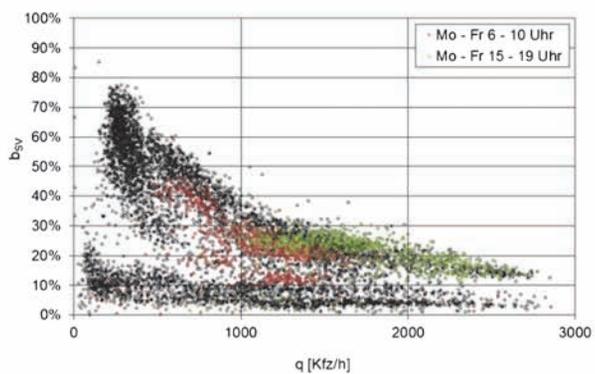


Fahrstreifenaufteilung der Hauptfahrbahn (5-Minuten-Intervalle)



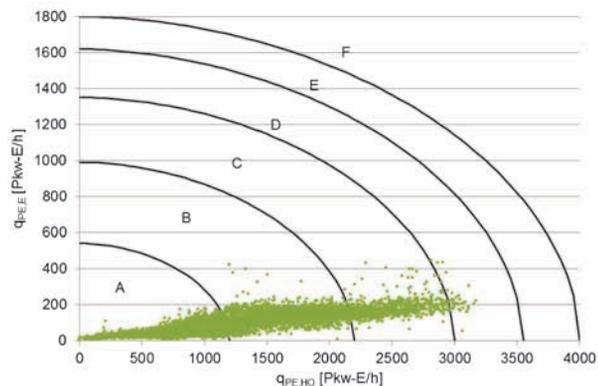
q-b_{SV}-Diagramm der Hauptfahrbahn

(Stunden-Intervalle)



q_{PE,HO}-q_{PE,E}-Diagramm mit Qualitätsstufen nach HBS 201X

(Stunden-Intervalle)



Autobahn A 1, AK Köln-Nord, Einfahrtstyp E 3

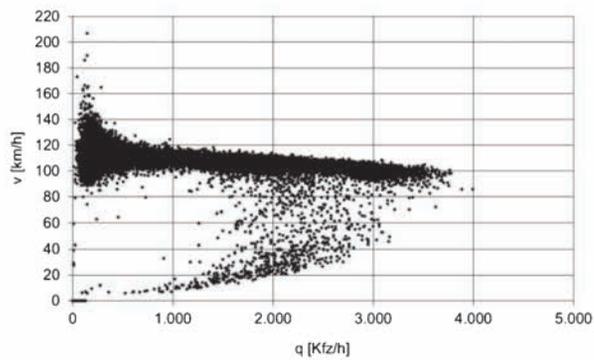
Lageplan



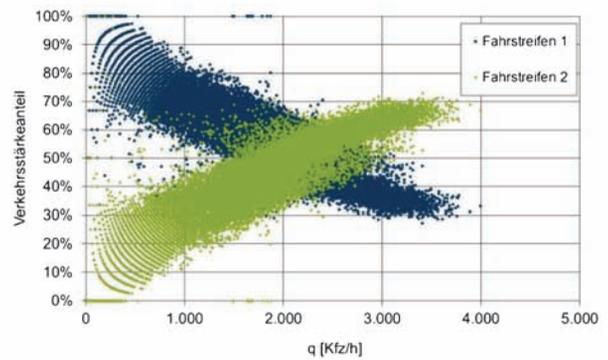
Parameter der Untersuchungsstelle

Bundesland	NRW
BAB	A 1
Knotenpunkt	101
Fahrtrichtung	Süd
Einfahrtstyp	E 3
Fahrstreifen auf der HFB	2/3
Geschwindigkeitsbeschränkung [km/h]	100
DTV vor der Einfahrt [Kfz/d]	26303
DTV _{SV} vor der Einfahrt [Lkw/d]	5046
DTV in der Einfahrt [Kfz/d]	14.345
DTV _{SV} in der Einfahrt [Lkw/d]	715
Lkw-Überholverbot	Nein
Dauerzählstellen	Ja
Messung	Ja

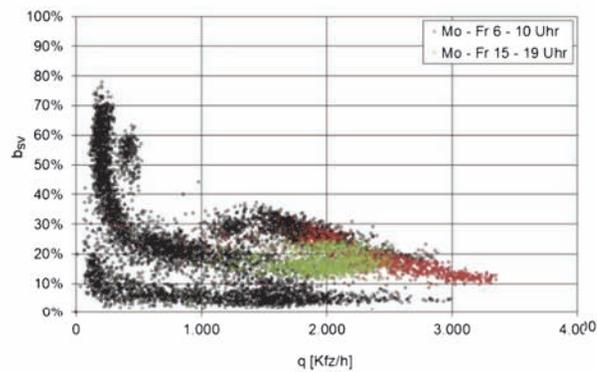
q-v-Diagramm der Hauptfahrbahn (5-Minuten-Intervalle)



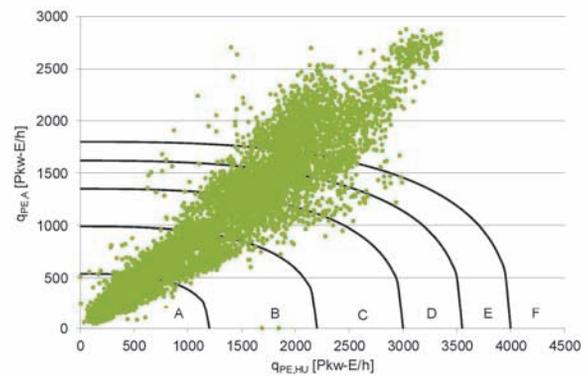
Fahrstreifenaufteilung der Hauptfahrbahn (5-Minuten-Intervalle)



q-b_{SV}-Diagramm der Hauptfahrbahn (Stunden-Intervalle)

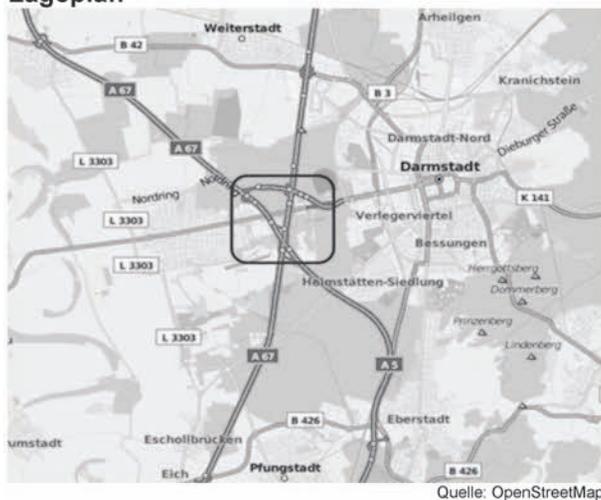


q_{PE,HO}-q_{PE,E}-Diagramm mit Qualitätsstufen nach HBS 201X (Stunden-Intervalle)



Autobahn A 67, AK Darmstadt, Einfahrtstyp E 4

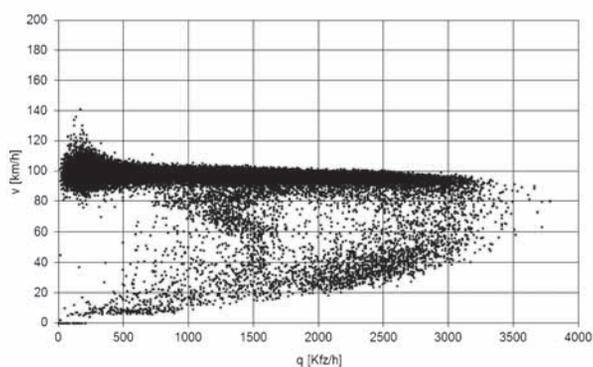
Lageplan



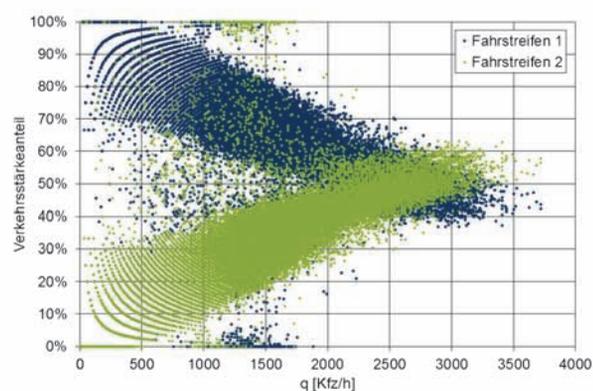
Parameter der Untersuchungsstelle

Bundesland	HE
BAB	A 67
Knotenpunkt	6
Fahrtrichtung	Süd
Einfahrtstyp	E 4
Fahrstreifen auf der HFB	2
Geschwindigkeitsbeschränkung [km/h]	100
DTV vor der Einfahrt [Kfz/d]	24.594
DTV _{SV} vor der Einfahrt [Lkw/d]	3.321
DTV in der Einfahrt [Kfz/d]	8.848
DTV _{SV} in der Einfahrt [Lkw/d]	1.219
Lkw-Überholverbot	Nein
Dauerzählstellen	Ja
Messung	Nein

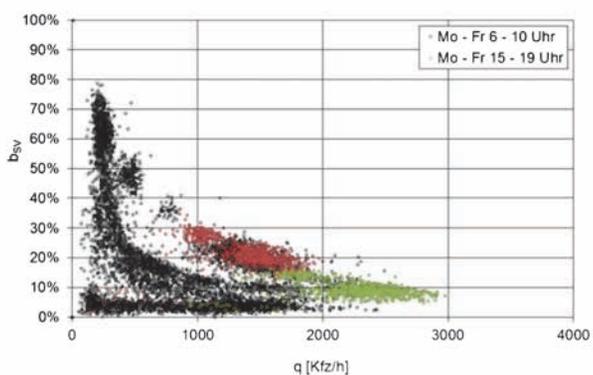
q-v-Diagramm der Hauptfahrbahn (5-Minuten-Intervalle)



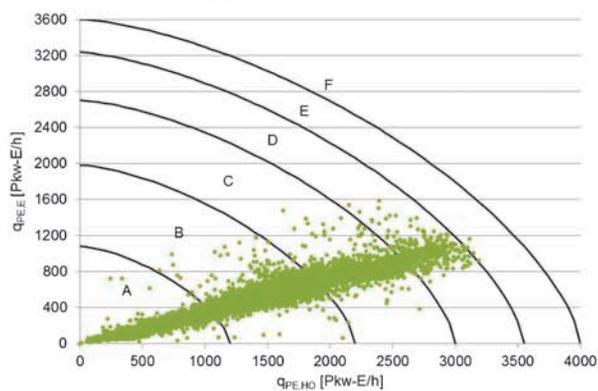
Fahrstreifenaufteilung der Hauptfahrbahn (5-Minuten-Intervalle)



q-b_{SV}-Diagramm der Hauptfahrbahn (Stunden-Intervalle)



q_{PE,HO}-q_{PE,E}-Diagramm mit Qualitätsstufen nach HBS 201X (Stunden-Intervalle)



Autobahn A 3, AK Kaiserberg, Einfahrtstyp E 5

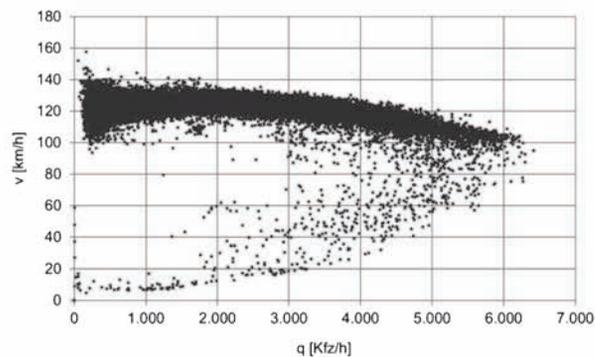
Lageplan



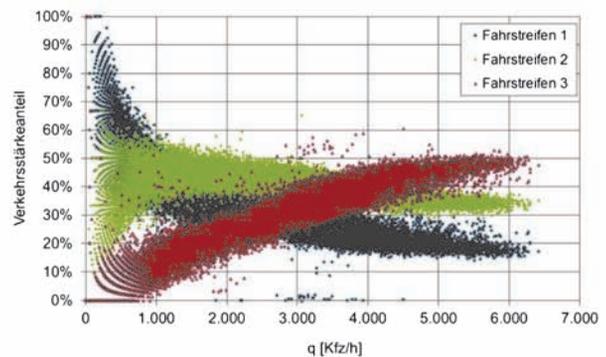
Parameter der Untersuchungsstelle

Bundesland	NRW
BAB	A 3
Knotenpunkt	14
Fahrtrichtung	Süd
Einfahrtstyp	E 5
Fahrstreifen auf der HFB	3
Geschwindigkeitsbeschränkung [km/h]	keine
DTV nach der Einfahrt [Kfz/d]	53.460
DTV _{SV} nach der Einfahrt [Lkw/d]	6.540
DTV in der Einfahrt [Kfz/d]	11.037
DTV _{SV} in der Einfahrt [Lkw/d]	2.178
Lkw-Überholverbot	Nein
Dauerzählstellen	Ja
Messung	Ja

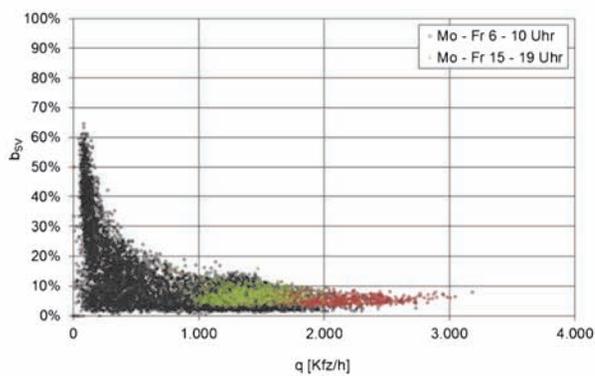
q-v-Diagramm der Hauptfahrbahn (5-Minuten-Intervalle)



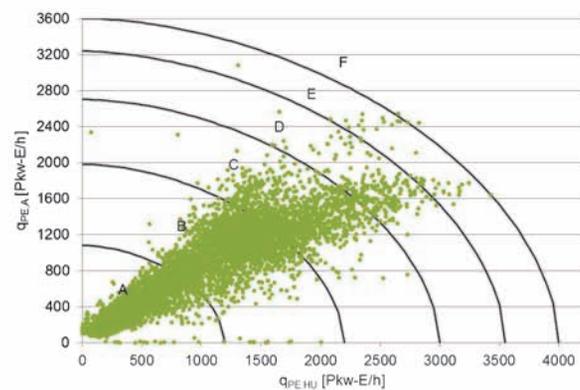
Fahrstreifenaufteilung der Hauptfahrbahn (5-Minuten-Intervalle)



q-b_{SV}-Diagramm der Hauptfahrbahn (Stunden-Intervalle)

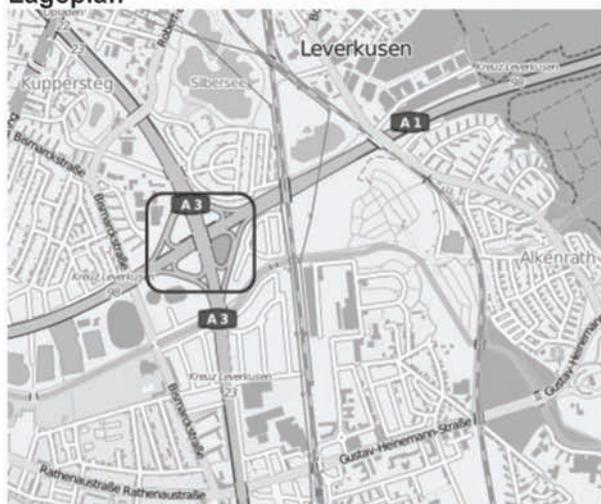


q_{PE,HU}-q_{PE,A}-Diagramm mit Qualitätsstufen nach HBS 201X (Stunden-Intervalle)



Autobahn A1, AK Leverkusen, Verflechtungstyp VR 1

Lageplan

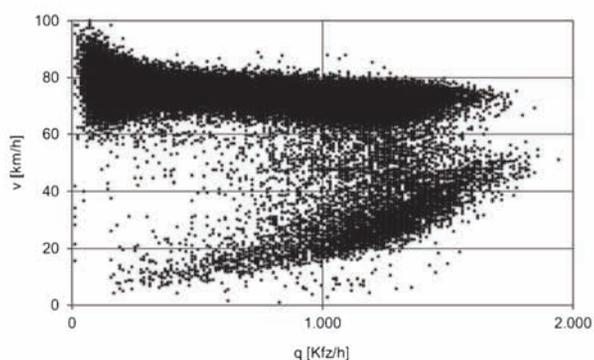


Quelle: OpenStreetMap

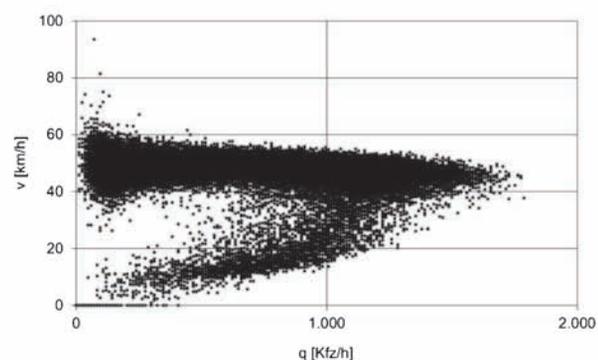
Parameter der Untersuchungsstelle

Bundesland	NRW
BAB	A 1
Knotenpunkt	98
Fahrtrichtung	Süd
Verflechtungstyp	VR 1
Fahrstreifen auf der HFB	3
Geschwindigkeitsbeschränkung [km/h]	VBA
DTV nach der Verflechtungsstrecke [Kfz/d]	17.055
DTV _{SV} nach der Verflechtungsstrecke [Lkw/d]	2.119
DTV in der Ausfahrt [Kfz/d]	15.955
DTV _{SV} in der Ausfahrt [Lkw/d]	2.124
Dauerzählstellen	Ja
Messung	Ja

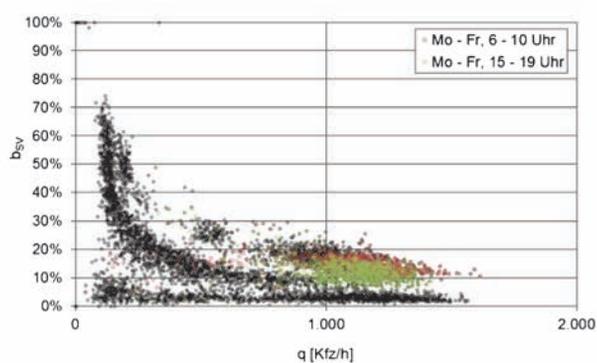
q-v-Diagramm nach der Verflechtungsstrecke (5-Minuten-Intervalle)



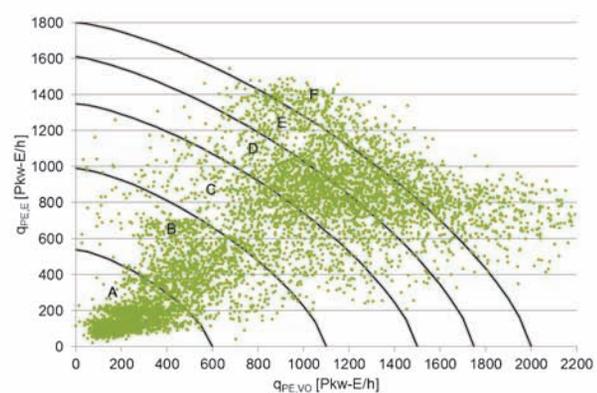
q-v-Diagramm in der Ausfahrt (5-Minuten-Intervalle)



q-b_{SV}-Diagramm nach der Verflechtungsstrecke (Stunden-Intervalle)



q_{PE,VO}-q_{PE,E}-Diagramm mit Qualitätsstufen nach HBS 201X (Stunden-Intervalle)



Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Verkehrstechnik“

2011

V 202: Einfluss innerörtlicher Grünflächen und Wasserflächen auf die PM10-Belastung

Endlicher, Langner, Dannenmeier, Fiedler, Herrmann, Ohmer, Dalter, Kull, Gebhardt, Hartmann € 16,00

V 203: Bewertung von Ortsumgehungen aus Sicht der Verkehrssicherheit

Dohmen, Vieten, Kesting, Dürhager, Funke-Akbiyik € 16,50

V 204: Einfluss von Straßenrandbegrünung auf die PM10-Belastung

Bracke, Reznik, Mölleken, Berteilt, Schmidt € 22,00
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.

V 205: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2009

Fitschen, Nordmann € 27,50
Dieser Bericht ist sowohl als gedrucktes Heft der Schriftenreihe als auch als CD erhältlich oder kann außerdem als kostenpflichtiger Download unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.

V 206: Sicherheitspotenzialkarten für Bundesstraßen nach den ESN

Färber, Lerner, Pöppel-Decker € 14,50

V 207: Gestaltung von Notöffnungen in transportablen Schutzeinrichtungen

Becker € 16,00

V 208: Fahrbahnquerschnitte in baulichen Engstellen von Ortsdurchfahrten

Gerlach, Breidenbach, Rudolph, Huber, Brosch, Kesting € 17,50

V 209: Stoffeintrag in Straßenrandböden – Messzeitraum 2008/2009

Beer, Surkus, Kocher € 14,50

2012

V 210: Schmale zweibahnig vierstreifige Landstraßen (RQ 21)

Maier, Berger € 18,50

V 211: Innliegende Linkseinfädelsstreifen an plangleichen Knotenpunkten innerorts und im Vorfeld bebauter Gebiete

Richter, Neumann, Zierke, Seebo € 17,00

V 212: Anlagenkonzeption für Meistereigehöfte – Optimierung von Arbeitsabläufen

Schmauder, Jung, Paritschkow € 19,00

V 213: Quantifizierung von Verkehrsverlagerungen durch Baustellen an BAB

Laffont, Mahmoudi, Dohmen, Funke-Akbiyik, Vieten € 18,00

V 214: Vernetzungseignung von Brücken im Bereich von Lebensraumkorridoren

Schmellekamp, Tegethof
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 215: Stauprävention auf BAB im Winter

Kirschfink, Poschmann, Zobel, Schedler € 17,00

V 216: Verbesserung der Verkehrssicherheit auf einbahnig zweistreifigen Außerortsstraßen (AOSI)

Lippold, Weise, Jählig € 17,50

V 217: Verbesserung der Bedingungen für Fußgänger an Lichtsignalanlagen

Alrutz, Bachmann, Rudert, Angenendt, Blase, Fohlmeister, Häckelmann € 18,50

V 218: Empfehlungen zum richtigen Aufbringen von Tausalzlösungen

Hausmann € 16,00

V 219: Bewältigung großer Verkehrsmengen auf Autobahnen im Winter

Roos, Zimmermann, Schulz, Riffel € 16,50

2013

V 220: Maßnahmen zur Bewältigung der besonderen psychischen Belastung des Straßenbetriebsdienstpersonals – Pilotstudie

Pöpping, Pollack, Müller € 16,00

V 221: Bemessungsverkehrsstärken auf einbahnigen Landstraßen

Arnold, Kluth, Ziegler, Thomas € 18,50

V 222: Aktualisierung des MLuS 02 – Erstellung der RLuS

Düring, Flassak, Nitzsche, Sörgel, Dünnebeil, Rehberger € 19,50

V 223: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2010

Fitschen, Nordmann € 16,50
Dieser Bericht ist sowohl als gedrucktes Heft der Schriftenreihe als auch als CD erhältlich oder kann außerdem als kostenpflichtiger Download unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.

V 224: Prüfung und Bewertung von Schutzeinrichtungen der Aufhaltestufe H4b für den Einsatz auf Brücken – Teil 1 und 2

Bergerhausen, Klostermeier, Klöckner, Kübler € 19,00

V 225: Neue Technik für den Straßenbetriebsdienst – Teil 1: Neue Informations- und Kommunikationstechniken

Teil 2: Autonomes Fahren für den Straßenbetriebsdienst
Holldorb, Häusler, Träger € 21,50

V 226: Bewertungsmodell für die Verkehrssicherheit von Landstraßen

Maier, Berger, Schüller, Heine € 18,00

V 227: Radpotenziale im Stadtverkehr

Baier, Schuckließ, Jachtmann, Diegmann, Mahlau, Gässler € 17,00

V 228: Sicherheitskenngößen für den Radverkehr

Baier, Göbbels, Klemps-Kohnen € 15,50

V 229: Straßenverkehrszählungen (SVZ) mit mobilen Messsystemen

Schmidt, Frenken, Hellebrandt, Regniet, Mahmoudi € 20,50

V 230: Verkehrsadaptive Netzsteuerungen

Hohmann, Giuliani, Wietholt € 16,50

V 231: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2011

Fitschen, Nordmann € 28,50
Dieser Bericht ist sowohl als gedrucktes Heft der Schriftenreihe als auch als CD erhältlich oder kann außerdem als kostenpflichtiger Download unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.

V 232: Reflexkörper und Griffigkeitsmittel in Nachstreumittelgemischen für Markierungssysteme

Recknagel, Eichler, Koch, Proske, Huth € 23,50

V 233: Straßenverkehrszählung 2010 – Ergebnisse

Lensing € 16,00

V 234: Straßenverkehrszählung 2010 – Methodik

Lensing € 17,50

2014

V 235: **Dynamische Messung der Nachtsichtbarkeit von Fahr-
bahnmarkierungen bei Nässe**
Drewes, Laumer, Sick, Auer, Zehntner € 16,00

V 236: **Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2012**
Fitschen, Nordmann € 28,50
Die Ergebnisdateien sind auch als CD erhältlich oder können au-
ßerdem als kostenpflichtiger Download unter www.nw-verlag.de
heruntergeladen werden.

V 237: **Monitoring von Grünbrücken – Arbeitshilfe für den Nach-
weis der Wirksamkeit von Grünbrücken für die Wiedervernetzung
im Rahmen der KP II – Maßnahmen**
Bund-Länder Arbeitskreis
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [http://
bast.opus.hbz-nrw.de/](http://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden. Der Anhang ist
interaktiv. Das heißt er kann ausgefüllt und gespeichert werden.

V 238: **Optimierung der Arbeitsprozesse im Straßenbetriebs-
dienst – Sommerdienst**
Schmauder, Jung, Paritschkow € 19,00

V 239: **Dynamische Messung der Griffigkeit von Fahrbahnmar-
kierungen**
Steinauer, Oeser, Kemper, Schacht, Klein € 16,00

V 240: **Minikreisverkehre – Ableitung ihrer Einsatzbereiche und
Einsatzgrenzen**
Baier, Leu, Klemps-Kohnen, Reinartz, Maier, Schmotz € 23,50

V 241: **Rastanlagen an BAB – Verbesserung der Auslastung und
Erhöhung der Kapazität durch Telematiksysteme**
Kleine, Lehmann, Lohoff, Rittershaus € 16,50

V 242: **Bordsteinkanten mit einheitlicher Bordhöhe und Bodenin-
dikatoren an Überquerungsstellen**
Boenke, Grossmann, Piazzolla, Rebstock,
Herrnsdorf, Pfeil € 20,00

V 243: **Nutzen und Kosten von Verkehrsbeeinflussungsanlagen
über den gesamten Lebenszyklus**
Balmberger, Maibach, Schüller, Dahl, Schäfer € 17,50

V 244: **Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2013**
Fitschen, Nordmann € 28,50

V 245: **Überprüfung der Befahrbarkeit innerörtlicher Knotenpunk-
te mit Fahrzeugen des Schwerlastverkehrs**
Friedrich, Hoffmann, Axer, Niemeier, Tengen, Adams, Santel
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [http://
bast.opus.hbz-nrw.de/](http://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 246: **Auswirkungen von Lang-Lkw auf die Verkehrssicherheit in
Einfahrten auf Autobahnen**
Kathmann, Roggendorf, Kemper, Baier
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [http://
bast.opus.hbz-nrw.de/](http://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 247: **Befahrbarkeit plangleicher Knotenpunkte mit Lang-Lkw**
Lippold, Schemmel
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [http://
bast.opus.hbz-nrw.de/](http://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 248: **Verkehrsnachfragewirkungen von Lang-Lkw – Grundlage-
ermittlung**
Burg, Röhling
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [http://
bast.opus.hbz-nrw.de/](http://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

2015

V 249: **Auswirkungen von Querschnittsgestaltung und längsge-
richteten Markierungen auf das Fahrverhalten auf Landstraßen**
Schlag, Voigt, Lippold, Enzfelder

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [http://
bast.opus.hbz-nrw.de/](http://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 250: **Befahrbarkeit spezieller Verkehrsanlagen auf Autobahnen
mit Lang-Lkw**
Lippold, Schemmel
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [http://
bast.opus.hbz-nrw.de/](http://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 251: **Einsatzbereiche und Einsatzgrenzen von Straßenumge-
staltungen nach dem „Shared Space“-Gedanken**
Baier, Engelen, Klemps-Kohnen, Reinartz € 18,50

V 252: **Standortkataster für Lärmschutzanlagen mit Ertragsprogno-
se für potenzielle Photovoltaik-Anwendungen**
Gündra, Barron, Henrichs, Jäger, Höfle, Marx,
Peters, Reimer, Zipf € 15,00

V 253: **Auswirkungen von Lang-Lkw auf die Sicherheit und den
Ablauf des Verkehrs in Arbeitsstellen**
Baier, Kemper
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [http://
bast.opus.hbz-nrw.de/](http://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 254: **Beanspruchung der Straßeninfrastruktur durch Lang-Lkw**
Wellner, Uhlig
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [http://
bast.opus.hbz-nrw.de/](http://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 255: **Überholen und Räumen – Auswirkungen auf Verkehrssi-
cherheit und Verkehrsablauf durch Lang-Lkw**
Zimmermann, Riffel, Roos
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [http://
bast.opus.hbz-nrw.de/](http://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 256: **Grundlagen für die Einbeziehung der sonstigen Anlagen-
teile von Straßen in die systematische Straßenerhaltung als Vor-
aussetzung eines umfassenden Asset Managements**
Zander, Birbaum, Schmidt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [http://
bast.opus.hbz-nrw.de/](http://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

V 257: **Führung des Radverkehrs im Mischverkehr auf innerörtli-
chen Hauptverkehrsstraßen**
Ohm, Fiedler, Zimmermann, Kraxenberger, Maier
Hantschel, Otto € 18,00

V 258: **Regionale Erfassung von Straßenwetter-Daten**
Holldorb, Streich, Uhlig, Schäufele € 18,00

V 259: **Berücksichtigung des Schwerverkehrs bei der Modellie-
rung des Verkehrsablaufs an planfreien Knotenpunkten**
Geistefeldt, Sievers
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [http://
bast.opus.hbz-nrw.de/](http://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

Alle Berichte sind zu beziehen im:

Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7
28195 Bremen
Tel. (0421) 3 69 03-53
Fax (0421) 3 69 03-48
www.schuenemann-verlag.de

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.