
Verkehrsablauf und Verkehrssicherheit an Arbeitsstellen auf Autobahnen unter unterschiedlichen Randbedingungen

Berichte der Bundesanstalt
für Straßenwesen
Verkehrstechnik Heft V 378

Verkehrsablauf und Verkehrssicherheit an Arbeitsstellen auf Autobahnen unter unterschiedlichen Randbedingungen

von

Justin Geistefeldt, Nina von der Heiden

Lehrstuhl für Verkehrswesen – Planung und Management,
Ruhr Universität Bochum

Markus Oeser, Dirk Kemper, Eugen Diner

Institut für Straßenwesen der RWTH Aachen University

Michael M. Baier, Alexandra Klemps-Kohnen

BSV Büro für Stadt- und Verkehrsplanung Dr.-Ing. Reinhold Baier GmbH,
Aachen

Berichte der Bundesanstalt
für Straßenwesen
Verkehrstechnik Heft V 378

bast 
Bundesanstalt für
Straßenwesen

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 Kommunikation.

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

Seit 2015 stehen die Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 01.0176
Verkehrsablauf und Verkehrssicherheit an Arbeitsstellen
auf Autobahnen unter unterschiedlichen Randbedingungen

Fachbetreuung:
Kerstin Lemke, Andreas Coumanns

Referat:
Straßenentwurf, Verkehrsablauf, Verkehrsregelung

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

Redaktion:
Stabsstelle Presse und Kommunikation

Gestaltungskonzept:
MedienMélange: Kommunikation

Druck und Verlag:
Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
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 978-3-95606-783-9 | <https://doi.org/10.60850/bericht-v378>

Bergisch Gladbach, Mai 2024

Kurzfassung – Abstract

Verkehrsablauf und Verkehrssicherheit an Arbeitsstellen auf Autobahnen unter unterschiedlichen Randbedingungen

Im Rahmen der Untersuchung wurden Kapazitäten, q-v-Diagramme und Unfallkenngrößen für Arbeitsstellen längerer und kürzerer Dauer auf Autobahnen ermittelt. Die Ergebnisse können in die Parametrierung eines Verkehrsanalyse-Systems zur Bewertung der Auswirkungen von Arbeitsstellen auf den Verkehrsablauf und die Verkehrssicherheit im Rahmen der Baubetriebsplanung auf Bundesautobahnen einfließen.

Für die empirische Kapazitätsanalyse wurden Verkehrsdaten von Zählstellen im Zulauf von 40 Arbeitsstellen längerer Dauer und 111 Arbeitsstellen kürzerer Dauer mit unterschiedlichen Verkehrsführungen ausgewertet. Die Ermittlung der Kapazitäten und q-v-Diagramme an Arbeitsstellen längerer Dauer orientierte sich dabei an der Methodik zur Herleitung der Kapazitätswerte und q-v-Beziehungen im Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS). Die Kapazität von Arbeitsstellen kürzerer Dauer wurde durch die Auswertung der Verkehrsstärken im Stauabfluss ermittelt. Aus den Ergebnissen der empirischen Analysen wurden standardisierte Kapazitätswerte abgeleitet. Als maßgebende Einflussgrößen auf die Kapazität von Arbeitsstellen längerer Dauer wurden die Lage innerhalb oder außerhalb von Ballungsräumen, das Vorhandensein einer Fahrbahnteilung, die Fahrstreifenbreite sowie der Schwerverkehrsanteil und die Steigung identifiziert. In Arbeitsstellen kürzerer Dauer bestimmen die Lage innerhalb oder außerhalb von Ballungsräumen und die Seite des Fahrstreifeneinzugs maßgeblich die Kapazität.

Für die Ermittlung von Unfallkostenraten und Unfallraten wurde das Unfallgeschehen in 141 Arbeitsstellen längerer Dauer und rund 21.000 Arbeitsstellen kürzerer Dauer mit unterschiedlichen Verkehrsführungen analysiert. Dabei erfolgte eine Betrachtung einzelner Bereiche innerhalb der Arbeitsstellen (Zulauf, Überleitung/Verschwenkung, Innenbereich, Rückleitung/Rückverschwenkung), für die differenzierte Unfallkostenraten und Unfallraten bestimmt wurden.

Traffic flow and safety in freeway work zones with different geometric layouts and section characteristics

Within the investigation, capacities, speed-flow relationships, crash rates for long-term and short-term freeway work zones were determined. The findings can be implemented into a new traffic analysis tool provided for application by German road authorities.

For the empirical capacity analysis, traffic data from loop detectors upstream of 40 long-term and 111 short-term work zones with different work zone layouts were analyzed. The capacity estimation for long-term work zones was based on the methodology used for the derivation of the design capacities provided in the German Highway Capacity Manual (HBS). For short-term work zones, valid capacity estimates were determined for the post-breakdown congestion outflow. From the results of the empirical analysis, standard capacities were derived. The lane widths, the existence of divided lanes, the longitudinal gradient as well as the share of commuters and heavy vehicles were identified as relevant parameters influencing the capacity of long-term work zones. For short-term work zones, the share of commuters and the side of the lane closure (left or right lane) influence the capacity.

For the determination of crash cost rates and crash rates, the crash occurrence at 141 short-term and about 21000 long-term work zones with different work zone layouts was analyzed. For individual sectors within the work zones (e.g. approaching area, crossover, interior area), differentiated crash cost rates and crash rates were determined.

Summary

Traffic flow and safety in freeway work zones with different geometric layouts and section characteristics

1 Objective

Work zones considerably influence the traffic flow quality on freeways. The ex-ante evaluation of the impact of work zones on congestion and crash occurrence is an important instrument to consider alternative work zone layouts in the planning process and hence to reduce the extent of congestion and crash costs.

Up to now, the traffic impacts of long-term work zones on German freeways are estimated with an approximate model of the German guidelines for work zone management on federal motorways. The impact on traffic safety is not taken into account so far. A model to estimate the impact of short-term work zones is also not available. In the near future, a new traffic analysis tool provided for application by German road authorities shall allow for a holistic ex-ante assessment of traffic flow and traffic safety in long-term and short-term work zones. The objective of the investigation was to determine capacities, speed-flow relationships, crash cost rates, and crash rates for long-term and short-term work zones with different geometric layouts and section characteristics based on detailed empirical analyses, which are proposed to be used as input parameters for the traffic analysis tool.

2 Methodology

The investigation started with a statistical evaluation of the common work zone layouts on German federal motorways applied in the last years, which should be used as a base for the selection of an appropriate data set. Furthermore, national and international literature concerned with traffic flow and traffic safety in long-term and short-term work zones as well as theoretical backgrounds of methods to determine traffic flow and safety parameters were analyzed.

The investigation is divided into the analysis of traffic flow and traffic safety.

2.1 Traffic Flow

The capacity of long-term and short-term work zones was estimated based on traffic data from loop and radar detectors. For approximately 500 long-term and 1,200 short-term work zones in several German federal states, the availability of data from upstream or inside of work zones was analyzed. The data was checked for plausibility and the number of traffic breakdowns. 66 directional work zone layouts of long-term work zones and 156 short-term work zones were found suitable for a capacity analysis. The analysis of the speed-flow diagram in long-term work zones covered 28 directional work zone layouts.

The methods to estimate the capacity of long-term work zones were similar to those applied for the revision of the design capacities provided in the German Highway Capacity

Manual (HBS 2015). On the one hand, deterministic capacity estimates were determined by fitting the model of van Aerde (1995) to speed-flow data in one-hour intervals. On the other hand, stochastic methods to determine capacity distribution functions in 5-minute intervals were applied. Based on a comparative analysis of the capacity distribution function and the deterministic capacity, the 5th percentile of the capacity distribution function was used as the nominal capacity for the determination of standardized capacity values in one-hour intervals. In addition, the 99th percentile of the observed traffic volumes in one-hour intervals was defined as upper limit of the capacity estimate.

Based on the empirically estimated capacities, standardized capacity values for work zones were derived. For this, an existing capacity model from the German work zone management guidelines was modified and recalibrated. The lane widths and the speed limit within the work zone, the location of the work zone in rural or urban areas, the heavy vehicle percentage, and the longitudinal gradient were considered as parameters which possibly influence the capacity.

The analysis of the speed-flow relationships inside the work zones was based on the methodology applied for the revision of the speed-flow diagrams given in the HBS 2015. For all 28 work zones, the free-flow speed and the gradient of the speed-flow relationship at free-flow conditions were determined based on the traffic model by BRILON und PONZLET (1995). Based on the empirical data as well as plausibility considerations for combinations of work zone parameters not covered by the data samples, the model parameters V_0 and L_0 were optimized for predefined values of the speed at capacity v_{krit} . In contrast to the speed-flow diagrams given in the HBS, which are provided for a definite number of capacities for different types of motorway segments, the derived model provides an unlimited number of possible capacities due to the consideration of the heavy vehicle percentage as an input parameter. Due to this, the parameter C_0 could not be adapted independently but is estimated as a function of the model capacity C and the parameters V_0 , L_0 , and v_{krit} .

In addition to the analysis of the loop detector data, traffic measurements in 14 directional work zone layouts were carried out to analyze additional traffic flow parameters inside the work zone. Furthermore, traffic flow simulations were performed to determine the impact of high heavy vehicle percentages and longitudinal gradients on the capacity of long-term work zones. The results of the traffic measurements were used for the calibration of microscopic simulation models.

In contrast to long-term work zones, traffic flow data measured in short-term work zones includes only one traffic breakdown observation in most cases. This breakdown often occurs immediately after the lane closure, which means that the pre-breakdown volume does not represent the capacity of the work zone. Hence, valid capacity estimates could only be determined for the post-breakdown congestion outflow. The post-breakdown capacity for each work zone was determined as the average traffic volume during congested conditions. To determine the parameters which significantly influence the capacity and to derive standardized capacity values for short-term work zones, statistical methods like scatterplots and regression models were applied. The considered parameters were the work zone layout, the daytime, the day of the week, the location of the work zone in rural or urban areas, the heavy vehicle percentage, and the longitudinal gradient.

2.2 Traffic Safety

The road safety analysis covered long-term and short-term work zones. The investigation was based on data containing specific information on the analyzed work zones collected in

a work zone data base. A second data base was introduced to accumulate all crash data. Therefore, information about the location, the date, and the severity of crashes as well as the number of victims and the severity of injuries was included. Traffic data from loop detectors of the German Federal Highway Research Institute were used to estimate crash cost rates and crash rates, which depend on the traffic flow.

For the safety analysis of long-term work zones, the work zone was divided into five subsegments: approaching area, upstream crossover, interior area, downstream crossover, and accelerating area. For each segment, crash costs and crash cost rates were determined for all considered directional work zone layouts. In addition, crash rates, which indicate the frequency of a flow disturbances caused by crashes in the work zone, were determined.

The total number of analyzed long-term work zones amounts to 175. Since complete data containing all crash categories were not available for the whole collective, crash rates and crash cost rates were determined for only 141 long-term work zones. These work zones included ten different directional work zone layouts with and six different layouts without crossovers.

The short-term work zones were divided into daytime and nighttime work zones. The analysis of traffic safety was focused on the approaching area and the interior area of the work zone. 20,745 work zones (16,991 daytime work zones and 3,754 nighttime work zones) could be analyzed, including six different work zone layouts on two-lane carriageways, seven different layouts on three-lane carriageways, and five different layouts on four-lane carriageways.

After determining the crash rates and crash cost rates for each work zone, the results were summarized to obtain typical crash rates and crash cost rates for different layouts of long-term and short-term work zones.

3 Results

3.1 Traffic Flow

In total, the capacities of 40 long-term work zones could be empirically estimated. At the other work zones, valid capacity estimates could not be determined due to a lack of traffic breakdowns. Based on these results, capacity reduction factors related to different work zone parameters were determined by means of optimization procedures. Relevant parameters influencing the capacity of long-term work zones are

- the location of the work zone in rural or urban areas,
- the existence of divided lanes,
- the lane widths, subdivided into three width clusters,
- the longitudinal gradient, subdivided into three gradient clusters, and
- the heavy vehicle percentage.

In contrast to the existing capacity model given in the German guidelines for work zone management on federal motorways, the passenger car equivalent used to transform the capacity from veh/h to pcu/h is independent of the longitudinal gradient. As a result, a formula to determine the capacity in veh/h depending on the relevant parameters is

provided. In contrast to the existing capacity model, a crossover of lanes onto the opposite carriageway and a reduction of the number of lanes could not be identified as affecting the capacity.

Speed-flow diagrams could be determined for 28 long-term work zones. Relevant parameters influencing the speed are the number of lanes, the speed limit, the heavy vehicle percentage, and the longitudinal gradient. For the application of the traffic model by BRILON and PONZLET (1995), values of the model parameters V_0 and L_0 as well as the critical speed v_{krit} are provided. The parameter C_0 is determined as a function of the model capacity C and the parameters V_0 , L_0 , and v_{krit} .

For a total of 111 short-term work zones, the average traffic volume during congested conditions was determined as capacity estimate. Based on statistical considerations and regression analysis,

- the location of the work zone in rural or urban areas and
- the side of the lane closure (left or right lane)

were identified as parameters significantly influencing the capacity. The share of heavy vehicles, the day of the week, and the time of day showed no significant influence on the capacity. For parameters which could not be analyzed based on the empirical samples, the influence on the capacity was estimated by plausibility considerations. As a result, a formula to determine the capacity in veh/h according to the relevant parameters of the short-term work zone is provided.

In the traffic flow simulations, the empirically identified influence of high longitudinal gradients on the capacity could be roughly reproduced. However, the simulation results revealed a smaller impact of high heavy vehicle percentages on the capacity than the empirical results. This is mainly due to the lack of simulation models incorporating the specific driver behavior in work zones, particularly concerning the avoidance of overtaking slower trucks on narrow lanes within work zones.

3.2 Traffic Safety

Based on the determined directional mean crash cost rates for long-term work zones, results of former investigations, and conclusions by analogy, crash cost rates were derived for all defined work zone subsegments (approaching area, upstream crossover, interior area, downstream crossover, accelerating area). For this, subsegments of different work zone layouts with comparable features in terms of traffic flow and safety were partly considered in summary.

Based on the estimated crash cost rates, the crash costs were determined. Relevant parameters influencing the safety of long-term work zones are the work zone layout, the subsegment type, the length, the lane width, and the speed limit in the interior area. Narrowing the rightmost lane has a negative influence on traffic safety, whereas a low speed limit of 60 km/h has a positive influence. Crash cost rates and crash rates in the interior area are considerably smaller than in the other sections. The approaching area and the crossover are the most critical sections in most work zone layouts. Hence, the average crash rate of a work zone increases with increasing length because the influence of the interior area – with comparatively few crashes – increases.

Based on the determined directional mean crash cost rates, results of former investigations, and conclusions of analogy, typical crash cost rates and crash rates were derived for the approaching and interior area of short-term work zones. For this, different

work zone layouts with comparable features in terms of traffic flow and safety were partly considered in summary. The relevant parameter influencing the safety of short-term work zones is the work zone layout. Work zones with a closure of the rightmost lane or the two right lanes are less safe than work zones with a closure of the left lane or lanes. The crash cost rates and crash rates in the approaching area of work zones with a lane closure are higher than the rates in the interior area.

4 Conclusions

As the main result of the investigation, capacities, speed-flow diagrams, crash cost rates, and crash rates for long-term and short-term freeway work zones, which can be implemented in a new traffic analysis tool provided for application by German road authorities, are provided. Furthermore, the results can be a basis for optimized work zone planning procedures. Concerning the influencing parameters on the capacity of work zones, some findings contradict those of previous investigations. This applies to the impact of lane reductions and the existence of divided lanes on the capacity. The derived crash cost rates and crash rates for long-term and short-term work zones allow a comparative evaluation of traffic safety for different work zone layouts.

Inhalt

1	Einleitung	14
1.1	Motivation und Zielsetzung	14
1.2	Methodisches Vorgehen und Untersuchungskonzept	15
2	Arbeitsstellen auf Autobahnen	18
2.1	Definition	18
2.2	Einrichtungsmerkmale von Arbeitsstellen	18
2.3	Verkehrssicherheitseinrichtungen in Arbeitsstellen	22
2.4	Übersicht von Arbeitsstellen auf Bundesautobahnen	25
2.4.1	Arbeitsstellen längerer Dauer	25
2.4.2	Arbeitsstellen kürzerer Dauer	27
3	Theoretische Grundlagen und Kenntnisstand zum Verkehrsablauf in Arbeitsstellen auf Autobahnen	29
3.1	Verkehrsablauf auf Autobahnen	29
3.1.1	Fundamentaldiagramm	30
3.1.2	Verkehrsflussmodelle	31
3.2	Kapazität auf Autobahnen	34
3.2.1	Definition der Kapazität	34
3.2.2	Einflüsse auf die Kapazität	34
3.2.3	Kapazität von Arbeitsstellen auf Autobahnen	36
3.3	Methoden der Kapazitätsbestimmung	38
3.3.1	Deterministische Kapazitätsermittlung	38
3.3.2	Stochastische Kapazitätsanalyse	39
3.4	Bisherige Untersuchungen zum Verkehrsablauf an Arbeitsstellen	43
3.4.1	Nationale Untersuchungen	43
3.4.2	Internationale Untersuchungen	51

4	Theoretische Grundlagen und Kenntnisstand zur Verkehrssicherheit in Arbeitsstellen auf Autobahnen	56
4.1	Bewertung der Verkehrssicherheit	56
4.1.1	Unfallkenngrößen	56
4.1.2	Ermittlung der Unfallkosten	63
4.2	Untersuchungen zur Verkehrssicherheit in Arbeitsstellen	64
4.2.1	Arbeitsstellen längerer Dauer	64
4.2.2	Arbeitsstellen kürzerer Dauer	68
4.3	Neuartige Methoden zur Verbesserung des Verkehrsablaufs und der Verkehrssicherheit in Arbeitsstellen	69
4.3.1	Modifiziertes Reißverschlussverfahren	70
4.3.2	„Versetzt Fahren“ in der Arbeitsstelle	70
4.3.3	Permanenter Linkseinzug bei Arbeitsstellen kürzerer Dauer	71
5	Analyse des Verkehrsablaufs – Dauerzählstellendaten	73
5.1	Kapazität von Arbeitsstellen längerer Dauer	73
5.1.1	Datengrundlage und Untersuchungskollektiv	73
5.1.2	Datenaufbereitung	76
5.1.3	Methodik und Ergebnisse der deterministischen und stochastischen Kapazitätsanalysen	77
5.1.4	Einflussgrößen auf den Verkehrsablauf	81
5.1.5	Ableitung von standardisierten Kapazitäten	85
5.1.6	Vergleich des entwickelten Kapazitätsmodells mit dem RBAP-Modell und Literaturangaben	97
5.2	q-v-Diagramme in Arbeitsstellen längerer Dauer	98
5.2.1	Datengrundlage und Untersuchungskollektiv	98
5.2.2	Methodik und Ergebnisse der Analyse der q-v-Diagramme	99
5.2.3	Ableitung von standardisierten q-v-Diagrammen	102
5.3	Kapazität von Arbeitsstellen kürzerer Dauer	104
5.3.1	Datengrundlage und Untersuchungskollektiv	104
5.3.2	Methodik und Ergebnisse der Kapazitätsermittlung	109
5.3.3	Einflussgrößen auf den Verkehrsablauf	110
5.3.4	Statistische Bewertung der Einflussgrößen	113

5.3.5	Ableitung von standardisierten Kapazitäten	125
5.3.6	Vergleich des entwickelten Kapazitätsmodells mit dem RBAP-Modell und Literaturangaben	128
6	Analyse des Verkehrsablaufs – Verkehrsmessungen	131
6.1	Methodik und Untersuchungskollektiv	131
6.2	Darstellung und Auswertung der Ergebnisse	140
7	Mikroskopische Verkehrsflusssimulation	148
7.1	Zielsetzung	148
7.2	Simulationsprogramm	148
7.3	Simulationsnetze und Kalibrierung	148
7.4	Durchführung und Ergebnisse der Simulationen	153
8	Analyse der Verkehrssicherheit	156
8.1	Datengrundlagen	156
8.2	Arbeitsstellen längerer Dauer	157
8.2.1	Untersuchungsmethodik	157
8.2.2	Untersuchungskollektiv	159
8.2.3	Verunglücktenstruktur	161
8.2.4	Unfallraten und Unfallkostenraten	163
8.2.5	Ableitung standardisierter Unfallkostenraten und Unfallraten	169
8.3	Arbeitsstellen kürzerer Dauer	176
8.3.1	Untersuchungsmethodik	176
8.3.2	Untersuchungskollektiv	177
8.3.3	Ergebnisse	181
8.3.4	Ableitung standardisierter Unfallkostenraten und Unfallraten	183
9	Empfehlungen für eine standardisierte Bewertung der Verkehrsqualität und Verkehrssicherheit in Arbeitsstellen	185
9.1	Kapazitäten	185
9.2	q-v-Diagramme	188

9.3	Unfallkostenraten und Unfallraten	190
9.3.1	Einflussgrößen auf die Verkehrssicherheit	190
9.3.2	Unfallkosten einer Arbeitsstelle längerer Dauer	192
9.3.3	Anzahl der Unfälle in einer Arbeitsstelle längerer Dauer	198
9.3.4	Unfallkosten einer Arbeitsstelle kürzerer Dauer	206
9.3.5	Anzahl der Unfälle in einer Arbeitsstelle kürzerer Dauer	207
10	Zusammenfassung	210
	Literatur	216
	Bilder	224
	Tabellen	229

Anhang

Anhang A: Ergebnisse der Kapazitätsanalyse an Arbeitsstellen längerer Dauer

Anhang B: Ergebnisse der Kapazitätsanalyse an Arbeitsstellen kürzerer Dauer

Die Anhänge zum Bericht sind im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de> abrufbar.

1 Einleitung

1.1 Motivation und Zielsetzung

Ausbau-, Erneuerungs- und Instandhaltungsmaßnahmen auf Bundesautobahnen erfordern regelmäßig Eingriffe in den Verkehrsablauf und können die Verkehrssicherheit beeinflussen. Gerade auf hochbelasteten Strecken kann die verkehrliche und sicherheitstechnische Bewertung im Vorfeld der Einrichtung einer Arbeitsstelle als wichtiges Mittel zur Stauvermeidung angesehen werden. Im Rahmen des Arbeitsstellenmanagements ist deswegen eine möglichst genaue Nachbildung des Verkehrsablaufs zur Einschätzung und zum Vergleich der verkehrlichen und sicherheitstechnischen Auswirkungen verschiedener Arbeitsstelleneinrichtungen von großer Bedeutung. Durch eine Verengung und/oder den Einzug von Fahrstreifen sowie durch dynamisch ungünstige Verkehrsführungen können die Kapazität der Strecke im Bereich einer Arbeitsstelle erheblich reduziert und das Unfallrisiko besonders für Unfälle mit leichtem Sachschaden deutlich erhöht werden. Gleichzeitig existieren aber auch verschiedene Strategien, um den Einfluss einer Arbeitsstelle möglichst gering zu halten, wie z. B. der Verzicht auf Fahrstreifenreduktionen oder die Einrichtung möglichst breiter Behelfsfahrstreifen. Ein flüssiger Verkehrsablauf verringert zudem die Unfallgefahr.

Bislang werden die verkehrlichen Auswirkungen einer Arbeitsstelle auf Autobahnen mit einer Dauer von vier und mehr Tagen im Rahmen der sogenannten Baubetriebsplanung mit dem überschlägigen Bewertungsverfahren nach dem Leitfaden zum Arbeitsstellenmanagement auf Bundesautobahnen (BMVBS, 2011a) ermittelt, in dem die Verkehrsnachfrage in der Spitzenstunde und die Kapazität gegenübergestellt werden, und von den planenden Dienststellen an das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) gemeldet. Im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen wurde ein sogenanntes Verkehrsanalyzesystem (VAS) entwickelt. Das VAS soll das derzeitige Verfahren ersetzen und auf der Grundlage des Prinzips einer Ganzjahresanalyse eine deutlich detailliertere Bewertung des Verkehrsablaufs an Arbeitsstellen ermöglichen. Die Entwicklung des methodischen Ansatzes für das System erfolgte in der Untersuchung von GEISTEFELDT und HOHMANN (2014). Die Ermittlung der Kapazitäten, q-v-Diagramme, Unfallraten und Unfallkostenraten für die Verwendung im VAS ist Gegenstand der vorliegenden Untersuchung.

Der Verkehrsablauf und die Verkehrssicherheit von Arbeitsstellen wurden zuvor schon in zahlreichen Untersuchungen behandelt. Da die Schwerpunkte und Analysemethoden zum Teil sehr stark voneinander abweichen, sind Vergleiche nur bedingt möglich. Vor allem in Untersuchungen der Kapazität von Arbeitsstellen wurden unterschiedliche Einflussfaktoren berücksichtigt und verschiedene Definitionen der Kapazität angewendet. Bei Verkehrssicherheitsuntersuchungen wurden in der Regel nur Teilaspekte oder spezifische Fragestellungen, wie z. B. die Sicherheit bei Arbeitsstellen mit Gegenverkehrstrennung oder die Wirkung der Arbeitsstellenausstattung auf den Verkehrsteilnehmer, untersucht.

Ziel der vorliegenden Untersuchung ist deshalb eine umfassende empirische Analyse des Verkehrsablaufs und der Verkehrssicherheit im Bereich von Arbeitsstellen auf Autobahnen mit einheitlichen Analysemethoden. Hierbei sollen möglichst alle relevanten Kombinationen der maßgebenden Einflussgrößen, sowohl für die Kapazität als auch für die Verkehrssicherheit, ermittelt und analysiert werden. Als Ergebnis sollen standardisierte Verkehrs- und Sicherheitskenngrößen abgeleitet werden.

1.2 Methodisches Vorgehen und Untersuchungskonzept

Das methodische Vorgehen und das sich hieraus ergebende Untersuchungskonzept umfasste die Durchführung von sieben aufeinander aufbauenden Arbeitsschritten:

1. Grundlagenstudie,
2. Analyse der Baubetriebsmeldungen aus den Jahren 2003 bis 2012:
 - Erarbeitung einer Übersicht von Arbeitsstellen längerer und kürzerer Dauer auf Bundesautobahnen,
 - Schaffung einer Grundlage zur Festlegung eines Arbeitsstellen- bzw. Untersuchungskollektivs,
3. Analyse des Verkehrsablaufs in Arbeitsstellen längerer und kürzerer Dauer,
4. Durchführung ergänzender Untersuchungen an ausgewählten Arbeitsstellen und mikroskopische Simulation des Verkehrsflusses,
5. Analyse der Verkehrssicherheit in Arbeitsstellen längerer und kürzerer Dauer,
6. Ermittlung von standardisierten Verkehrs- und Sicherheitskenngrößen,
7. Zusammenführung der Ergebnisse und Ableitung von Empfehlungen für eine standardisierte Bewertung der Verkehrsqualität und der Verkehrssicherheit im Rahmen der Baubetriebsplanung.

Die Arbeitsschritte und deren einzelne Bausteine sind in Bild 1-1 in ihrem Zusammenhang dargestellt und werden nachfolgend detailliert beschrieben.

Im Rahmen der Grundlagenstudie erfolgte zunächst eine Analyse und Dokumentation einschlägiger nationaler und internationaler Literaturquellen, die sich mit dem Verkehrsablauf und der Verkehrssicherheit an Arbeitsstellen längerer und kürzerer Dauer befassen. In die Dokumentation wurden auch Erkenntnisse zu aktuellen Entwicklungen im Bereich der Verbesserung des Verkehrsablaufs und der Verkehrssicherheit einbezogen.

Zur Erarbeitung einer Gesamtübersicht über die Arbeitsstellen auf Bundesautobahnen und zur Schaffung einer Ausgangslage für das Erstellen einzelner Untersuchungskollektive wurde im zweiten Arbeitsschritt eine ausführliche Analyse von Baubetriebsmeldungen aus den Jahren 2003 bis 2012 vorgenommen, da für diese Jahre vollständige Baubetriebsmeldungen der Bundesländer vorlagen. Hierfür wurden z. B. Häufigkeitsverteilungen einzelner Verkehrsführungen sowie Einrichtungslängen und -dauern untersucht. Auf der Grundlage dieser Analysen erfolgte anschließend eine repräsentative Auswahl von Arbeitsstellen aus den Ländern Baden-Württemberg, Bayern, Hessen, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz. Da für die Analysen des Verkehrsablaufs umfassende Daten von Dauerzählstellen aus Hessen und Nordrhein-Westfalen für die Jahre von 2009 bzw. 2010 bis 2012 vorlagen, wurden im Wesentlichen Arbeitsstellen aus diesen Ländern und Zeiträumen analysiert. Ergänzt wurden diese Auswertungen durch Ergebnisse vergleichbarer Verkehrssicherheitsuntersuchungen an Arbeitsstellen aus den Jahren 2003 bis 2006 sowie durch Verkehrsablaufuntersuchungen einzelner Arbeitsstellen aus den Jahren 2001, 2013 und 2014.

Im Rahmen der Analyse des Verkehrsablaufs wurden zur Ermittlung der Kapazität von Arbeitsstellen längerer und kürzerer Dauer deterministische und stochastische Kapazitätsanalysen auf der Grundlage der Daten von Dauerzählstellen im Zulauf von Arbeitsstellen durchgeführt. Anhand von Zählstellendaten aus dem Innenbereich von Arbeitsstellen längerer Dauer wurde darüber hinaus der q-v-Zusammenhang analysiert. Die Untersuchungs-

methodik orientierte sich dabei eng an der für die Fortschreibung der Bemessungsverfahren des Handbuchs für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS; FGSV, 2015) für Strecken von Autobahnen angewandten Methodik (vgl. BRILON und GEISTEFELDT, 2010).

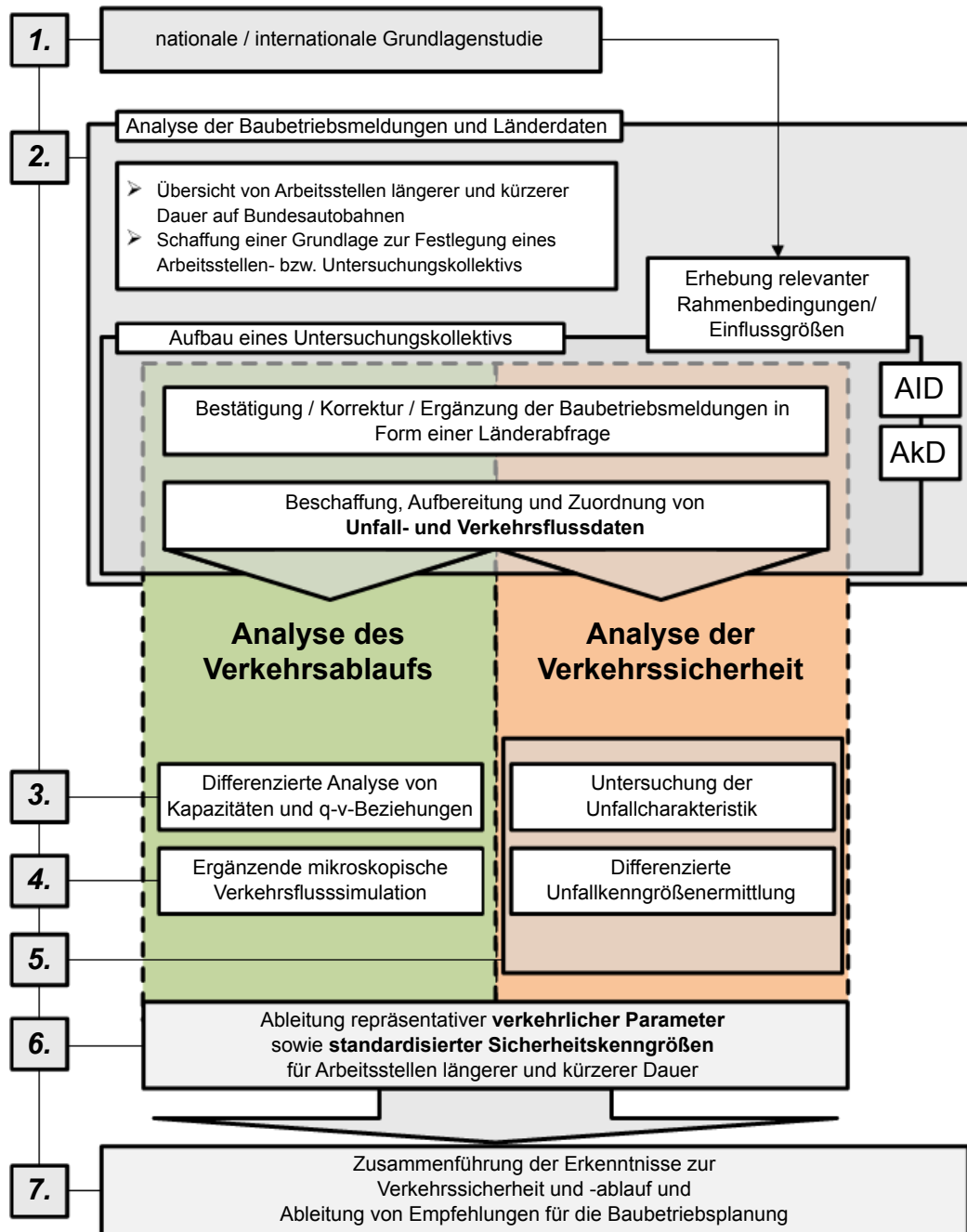


Bild 1-1: Ablaufdiagramm Untersuchungskonzept

Um auch eine Berücksichtigung von Konstellationen vornehmen zu können, die nicht oder nicht in ausreichendem Umfang anhand empirischer Daten erfasst werden konnten, wurden ergänzende mikroskopische Verkehrsflusssimulationen mit dem Simulationsprogramm BABSIM durchgeführt. Als Eingangswerte wurden hierbei Erkenntnisse über den Verkehrsablauf in Innenbereichen von Arbeitsstellen verwendet, die im Rahmen von Verkehrsmessungen gewonnen wurden.

Für die Analyse der Verkehrssicherheit wurden den ausgewählten Arbeitsstellen die Unfalldaten von zugehörigen, d. h. während der Bauzeit vorgefallenen, Unfällen aus einer Gesamtunfalldatenmenge zugeordnet. Hierbei wurde eine Einteilung der Arbeitsstellen in kleinstmögliche Teilbereiche vorgenommen, wodurch auch spezifische Erkenntnisse über Sonderbereiche wie Überleitungen, Zu- oder Nachlaufbereiche gewonnen werden konnten.

Neben der Untersuchung der Unfallcharakteristik wurden sowohl für Arbeitsstellen längerer als auch kürzerer Dauer relevante Unfallkenngrößen – insbesondere Unfallkostenraten – ermittelt. Die sowohl nach den relevanten Verkehrsführungen als auch nach den verschiedenen Teilbereichen innerhalb der Arbeitsstellen differenzierten Unfallkostenraten ermöglichen eine praxistaugliche Bewertung der zu erwartenden Auswirkungen verschiedener Verkehrsführungen in Abhängigkeit von den gegebenen Randbedingungen (DTV, verfügbare Fahrbahnbreite, realisierbare Breite der Behelfsfahrstreifen usw.).

Abschließend wurden, basierend auf den Ergebnissen der vorhergehenden Untersuchungsschritte, Standardwerte zum einen für die Kapazitäten und zum anderen für die Unfallkostenraten vorgeschlagen sowie Empfehlungen für eine standardisierte Bewertung der Verkehrsqualität und der Verkehrssicherheit im Rahmen der Baubetriebsplanung abgeleitet.

2 Arbeitsstellen auf Autobahnen

2.1 Definition

Die Planung einer Arbeitsstelle orientiert sich in Deutschland hauptsächlich an zwei Richtlinien. Dies sind zum einen die in der Überarbeitung befindlichen Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen (RSA; BMV, 1995) und zum anderen der Leitfaden zum Arbeitsstellenmanagement auf Bundesautobahnen (BMVBS, 2011a), der die Richtlinien zur Baubetriebsplanung auf Autobahnen (RBAP; BMV, 1996) im Jahr 2011 abgelöst hat. Die RSA behandeln dabei eher die Aspekte der Arbeitsstelleneinrichtung und der verkehrstechnischen Ausstattung, wohingegen der Leitfaden sich vordergründig mit dem reibungslosen Verkehrsablauf innerhalb der Arbeitsstellen und dem Arbeitsstellenmanagement beschäftigt und dementsprechend häufig engere Beschränkungen vorgibt als die RSA. Als Ergänzung zum Leitfaden existieren die Ausführungshinweise zum Leitfaden zum Arbeitsstellenmanagement auf Bundesautobahnen (BMVBS, 2011b), die ergänzende und vertiefende Hinweise enthalten und regelmäßig aktualisiert werden sollen.

Als Arbeitsstellen werden gemäß den RSA (BMV, 1995) „solche Stellen bezeichnet, bei denen Verkehrsflächen vorübergehend für Arbeiten gesperrt werden“. Grund hierfür können z. B. Arbeiten an der Straße selber oder neben bzw. über der Straße sein. Dazu gehören sowohl Bauarbeiten zur Erhaltung, Erweiterung oder Erneuerung von Straßen und der zugehörigen Bauwerke als auch Unterhaltungsarbeiten, wie Grasschnitt, Reinigungs- oder Markierungsarbeiten. Der Begriff „Arbeitsstelle“ gilt grundsätzlich für alle Arbeitsstellen. Der Begriff „Baustelle“ wird erst dann verwendet, wenn tatsächlich Baumaßnahmen (im Gegensatz zu Maßnahmen der betrieblichen Erhaltung) an der Straße durchgeführt werden. Im Folgenden wird in der Regel der Begriff „Arbeitsstelle“ verwendet. Da es sich bei Arbeitsstellen längerer Dauer immer um Baustellen handelt, wird dieser Begriff an einigen Stellen gleichbedeutend verwendet. Auch feststehende Begrifflichkeiten, wie z. B. bei Tag- und Nachtbaustellen, werden beibehalten.

2.2 Einrichtungsmerkmale von Arbeitsstellen

Arbeitsstellen längerer und kürzerer Dauer

Grundsätzlich wird zwischen Arbeitsstellen längerer und kürzerer Dauer unterschieden. Nach den RSA (BMV, 1995) und dem Leitfaden zum Arbeitsstellenmanagement (BMVBS, 2011a) sind alle Arbeitsstellen, die mindestens einen Tag lang durchgehend und ortsfest eingerichtet sind, als Arbeitsstellen längerer Dauer (AID) aufzufassen. Arbeitsstellen kürzerer Dauer (AkD) bestehen hingegen nur für eine begrenzte Anzahl von Stunden innerhalb eines Tages (Tagesbaustellen). Hierbei handelt es sich in der Regel um Maßnahmen der betrieblichen Erhaltung (Kontroll- und Prüftätigkeiten, Wartungs- und Pflegemaßnahmen und Kleinreparaturen).

Die RBAP (BMV, 1996) verwendeten eine zu den RSA (BMV, 1995) abweichende Definition, nach der alle Arbeitsstellen mit einer Dauer von mindestens acht Tagen als Arbeitsstellen längerer Dauer ausgewiesen wurden und dem BMV zu melden waren. Mit der Ablösung der RBAP durch den Leitfaden zum Arbeitsstellenmanagement im Jahr 2011 (BMVBS, 2011a) wurden die Definitionen nach den oben angegebenen Regeln vereinheitlicht. Das zugehörige Allgemeine Rundschreiben Straßenbau (ARS) Nr. 04/2011 (BMVBS, 2011c) regelt jedoch, dass Arbeitsstellen ab einer Dauer von mindestens vier Tagen dem BMVBS zu melden sind. Mit der Entwicklung des VAS können perspektivisch auch kürzere Arbeits-

stellen einbezogen werden. Daher sind Arbeitsstellen längerer und kürzerer Dauer Gegenstand dieser Untersuchung.

Arbeitsstellen längerer oder kürzerer Dauer unterscheiden sich hinsichtlich der Art und dem Umfang der Einrichtung, der Verkehrssicherung und der verkehrlichen Auswirkungen während der Baumaßnahme. Während bei Arbeitsstellen längerer Dauer die Anzahl der Fahrstreifen in der Regel erhalten bleibt bzw. erhalten bleiben soll, nur die Breite der Behelfsfahrstreifen reduziert und der Verkehr durch temporäre Markierungen geführt wird, wird in Arbeitsstellen kürzerer Dauer oftmals eine temporäre Fahrstreifensperrung vorgenommen.

Arten der Verkehrsführung

Die unterschiedlichen Möglichkeiten der Verkehrsführung (VF) an Arbeitsstellen auf Autobahnen sind abhängig von der Art der Arbeitsstelle (längerer oder kürzerer Dauer), den durchgeführten Arbeiten und dem Querschnitt der Autobahn. Aufgrund der langfristigen Einrichtung von Arbeitsstellen längerer Dauer sind hier im Prinzip viele Möglichkeiten der Verkehrsführung gegeben. Typische Eigenschaften einer Verkehrsführung in Arbeitsstellen längerer Dauer sind eine Reduktion und/oder Verengung der Richtungsfahrstreifen, eine Verschwenkung der Fahrstreifen, z. B. auf den Seitenstreifen, oder eine Überleitung eines oder mehrerer Fahrstreifen auf die Gegenfahrbahn. RESSEL (1994) entwickelte auf Grundlage dieser typischen Eigenschaften eine Einteilung von Arbeitsstellentypen in die folgenden vier Gruppen:

- Verkehrsführung ohne Überleitung des Verkehrs auf die gegenüberliegende Richtungsfahrbahn und ohne Fahrstreifenreduktion, jedoch mit Einengung der Fahrstreifen,
- Verkehrsführung ohne Überleitung, aber mit Fahrstreifenreduktion und/oder -einengung,
- Verkehrsführung mit Überleitung auf die gegenüberliegende Richtungsfahrbahn und Fahrstreifeneinengung, aber ohne Reduktion eines oder mehrerer Fahrstreifen,
- Verkehrsführung mit Überleitung, mit Fahrstreifenreduktion und -einengung.

Eine Übersicht über verschiedene Verkehrsführungen für Arbeitsstellen längerer Dauer mit zwei oder drei Fahrstreifen je Richtungsfahrbahn ist in Bild 2-1 dargestellt. Die Systematik der Arbeitsstellenbezeichnungen kann analog auf Verkehrsführungen mit vierstreifigen Richtungsfahrbahnen übertragen werden.

Zu den häufigsten, während der eigentlichen Bauzeit eingerichteten Verkehrsführungen auf den Bundesautobahnen zählen die 4+0- sowie die 3+1-Verkehrsführung. Darüber hinaus weist die 2+2-Verkehrsführung einen relevanten Anteil auf, da diese sehr oft im Rahmen von vorbereitenden Maßnahmen – beispielsweise der Befestigung der Bankette – oder als Behelfsverkehrsführung im Zuge der Umlegung einer 4+0-Verkehrsführung eingerichtet wird.

Bei Arbeitsstellen kürzerer Dauer erfolgt in der Regel die Reduzierung von einem oder zwei Richtungsfahrstreifen oder des Seitenstreifens ohne eine Einengung der verbleibenden Fahrstreifen. Aufgrund der kurzen Dauer der Einrichtung ist eine Überleitung auf die Gegenfahrbahn nicht möglich. In Bild 2-2 sind die Möglichkeiten der Verkehrsführung nach den Regelplänen der RSA (BMV, 1995) für zwei- und dreistreifige Richtungsfahrbahnen dargestellt.

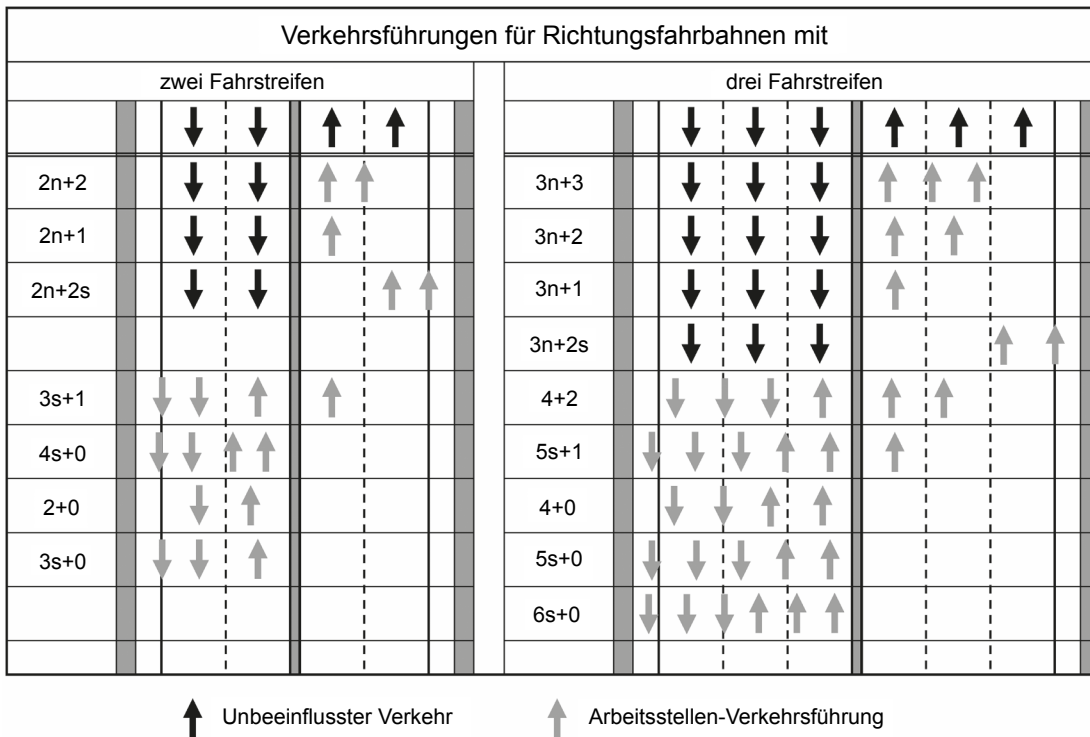


Bild 2-1: Darstellung der Verkehrsführungen für Arbeitsstellen längerer Dauer auf Autobahnen mit zwei- oder dreistreifigen Richtungsfahrbahnen (nach SCHÖNBORN und SCHULTE, 2012)

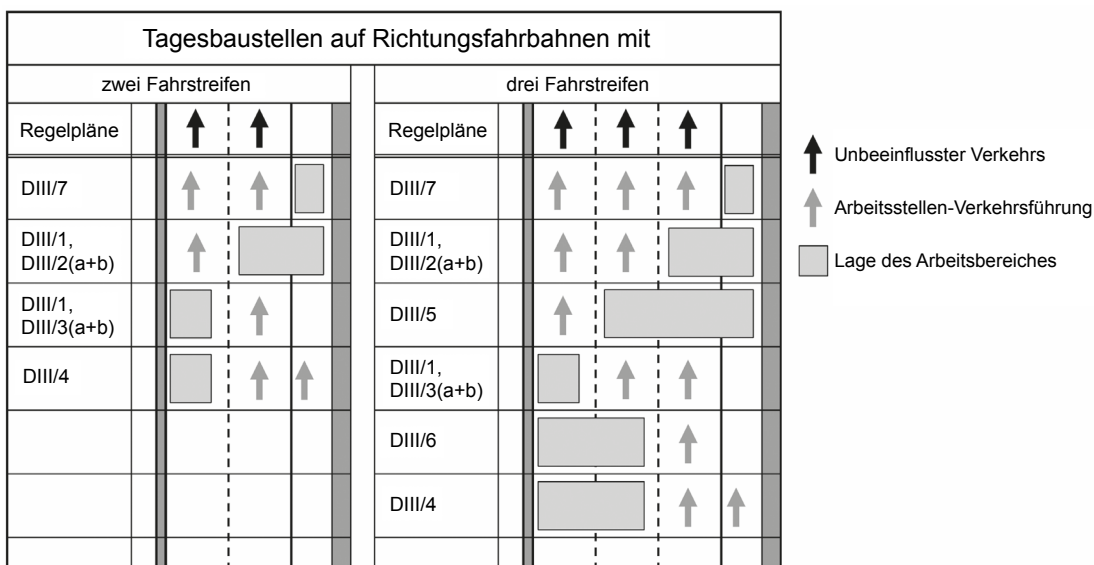


Bild 2-2: Verkehrsführungen für Arbeitsstellen kürzerer Dauer auf Autobahnen mit zwei- oder dreistreifigen Richtungsfahrbahnen (nach OBER-SUNDERMEIER, 2003)

Da im Rahmen der vorliegenden Untersuchung die Bezeichnung der Verkehrsführungen von Arbeitsstellen kürzerer Dauer nach dem in Nordrhein-Westfalen verwendeten Schema erfolgt, ist in Bild 2-3 eine Übersicht aller möglichen Verkehrsführungen auf zwei-, drei- und vierstreifigen Richtungsfahrbahnen und der zugehörigen Bezeichnungen dargestellt.

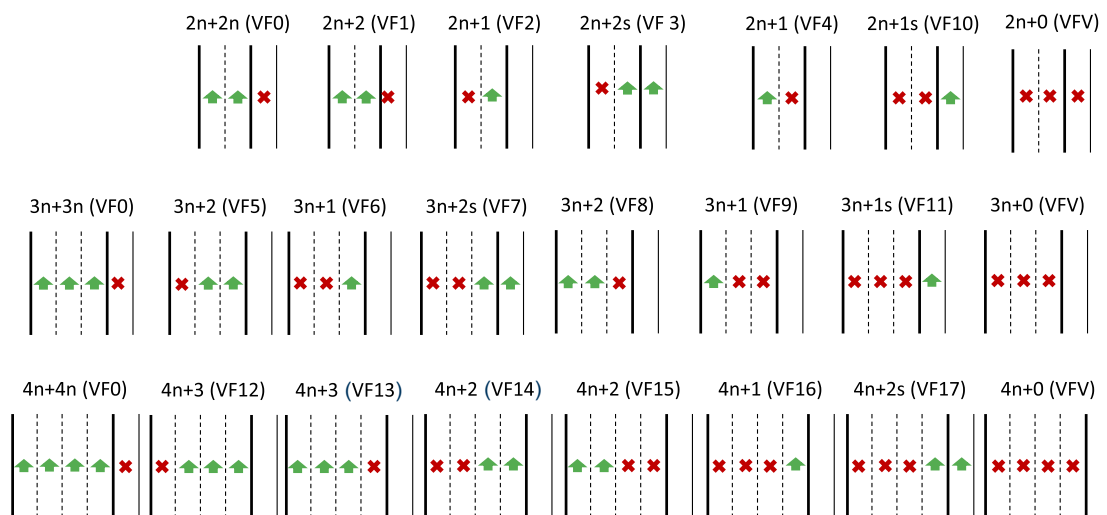


Bild 2-3: Verkehrsführungen für Arbeitsstellen kürzerer Dauer mit den in Nordrhein-Westfalen verwendeten Bezeichnungen

Anzahl der Fahrstreifen und Fahrstreifenbreiten

Bei der Einrichtung einer Arbeitsstelle mit hoher Verkehrsbelastung der betroffenen Strecke ist nach den maßgebenden Richtlinien (BMV, 1996; BMVBS, 2011a) immer darauf zu achten, dass die vorhandene Fahrstreifenanzahl beibehalten wird, um Verkehrsbehinderungen zu minimieren bzw. zu vermeiden. Ist dies nicht möglich, sollen die Arbeiten in verkehrsarme Zeiten verlegt und möglichst kurz gehalten werden. Eine Ausnahme dieser Regel ergibt sich nur, wenn Verkehrsstärken von weniger als 1.500 Kfz/h pro verbleibendem Fahrstreifen (BMVBS, 2011a) zu erwarten sind. In diesem Fall ist bei einer Fahrstreifenreduktion nicht mit erheblichen Auswirkungen auf den Verkehrsablauf zu rechnen.

Auch wenn keine Fahrstreifenreduktion erfolgt, erfordert eine Arbeitsstelle längerer Dauer in der Regel eine Reduzierung der Fahrstreifenbreiten. Die Mindestbreite der Fahrstreifen ist zum einen von der Länge der Arbeitsstelle und zum anderen von der Art der befahrenden Fahrzeuge abhängig und wird von den RSA (BMV, 1995) vorgegeben. In der Regel ist immer mindestens ein Fahrstreifen für Lkw freigegeben und muss deshalb mindestens 3,25 m (in Ausnahmefällen 3,00 m) breit sein. Alle weiteren Fahrstreifen können für Pkw mit einer vorgegebenen Höchstbreite beschränkt sein und dementsprechend geringere Fahrstreifenbreiten aufweisen. Grundsätzlich wird von einem Sicherheitsbereich von 0,25 m an jeder Fahrzeugseite ausgegangen, sodass die Fahrstreifenbreite immer mindestens 0,50 m breiter sein muss als die für den Fahrstreifen zugelassene Fahrzeugbreite. Nimmt die Länge der Arbeitsstelle zu, erhöhen sich die Breiten der Sicherheitsabstände. Wie in Tabelle 2-1 zu sehen, wird in den RSA (BMV, 1995) zwischen Arbeitsstellen von weniger als 6 km, 6 bis 9 km und mehr als 9 km Länge unterschieden. Die Fahrstreifenbreiten variieren dann zwischen 2,50 m und 3,25 m. Wird ein Fahrstreifen allein auf die Gegenfahrbahn geführt, ist immer eine Fahrstreifenbreite von mindestens 3,25 m erforderlich.

Da die heutige Fahrzeugflotte auf den deutschen Autobahnen deutlich größere durchschnittliche Breiten aufweist, als es noch zur Veröffentlichung der RSA (BMV, 1995) der Fall war, ist geplant, in der nächsten Ausgabe der RSA eine Mindestfahrstreifenbreite von 2,60 m festzulegen (SCHÖNBORN und SCHULTE, 2012). Die geplante Breite von 2,60 m ist darauf zurückzuführen, dass ca. 70 % der heute neu zugelassenen Pkw inklusive Spiegel eine Breite von über 2,00 m haben (ADAC, 2015). Dabei sind allerdings nur wenige Pkw breiter als 2,10 m. Unabhängig von der Änderung in der Richtlinie werden die breiteren Behelfsfahrstreifen teilweise schon heute umgesetzt. Durch die Anpassung des Zeichens

Fahrzeugbreite	Länge der Arbeitsstelle		
	< 6 km	6 – 9 km	> 9 km
Beschränkung auf bis zu 2 m (Z 264 StVO)	2,50 m (3,25 m) ¹⁾	3,00 m (3,25 m) ¹⁾	3,25 m
unbeschränkt	3,25 m (3,00 m) ^{2) 3)}		

¹⁾ Bei einer Verkehrsführung mit nur einem Behelfsfahstreifen für eine Fahrtrichtung auf der Gegenfahrbahn; ggf. muss vorher ausgebaut oder verbreitert werden.

²⁾ Durch einen entsprechenden vorherigen Fahrbahnanbau bzw. eine Verbreiterung ist eine Behelfsfahstreifenbreite von 3,25 m anzustreben.

³⁾ Im Bereich z. B. von Fertiggern darf die Fahstreifenbreite zur Erhöhung der Sicherheit der in der Arbeitsstelle Tätigen vorübergehend und auf eine geringe Streckenlänge auf dieses Maß eingengt werden.

Tab. 2-1: Mindestbreite von Behelfsfahstreifen in Abhängigkeit von der Länge einer Arbeitsstelle nach RSA (BMV, 1995)

264 StVO werden die Überholfahrstreifen für Fahrzeuge zugelassen, die eine Breite von 2,10 m nicht überschreiten. Der Leitfaden zum Arbeitsstellenmanagement gibt zudem vor, grundsätzlich – insbesondere bei hoch belasteten Arbeitsstellen – eine möglichst große Behelfsfahstreifenbreite vorzusehen. Eine Verbreiterung der befestigten Fläche zur Erhöhung der möglichen Behelfsfahstreifenbreiten über die Mindestmaße nach den RSA (BMV, 1995) hinaus ist zudem zur Verbesserung des Verkehrsflusses und der Verkehrssicherheit bei der Planung einer Arbeitsstelle explizit in Betracht zu ziehen (BMVBS, 2011a).

Geschwindigkeitsbeschränkungen

Nach dem Leitfaden zum Arbeitsstellenmanagement (BMVBS, 2011a) wird in Arbeitsstellen grundsätzlich eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h angestrebt. Dies gilt für den gesamten Arbeitsstellenbereich, inklusive Verschwenkungs- und Überleitungsbereichen. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit kann zwar nach den RSA (BMV, 1995) auf 60 oder auch 40 km/h reduziert werden, wenn z. B. die Fahstreifen sehr schmal sind, die Fahrbahndecke in einem schlechten Zustand ist oder sich der Arbeitsbereich direkt neben dem Verkehrsbereich befindet und sonst die in der Arbeitsstelle Tätigen unmittelbar gefährdet werden. Bevor eine Reduzierung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit erfolgt, sollten aber immer Maßnahmen in die Planung einbezogen werden, mit denen ein solcher Eingriff in den Verkehr verhindert werden kann. Dazu gehören z. B. die Verlegung einer Überleitung an eine besser geeignete Stelle oder eine provisorische Verbreiterung der Fahrbahn zur Erhöhung der Behelfsfahstreifenbreite (BMVBS, 2011a).

2.3 Verkehrssicherheitseinrichtungen in Arbeitsstellen

Die rechtliche Grundlage für alle verkehrslenkenden, -beschränkenden oder -verbietenden Maßnahmen auf öffentlichen Verkehrsflächen aus Anlass von Arbeiten im Straßenraum bildet § 45 StVO. Nach § 45 Abs. 1 StVO können die Straßenverkehrsbehörden die Benutzung von Streckenabschnitten aus Gründen der Sicherheit und Ordnung des Verkehrs beschränken oder verbieten; das gleiche Recht haben sie für die Durchführung von Arbeiten im Straßenraum. Zur Durchführung von Straßenbauarbeiten können nach § 45 Abs. 2 StVO die Straßenbaubehörden – vorbehaltlich anderer Maßnahmen der Straßenverkehrsbehörden – Verkehrsverbote und -beschränkungen anordnen, den Verkehr umleiten und durch Mar-

kierungen und Leiteinrichtungen lenken. Straßenbaubehörde ist in diesem Zusammenhang diejenige Behörde, die die Aufgaben des Straßenbaulastträgers nach § 3 FStrG wahrnimmt.

Die Sicherung von Arbeitsstellen erfolgt gemäß der VwV-StVO zu § 43 StVO nach den RSA (BMV, 1995), ergänzt durch die ZTV-SA (1997).

Arbeitsstellen längerer Dauer

Bei Arbeitsstellen längerer Dauer verlangen vor allem die im Bereich von Verschwenkungen und Überleitungen vorherrschenden verkehrlichen und räumlichen Gegebenheiten von den Verkehrsteilnehmern aufgrund der veränderten Fahraufgaben eine erhöhte Aufmerksamkeit. Die eindeutige Richtungsweisung, insbesondere bei Überleitungen, und die optimale Wahrnehmbarkeit und Erkennbarkeit der Verkehrsführung sind wesentliche Voraussetzungen für eine situationsangepasste und sichere Durchfahrt der Verkehrsteilnehmer. Die visuelle Führung in Arbeitsstellen, als Grundvoraussetzung für einen sicheren und homogenen Verkehrsablauf, erfolgt durch horizontale und vertikale Leiteinrichtungen. Leitbaken sind neben der Markierung wichtigstes Element zur visuellen Führung. Wurden bislang auf der Grundlage der StVO und der RSA (1995) ausschließlich Schraffenbaken gemäß Zeichen 605 StVO eingesetzt, kommen in letzter Zeit vermehrt sogenannte Pfeilbaken zum Einsatz, da für diese im Vergleich zur Schraffenbake eine verbesserte richtungsweisende Wirkung von AULBACH (1994) und MESEBERG (1997) nachgewiesen und in weiteren Untersuchungen (BAIER et al., 2006; SCHULZE, EXNER und SCHLAG, 2010) bestätigt wurde. Der Einsatz von Pfeilbaken im Bereich von Überleitungen wird deshalb von BAIER, MESEBERG und KEMPER (2007) ausdrücklich empfohlen. Nach den neuen RSA (Entwurf 2012) sollen sie zukünftig ausschließlich eingesetzt werden.

In Arbeitsstellen mit Überleitung des Verkehrs auf die Gegenfahrbahn werden in Deutschland zur Trennung des Gegenverkehrs drei verschiedene Maßnahmen ergriffen:

- Markierung (Doppellinie mit Sichtzeichen),
- Leitschwellen oder
- transportable Schutzeinrichtungen.

Letztere können in verschiedenen Versionen ausgebildet werden. Zum einen als Stahl-schutzwand und zum anderen als Betonschutzwand, deren Eigenschaften in den TL-Transportable Schutzeinrichtungen (BMV, 1997) festgelegt sind. Es sind auch Kombinationen davon möglich. Die Mindestbreite aller baulichen Leitelemente beträgt 0,25 m. Die **baulichen** Varianten können als Ersatz für die Markierung an den linken Fahrbahnrandern der Richtungsfahrbahnen eingesetzt werden. Gelbmarkierung in der Arbeitsstelle hebt die weißen Fahrstreifenbegrenzungen auf, ohne dass diese entfernt oder abgedeckt werden müssen (§ 41 Abs. 4 StVO und VwV-StVO zu § 41 Abs. 4).

Die Breite des Trennstreifens zwischen den Behelfsfahrstreifen der beiden Fahrtrichtungen ist dabei abhängig von der Breite des zur Verfügung stehenden Fahrbahnquerschnitts und dem verwendeten Trennelement.

In den Regelplänen der RSA (BMV, 1995) sind Ausführungs- und Gestaltungsmerkmale sowie Verkehrsführungen für Arbeitsstellen längerer Dauer vorgegeben. Darüber hinaus ist dort verzeichnet, wie Arbeitsstellen abgesperrt, beschildert, beleuchtet und markiert werden sollen. Die Regelpläne stellen Standardausführungen dar und sind ggf. an die spezielle örtliche Gegebenheit anzupassen bzw. zu modifizieren. In den Regelungen der RSA werden die Mindestfahrstreifenbreiten in Abhängigkeit von der Arbeitsstellenlänge sowie die zulässigen Höchstgeschwindigkeiten festgesetzt.

Im Zuge einer Arbeitsstelle werden die zulässigen Geschwindigkeiten reduziert. Es wird ein Geschwindigkeitstrichter eingerichtet, der die zulässige Höchstgeschwindigkeit über 100 km/h bis auf 80 km/h, je nach Verkehrsführung auch bis auf 60 km/h verringert. Die Geschwindigkeitsbeschränkungen werden durch ein Überholverbot für Kraftfahrzeuge über 3,5 t, Kraftomnibusse und Pkw mit Anhänger ergänzt. Die Höchstgeschwindigkeit im Überleitungsbereich wird häufig aufgrund der geometrischen Randbedingungen infolge der Fahrbahnüberleitung auf 60 km/h begrenzt, um dann im Arbeitsstelleninnenbereich wieder auf 80 km/h erhöht zu werden. Die RSA geben diesbezüglich den Hinweis, dass die Befolgungsrate der angeordneten Geschwindigkeit wesentlich von der erkennbaren Notwendigkeit und damit Akzeptanz durch den Verkehrsteilnehmer abhängt.

Die Ankündigung der Arbeitsstelle erfolgt in der Regel 2 km und 800 m vor der ersten Leitbake mit Zeichen 123 StVO und Zusatzzeichen 1004.

Soweit die verkehrs- und bautechnische Sicherung von Arbeitsstellen gegenüber den Verkehrsteilnehmern betroffen ist, sind bei der Einrichtung, dem Betrieb und dem Abbau von Arbeitsstellen an und auf Straßen die ZTV-SA (1997) anzuwenden. Für den Bereich der Bundesfernstraßen sind diese den Verträgen zur Arbeitsstellensicherung zu Grunde zu legen. Die ZTV-SA (1997) sind durch das ARS Straßenbau 37/1997 eingeführt worden.

Arbeitsstellen kürzerer Dauer

Zur Sicherung von Arbeitsstellen kürzerer Dauer ist nach den RSA (BMV, 1995) die Anordnung unterschiedlicher Verkehrszeichen und -einrichtungen vorgesehen. Hierzu gehört in jedem Fall der Einsatz von fahrbaren Absperrtafeln sowie je nach Situation zusätzlich die Anordnung von Geschwindigkeitsbeschränkungen und Vorwarneinrichtungen wie Vorwarntafeln.

Die Vorwarntafel (im ARS Nr. 17/2009 (BMVBS, 2009) auch als Vorwarnanzeiger bezeichnet) besteht aus einer Kombination von Zeichen 274 StVO (zulässige Höchstgeschwindigkeit) und Verkehrslenkungstafeln gemäß Zeichen 500 StVO und wird in Ergänzung zu fahrbaren Absperrtafeln in Einsatzbereichen von Arbeitsstellen erforderlich, in denen Geschwindigkeiten von über 120 km/h zugelassen sind oder die fahrbare Absperrtafel nicht aus einer Entfernung von mindestens 800 m sichtbar ist.

Die Vorwarntafeln und die Schilder mit Angabe der zulässigen Höchstgeschwindigkeit (Zeichen 274 StVO) werden immer am rechten Fahrbahnrand aufgestellt, wo möglich werden die zulässigen Höchstgeschwindigkeiten auch zusätzlich im Mittelstreifen gezeigt. Aufgrund der eingeschränkten Platzverfügbarkeit ist jedoch eine Aufstellmöglichkeit für Vorwarntafeln im Mittelstreifen nicht immer gegeben, sodass diese ausschließlich am rechten Fahrbahnrand stehen. Gerade auf hochbelasteten Autobahnen ist allerdings – insbesondere durch den Schwerverkehr – die Sicht auf die Verkehrszeichen am rechten Fahrbahnrand oft eingeschränkt.

In den letzten Jahren werden bei Arbeitsstellen kürzerer Dauer vermehrt Warnschwellen eingesetzt (beispielsweise in Nordrhein-Westfalen), mit denen vor allem Unfälle mit Aufprall auf die fahrbare Absperrtafel auf dem Seitenstreifen und auf dem Hauptfahrstreifen vermieden werden sollen (BAIER et al., 2005). Warnschwellen wurden deshalb inzwischen als Vorwarneinrichtung für Arbeitsstellen kürzerer Dauer in die neue RSA (Entwurf 2012) aufgenommen.

2.4 Übersicht von Arbeitsstellen auf Bundesautobahnen

2.4.1 Arbeitsstellen längerer Dauer

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurde zur Festlegung der Untersuchungsschwerpunkte eine quantitative Analyse der Baubetriebsmeldungen des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) vorgenommen. Ziel dieser Analyse war es, durch die Betrachtung aller Meldungen der 16 Bundesländer aus den Jahren 2003 bis 2012 eine Übersicht über die in der Praxis vorliegenden Verhältnisse zu gewinnen und somit die Repräsentativität der später durchzuführenden Untersuchungen zu gewährleisten.

Bei den analysierten Meldungen handelt es sich um Meldungen der einzelnen Bundesländer, die im Rahmen der koordinierten Baubetriebsplanung zur Vermeidung gravierender verkehrlicher Eingriffe durch ungünstig eingerichtete oder mehrere parallele Arbeitsstellen im BMVI zusammengeführt und überprüft werden. Neben Angaben zu Zeitraum und Ort der Baumaßnahme sind im Listenblatt beispielsweise auch die Behelfsverkehrsführung sowie die Anzahl der Fahrstreifen vor Beginn der Maßnahme enthalten.

Nach Aufbereitung und Plausibilisierung der Meldelisten konnten für alle 6.720 in den Jahren 2003 bis 2012 geplanten bzw. gemeldeten Arbeitsstellen Informationen über die vorgesehene Art der Verkehrsführung, die Einrichtungslänge und -dauer gewonnen werden. Die Häufigkeit dieser Arbeitsstellenmeldungen, sowohl absolut als auch relativ, ist in Bild 2-4 dargestellt. Am häufigsten wurden demnach Arbeitsstellen mit den Verkehrsführungen 2+2, 4+0, 3+1, 3+3, 2+1, 3+2, 2+0, 1+1, 4+2 und 3+0 eingerichtet. Auf eine Differenzierung nach Arbeitsstellen ohne und mit Nutzung des Seitenstreifens, z. B. 2n+2 und 2n+2s, wird an dieser Stelle verzichtet, im Rahmen der weiteren Detailuntersuchungen wurden entsprechende Differenzierungen aber berücksichtigt. Die Anteile der Arbeitsstellen unter Einrichtung anderer Verkehrsführungen in den betrachteten 10 Jahren sind jeweils kleiner als 1 %.

Verteilung der Einrichtungslänge

In Abhängigkeit von der jeweiligen Verkehrsführung wurden für die Betrachtung der Einrichtungslänge der gemeldeten Baumaßnahmen der Mittelwert, der Median, der Mindest- und der Maximalwert sowie die 15- und 85-Perzentilgrenzen berechnet. Die Ergebnisse für alle in Bild 2-4 dargestellten Verkehrsführungen lassen sich Bild 2-5 entnehmen. Eine vollständige Auflistung der ermittelten Werte für die zehn am häufigsten vorkommenden Verkehrsführungen bietet Tabelle 2-2.

VF	2+2	4+0	3+1	3+3	2+1	3+2	2+0	1+1	4+2	3+0	
0,15	0,4	1,0	1,1	0,5	0,5	0,6	0,9	0,4	1,4	0,6	Σ
0,5	1,3	3,1	3,0	1,1	2,0	1,9	3,2	1,4	3,0	2,8	
0,85	5,0	6,3	6,3	3,3	6,5	5,5	6,6	5,6	5,6	6,4	
Mittelwert	2,4	3,6	3,7	1,8	3,6	2,8	3,8	2,7	3,5	3,3	
min	0,0	0,2	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,4	0,1	
max	48,1	30,0	32,9	18,0	72,6	21,3	22,2	14,4	11,2	11,2	
n _A	2.223	1.319	552	541	494	457	423	234	130	125	6.498

Tab. 2-2: Kennwerte zur Länge der häufigsten Verkehrsführungen von Arbeitsstellen längerer Dauer auf Bundesautobahnen im Zeitraum 2003 bis 2012

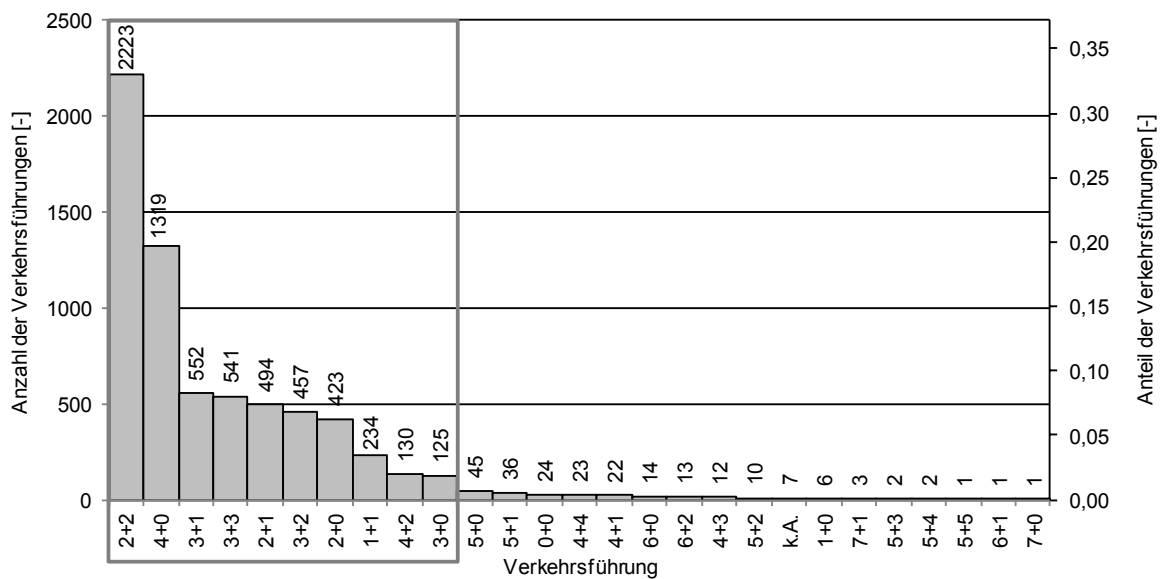


Bild 2-4: Anzahl und Anteil der gemeldeten Verkehrsführungen von Arbeitsstellen längerer Dauer auf Bundesautobahnen im Zeitraum 2003 bis 2012 ($n_A = 6.720$)

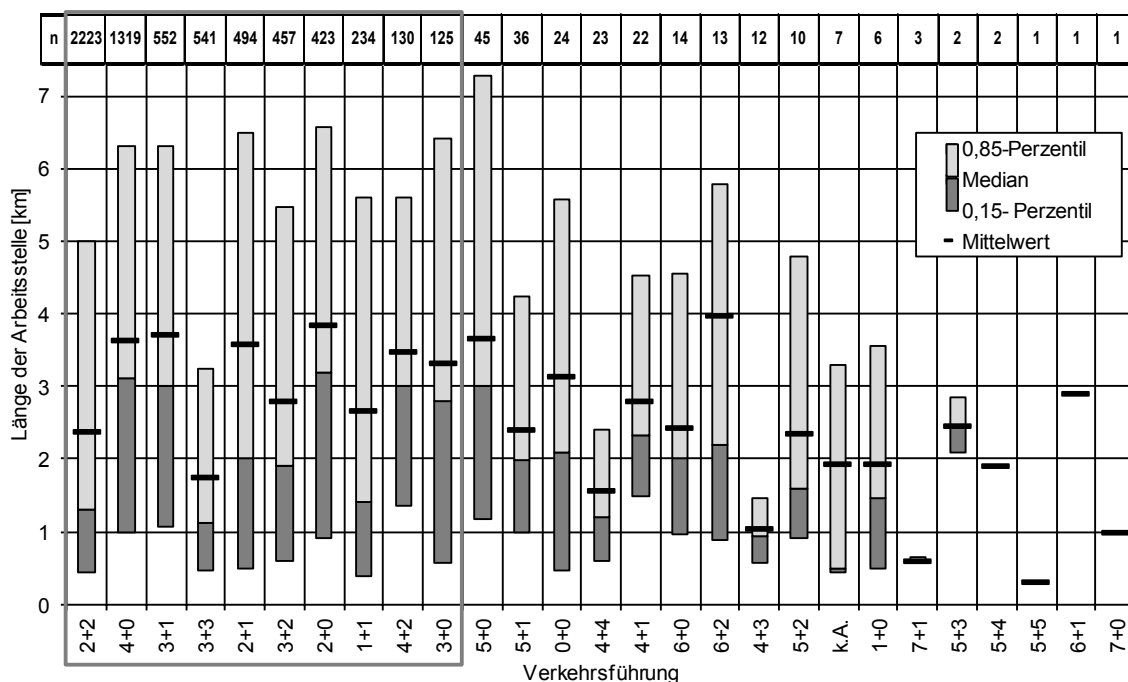


Bild 2-5: Längen gemeldeter Verkehrsführungen von Arbeitsstellen längerer Dauer auf Bundesautobahnen im Zeitraum 2003 bis 2012 ($n_A = 6.720$)

Bei rund 97 % aller in den Jahren 2003 bis 2012 geplanten bzw. gemeldeten Arbeitsstellen längerer Dauer wurde eine Verkehrsführung 2+2, 4+0, 3+1, 3+3, 2+1, 3+2, 2+0, 1+1, 4+2 oder 3+0 eingesetzt. Im Mittel hatten rund 15 % der Arbeitsstellen mit diesen zehn am häufigsten vorkommenden Verkehrsführungen eine Einrichtungslänge von weniger als 700 m. Rund 15 % dieser Arbeitsstellen wurden mit einer Einrichtungslänge von über 6 km geplant bzw. eingerichtet. Somit wiesen rund 70 % der Arbeitsstellen mit den Verkehrsführungen 2+2, 4+0, 3+1, 3+3, 2+1, 3+2, 2+0, 1+1, 4+2 oder 3+0 eine Einrichtungslänge zwischen 0,7 km und 6 km auf. Diese Zusammensetzung, sowohl hinsichtlich der Verkehrsführung als auch der Längenverteilung, wurde im Rahmen der durchgeführten Verkehrssicherheitsuntersuchungen als Gruppe der „maßgebenden Arbeitsstellen“ definiert.

Einrichtungsdauer maßgebender Arbeitsstellen längerer Dauer

Vergleichbar mit der vorgestellten Analyse der gemeldeten Einrichtungslänge wurde auch die gemeldete Einrichtungsdauer einer näheren Betrachtung unterzogen. Für die maßgebenden Arbeitsstellen wurde eine mittlere 0,15-Perzentilgrenze der Einrichtungsdauer von knapp 22 Tagen sowie eine 0,85-Perzentilgrenze in Höhe von rund 192 Tagen ermittelt.

2.4.2 Arbeitsstellen kürzerer Dauer

Für die Analyse von Arbeitsstellen kürzerer Dauer wurden Abfragen an die Bundesländer gerichtet, um ein umfangreiches Datenkollektiv von unterschiedlichen Verkehrsführungen und Einrichtungszeiten (möglichst getrennt nach Tag und Nacht) zu erhalten. Daten wurden aus den Ländern Hessen, Nordrhein-Westfalen, Bayern (getrennt nach Nord- und Südbayern), Rheinland-Pfalz und dem Saarland zur Verfügung gestellt.

Bei der Zusammenführung und dem Vergleich dieser Daten sind allerdings die unterschiedlichen Meldeformen der Länder zu beachten. Teilweise werden nur (staurelevante) Arbeitsstellen auf den Fahrstreifen oder Arbeitsstellen, die länger als zwei Stunden eingerichtet waren, gemeldet. Andere Länder erfassen alle anfallenden Arbeitsstellen, auch die im Bankettbereich. Zudem gibt es Unterschiede bei der Beschreibung der eingesetzten Verkehrsführungen. Hier werden bei einzelnen Sperrungen oftmals keine Angaben zur regulären Fahrstreifenanzahl gemacht. Ursächlich dafür sind Unterschiede in den länderspezifischen Erfassungssystemen und Eingabemasken der Arbeitsstellendatenbanken. Jedes Land hat die Tätigkeiten im Betriebsdienst nach eigenen Vorgaben in ein Erfassungssystem implementiert, sodass beispielsweise nicht von allen Bundesländern Arbeiten am Seitenstreifen oder Bankett im System erfasst werden, da der Verkehrsablauf hiervon oftmals unbeeinflusst bleibt.

Für die weiteren Analysen wurden im Wesentlichen die Daten folgender Länder verwendet:

- Nordrhein-Westfalen für die Jahre 2011 und 2012 (nur Arbeitsstellen kürzerer Dauer mit Fahrstreifensperrung, Anzahl der Arbeitsstellen $n_A = 27.554$),
- Hessen für das Jahr 2012 (alle Arbeitsstellen kürzerer Dauer, $n_A = 19.027$),
- Nordbayern für das Jahr 2012 (alle Arbeitsstellen kürzerer Dauer, $n_A = 22.372$).

In diesen Ländern werden vermehrt Nachtbaustellen eingesetzt. Gemäß ARS Nr. 17/2009 (BMVBS, 2009) sind Nachtbaustellen alle Arbeitsstellen von kürzerer Dauer, die während der Dunkelheit betrieben werden. Die Datengrundlage ist hier jedoch teilweise unterschiedlich, da jedes Land ein anderes Meldesystem hat und andere Informationen vorhält. In Hessen beispielsweise wird nur erfasst, ob ein Fahrstreifeneinzug von rechts oder links erfolgt und wie groß die Anzahl der verbleibenden Fahrstreifen ist. Durch die Überlagerung mit Streckendaten zur vorhandenen Fahrstreifenanzahl können daraus nahezu alle Verkehrsführungen gemäß den RSA eindeutig abgeleitet werden. Diejenigen Arbeitsstellen, für die dies nicht möglich ist, wurden von den weiteren Betrachtungen ausgenommen.

Die Analyse der gemeldeten Daten aus Nordrhein-Westfalen, Hessen und Nordbayern hat gezeigt, dass dort etwa 28 % der Arbeitsstellen bei Nacht bzw. bei Tag und Nacht eingerichtet werden. Bei der Einbeziehung der Arbeitsstellendauer (Bild 2-6) steigt dieser Anteil noch um etwa 4 %, da Nachtbaustellen in der Regel deutlich länger betrieben werden als Arbeitsstellen bei Tageshelligkeit (vgl. hierzu KEMPER, 2010).

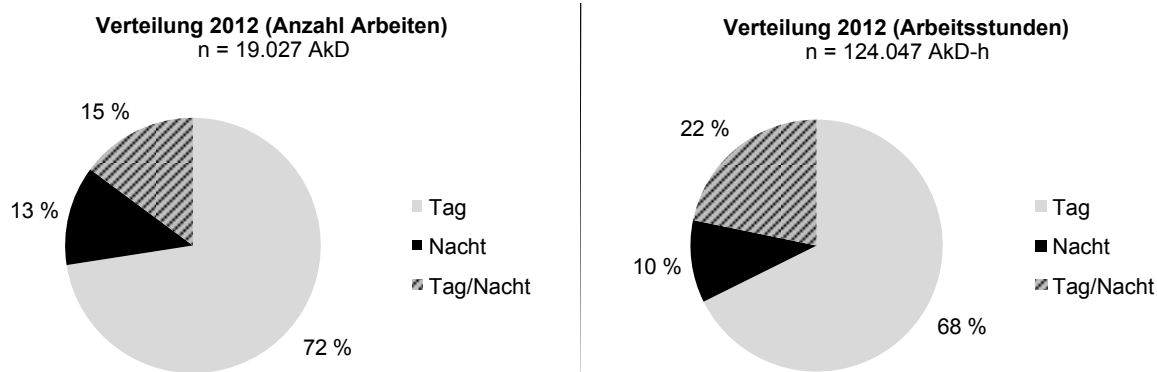


Bild 2-6: Verteilung der gemeldeten Arbeitsstellen kürzerer Dauer auf die Einrichtungszeit am Beispiel des Landes Hessen (links: Anzahl der gemeldeten Arbeitsstellen kürzerer Dauer, rechts: Einrichtungszeitfenster)

Auch bei der gewählten Verkehrsführung muss zwischen einem Einsatz bei Tag und Nacht differenziert werden. Bei Tag können aufgrund der zumeist hohen Verkehrsbelastungen hauptsächlich Sperrungen umgesetzt werden, die nur einen geringen Einfluss auf die Kapazität haben. Dies können z. B. Tätigkeiten auf dem Seitenstreifen mit einer Verkehrsführung unter Beibehaltung der Fahrstreifenanzahl sein. Verkehrsführungen mit einer erheblichen Reduktion der Leistungsfähigkeit, z. B. mit Reduzierung von zwei auf einen Fahrstreifen, können hingegen beinahe ausschließlich bei Nacht umgesetzt werden.

Aufgrund der oben beschriebenen Problematik, dass alle Länder eine eigene Dateneingabe und -struktur verwenden, können die Angaben zu den Arbeitsstellen kürzerer Dauer nicht in einer übergreifenden, deutschlandweiten Datenbank zusammengestellt werden. Bereits bei der Zusammenführung der gemeldeten Arbeitsstellenverkehrsführungen sind noch Angaben zur regulär zur Verfügung stehenden Fahrstreifenanzahl erforderlich.

Um für die weiteren Analysen auf einheitliche Datenformate und Verkehrsführungen zurückgreifen zu können, wurde die Systematik zur Bezeichnung der Verkehrsführungen aus Nordrhein-Westfalen (vgl. Bild 2-3) als gemeinsame Basis für alle betrachteten Arbeitsstellen kürzerer Dauer übernommen. Bei diesen Aufteilungen kann anhand der angegebenen Verkehrsführung erkannt werden, um welche Verkehrsführung es sich handelt und wie groß der Eingriff in den Verkehr ausfällt. Die Arbeitsstellen kürzerer Dauer aus Hessen und Nordbayern wurden anhand der vorhandenen Angaben in diese Systematik überführt.

3 Theoretische Grundlagen und Kenntnisstand zum Verkehrsablauf in Arbeitsstellen auf Autobahnen

3.1 Verkehrsablauf auf Autobahnen

Bei der Modellierung des Verkehrsflusses auf Autobahnen kann grundsätzlich zwischen einer mikroskopischen und einer makroskopischen Betrachtung unterschieden werden. Bei der mikroskopischen Betrachtung wird die Bewegung jedes einzelnen Fahrzeuges entlang der Strecke verfolgt und z. B. anhand von Fahrzeugtrajektorien im Weg-Zeit-Diagramm analysiert. Dieses Verfahren ist, aufgrund der großen Anzahl an Fahrzeugen und vielfältiger Interaktionen zwischen den Fahrzeugen, sehr aufwendig und zur Beschreibung des Verkehrsflusses auf Autobahnen und zur Ermittlung der Kapazität häufig nicht notwendig. Die makroskopische Betrachtungsweise verwendet hingegen aggregierte Werte, die die Gesamtheit der Fahrzeuge eines Verkehrsstroms repräsentieren. Der gesamte Verkehrsablauf kann hier in der Regel über die drei Größen Verkehrsstärke q [Kfz/h], Verkehrsdichte k [Kfz/km] und mittlere Geschwindigkeit v [km/h] beschrieben werden.

Bei der makroskopischen Verkehrsflussanalyse muss zwischen lokal und momentan gemessenen Größen unterschieden werden. Während die Verkehrsstärke q an einem Querschnitt erfasst wird und demnach eine lokale Größe darstellt, wird die Verkehrsdichte k über einen Streckenabschnitt bestimmt und stellt eine momentane Größe dar. Die Geschwindigkeit kann theoretisch sowohl lokal als auch momentan gemessen werden. Aufgrund der wesentlich einfacheren Handhabbarkeit ist für Geschwindigkeitsmessungen in der Praxis aber nur die lokale Erfassung an einem Querschnitt, z. B. als quasi-lokale Messung mit zwei kurz hintereinander liegenden Induktionsschleifen, von Bedeutung. Zur Anwendung der Zustandsgleichung

$$q = k \cdot \bar{v}_m \tag{3-1}$$

mit:

$$q = \text{mittlere Verkehrsstärke} \tag{Kfz/h}$$

$$k = \text{mittlere Verkehrsdichte} \tag{Kfz/km}$$

$$\bar{v}_m = \text{mittlere momentane Geschwindigkeit} \tag{km/h}$$

muss die mittlere Geschwindigkeit jedoch als momentaner Wert vorliegen, da sonst keine Verknüpfung zwischen den Größen möglich ist. Aus diesem Grund muss die gemessene mittlere lokale Geschwindigkeit in der Regel immer in eine mittlere momentane Geschwindigkeit umgerechnet werden. Dies erfolgt über die Gleichung (3-2) (vgl. LEUTZBACH, 1972).

$$\bar{v}_m \approx \bar{v}_l - \frac{\sigma_l^2}{\bar{v}_l} \tag{3-2}$$

mit:

$$\bar{v}_m = \text{mittlere momentane Geschwindigkeit} \tag{km/h}$$

$$\bar{v}_l = \text{mittlere lokale Geschwindigkeit} \tag{km/h}$$

$$\sigma_l^2 = \text{Varianz der lokalen Geschwindigkeiten} \tag{km^2/h^2}$$

Zur Umrechnung von lokalen in momentane Geschwindigkeiten kann nach BRILON et al. (1993) näherungsweise der Faktor 0,974 verwendet werden. Dies ist insbesondere dann zweckmäßig, wenn keine Einzelfahrzeugdaten zur Verfügung stehen. Da die mittlere momentane Geschwindigkeit \bar{v}_m aufgrund der zuvor genannten Gründe von deutlich größerer Bedeutung ist als die mittlere lokale Geschwindigkeit, wird sie häufig vereinfachend mit v bezeichnet. Dies wird auch im Folgenden so gehandhabt.

Aufgrund der Zusammenhänge zwischen Verkehrsstärke, Verkehrsdichte und mittlerer Geschwindigkeit gemäß der Zustandsgleichung müssen nur zwei der drei Größen bekannt sein, um den Verkehrsfluss vollständig zu beschreiben. Da es deutlich einfacher ist, die lokalen Größen Verkehrsstärke q und mittlere lokale Geschwindigkeit \bar{v}_l zu messen, wird die Verkehrsdichte k in der Regel mithilfe der Zustandsgleichung aus den anderen beiden Größen berechnet. Die Zustandsgleichung gilt allerdings nur unter der Voraussetzung, dass der Verkehr über die untersuchte Strecke stationär ist.

3.1.1 Fundamentaldiagramm

Der Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke q und der Verkehrsdichte k wird grafisch im Fundamentaldiagramm dargestellt. Davon können mithilfe der Zustandsgleichung sowohl die q - v -Beziehung als auch die k - v -Beziehung abgeleitet werden. Die Zusammenhänge zwischen diesen drei Beziehungen sind in Bild 3-1 dargestellt. Die Darstellung zeigt dabei abstrahierte Kurven. Tatsächlich beschreiben die Kurven Punktwolken, welche sich aus einer großen Anzahl von empirisch ermittelten Wertepaaren ergeben. Mittels Regressionsrechnung wird versucht, die Kurven möglichst gut an die Punktwolken anzupassen. Hierfür gibt es eine Vielzahl von mathematischen Funktionen mit unterschiedlicher Komplexität und Anpassungsgüte (vgl. Kapitel 3.1.2).

Grundsätzlich gibt es vier allgemeine Randbedingungen, die das Fundamentaldiagramm charakterisieren (vgl. Bild 3-1):

- $q(k = 0) = 0$,
- $q(k = k_{\max}) = 0$,
- $v(k = k_{\max}) = 0$,
- $v(k = 0) = v_0$.

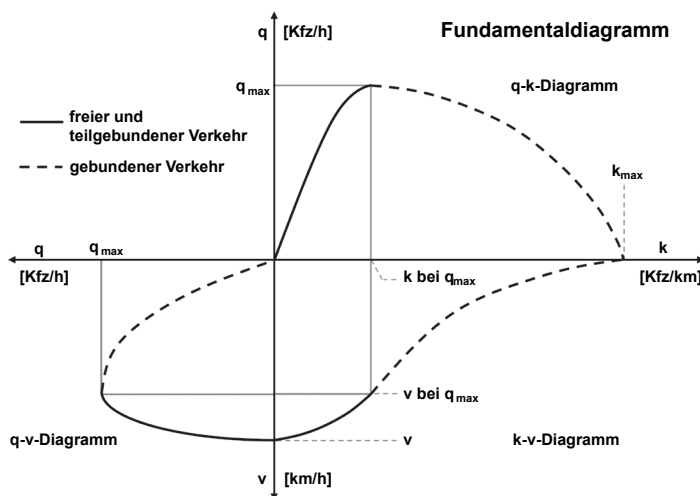


Bild 3-1: Prinzipische Skizze des Fundamentaldiagramms

Hierbei stellt k_{\max} die physikalische Obergrenze von k dar. Diese ergibt sich durch die Länge der Fahrzeuge und den minimalen Abstand zwischen ihnen. Die höchste Dichte wird demnach bei einer stehenden Fahrzeugkolonne erreicht und beträgt für reinen Pkw-Verkehr etwa 140 bis 160 Kfz/km pro Fahrstreifen.

Für verkehrstechnische Analysen wird hauptsächlich die q - v -Beziehung herangezogen. Das q - v -Diagramm bildet eine in der Regel asymmetrische, parabelförmige Kurve (vgl. Bild 3-2). Im oberen Ast mit hohen Geschwindigkeiten fließt der Verkehr, im unteren Ast mit niedrigen Geschwindigkeiten ist der Verkehr zähfließend oder gestaut. Jeder Verkehrsstärke q können somit zwei verschiedene Geschwindigkeiten zugeordnet werden. Am Scheitelpunkt des q - v -Diagramms kann die Kapazität der Strecke abgelesen werden. Im k - v -Diagramm ist hingegen jeder Verkehrsdichte genau eine Geschwindigkeit zugeordnet.

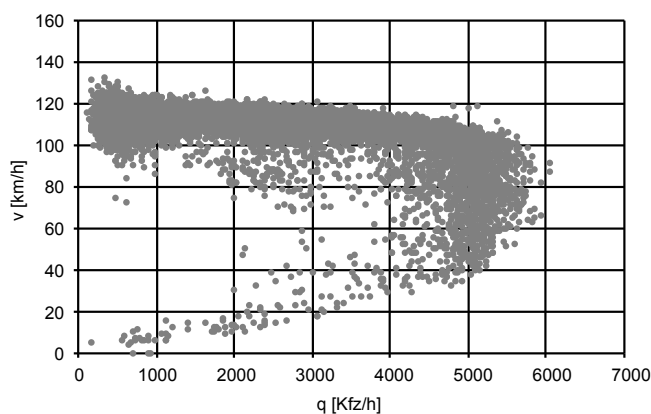


Bild 3-2: q-v-Diagramm am Beispiel einer dreistreifigen Richtungsfahrbahn (5-Minuten-Intervalle)

Grundsätzlich können sowohl im fließenden als auch im gestauten Verkehr stabile Verkehrszustände vorherrschen. Stabilität liegt immer dann vor, wenn eine geringfügige Veränderung der Verkehrsstärke oder -dichte auch nur eine geringe Veränderung der Geschwindigkeit bewirkt. Im Übergang zwischen fließendem und gestautem Verkehr ist der Verkehrszustand instabil und ein Wechsel ergibt sich in der Regel nicht kontinuierlich, sondern plötzlich. Dieser Wechsel des Verkehrszustands wird als Verkehrszusammenbruch bezeichnet. Wertepaare im q - v -Diagramm, die zwischen dem oberen und dem unteren Ast liegen, resultieren bei großen Intervall dauern in der Regel aus Mittelungen zwischen Werten aus dem fließenden und dem gestauten Verkehr.

3.1.2 Verkehrsflussmodelle

Grundsätzlich existiert eine Vielzahl von mathematischen Funktionen und Modellen zur Beschreibung des Verkehrsflusses. Diese reichen von einfachen linearen Modellen bis hin zu komplexen Funktionen. Allerdings gibt es nur wenige Funktionen, die sowohl im fließenden als auch im gestauten Verkehr eine gleichermaßen gute Anpassung an empirische Daten ermöglichen. Aus diesem Grund existieren viele Modelle, die entweder nur den fließenden Verkehr darstellen oder aus zwei Teilen bestehen, die den fließenden und gestauten Verkehr getrennt beschreiben (vgl. GREENSHIELDS, 1934; GREENBERG, 1959; UNDERWOOD, 1960 oder EDIE, 1961). Im Folgenden werden nur die für die vorliegende Untersuchung relevanten Modelle dargestellt.

BRILON und PONZLET (1995)

Das Verkehrsflussmodell von BRILON und PONZLET (1995) beruht auf einem einfachen Warteschlangenmodell und wird im HBS (FGSV, 2015) zur Darstellung der q-v-Diagramme verwendet. Die Funktion beschreibt ausschließlich den fließenden Verkehr. Ausgehend von der Annahme, dass jeder Punkt entlang einer Strecke einen Engpass für den stromaufwärts folgenden Verkehr darstellt, kann jeder Streckenpunkt wie ein M/M/1-Warteschlangensystem betrachtet werden. Die mittlere Wartezeit berechnet sich dann zu:

$$w = \frac{1}{C - q} \quad (3-3)$$

mit:

w	=	mittlere Wartezeit	[h/Kfz]
C	=	Kapazität	[Kfz/h]
q	=	Verkehrsstärke	[Kfz/h]

Gleichzeitig kann die mittlere Reisezeit für einen Abschnitt stromaufwärts des Engpasses durch die Addition der mittleren Wartezeit zu der Reisezeit bei fließendem Verkehr bestimmt werden. Damit ergibt sich folgende q-v-Beziehung:

$$v(q) = \frac{L}{t} = \frac{L}{t_f + w} = \frac{L}{\frac{L}{v_0} + \frac{1}{C - q}} \quad (3-4)$$

mit:

v(q)	=	Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke q	[km/h]
L	=	Streckenlänge	[km]
t	=	Fahrtzeit	[h/Kfz]
t _f	=	Fahrtzeit bei freiem Verkehr	[h/Kfz]
w	=	mittlere Wartezeit	[h/Kfz]
v ₀	=	Geschwindigkeit bei freiem Verkehr	[km/h]
C	=	Kapazität	[Kfz/h]
q	=	Verkehrsstärke	[Kfz/h]

In Gleichung (3-5) ist die für das HBS (FGSV, 2015) abgewandelte Form der Gleichung mit den drei Modellparametern V₀, L₀ und C₀ dargestellt.

$$v(q) = \frac{V_0}{1 + \frac{V_0}{L_0 \cdot (C_0 - q)}} \quad (3-5)$$

mit:

v(q)	=	Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke	[km/h]
q	=	Verkehrsstärke	[Kfz/h]
L ₀ , C ₀ , V ₀	=	Modellparameter	

Der Modellparameter L_0 bestimmt das Gefälle der Kurve. Der Parameter V_0 hat zwar die Einheit einer Geschwindigkeit [km/h], liegt aber bei der Anpassung der Parameter über der tatsächlichen mittleren Geschwindigkeit im freien Verkehr. Analog dazu liegt der Parameter C_0 , der die Einheit einer Kapazität aufweist [Kfz/h], über der tatsächlichen Kapazität. Im HBS (FGSV, 2015) sind für unterschiedliche Streckencharakteristika geeignete Werte für die Modellparameter angegeben.

GEISTEFELDT (2005) erweiterte das Modell dahingehend, dass die Variabilität der Kapazität durch Anpassung der q-v-Beziehung berücksichtigt werden kann. Hierzu wird der Modellparameter C_0 in Abhängigkeit von der Kapazität C , den beiden anderen Modellparametern V_0 und L_0 und der kritischen Geschwindigkeit v_{krit} im Übergang zwischen dem fließenden und gestauten Verkehr über folgende Beziehung ermittelt:

$$C_0 = C + \frac{v_{krit} \cdot V_0}{L_0 \cdot (V_0 - v_{krit})} \quad (3-6)$$

mit:

C = Kapazität [Kfz/h]

v_{krit} = kritische Geschwindigkeit im Übergang zwischen fließendem und gestautem Verkehr [km/h]

L_0, C_0, V_0 = Modellparameter

Die Variation von C_0 ermöglicht somit eine horizontale Stauchung oder Streckung des q-v-Diagramms unter Beibehaltung der übrigen Parameter.

VAN AERDE (1995)

Das Modell von VAN AERDE (1995) basiert auf einem einfachen Fahrzeugfolgemodell, bei dem sich die Weglücke zwischen zwei aufeinander folgenden Fahrzeugen aus einem konstanten und zwei variablen Termen zusammensetzt. Die variablen Terme sind von der aktuellen Geschwindigkeit und der mittleren Geschwindigkeit im freien Verkehr abhängig. Die k(v)-Beziehung ergibt sich als Reziprokwert der Weglücke:

$$k(v) = \frac{1}{\Delta x} = \frac{1}{C_1 + \frac{C_2}{V_0 - v} + C_3 \cdot v} \quad (3-7)$$

mit:

$k(v)$ = Verkehrsdichte k in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit v [Kfz/km]

Δx = Mindestweglücke zwischen aufeinanderfolgenden Fahrzeugen [km]

v = mittlere momentane Geschwindigkeit [km/h]

v_0 = mittlere freie momentane Geschwindigkeit [km/h]

c_1, c_2, c_3 = Modellparameter

Die Modellparameter c_1, c_2 und c_3 haben keinen direkten Bezug zu realen Kenngrößen des Verkehrsablaufs. Sie können durch nicht-lineare Regression in der k-v-Ebene ermittelt werden. Bei diesem iterativen Verfahren muss die Gleichung (3-7) nach v umgestellt werden.

$$v(k) = \frac{1}{2} \cdot \left(v_0 + \frac{1}{c_3 \cdot k} - \frac{c_1}{c_3} \pm \sqrt{R} \right) \quad (3-8)$$

mit:

$$R = \frac{1 - 2 \cdot c_1 \cdot k + 2 \cdot c_1 \cdot c_3 \cdot k^2 \cdot v_0 + c_1^2 \cdot k^2 + 4 \cdot c_2 \cdot c_3 \cdot k^2 - 2 \cdot c_3 \cdot k \cdot v_0 + c_3^2 \cdot k^2 \cdot v_0^2}{(c_3 \cdot k)^2} \quad (3-9)$$

$v(k)$ = Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Verkehrsdichte [km/h]

k = Verkehrsdichte [Kfz/km]

v_0 = mittlere freie momentane Geschwindigkeit [km/h]

c_1, c_2, c_3 = Modellparameter

Die $v(k)$ -Beziehung (Gleichung (3-8)) ergibt dabei nur dann sinnvolle Werte, wenn der Wurzelausdruck (Gleichung (3-9)) subtrahiert wird (PONZLET, 1996).

Mit dem VAN AERDE-Modell ist in der Regel eine gute Anpassung des Fundamentaldiagramms an reale Daten mit einer durchgehenden Funktion möglich. Ausnahmen ergeben sich bei bestimmten Formen der Punktwolke (z. B. weitestgehend horizontaler Verlauf des oberen und unteren Astes) und werden im weiteren Verlauf der Untersuchungen detaillierter behandelt. Das VAN AERDE-Modell eignet sich insbesondere für die Bestimmung der Kapazität C , die der Verkehrsstärke am Scheitelpunkt der Kurve entspricht. Das Modell wurde u. a. für die Überprüfung der Bemessungskapazitäten des HBS (FGSV, 2001) im Rahmen der Fortschreibung des Bemessungsverfahrens für Strecken von Autobahnen angewendet (vgl. BRILON und GEISTEFELDT, 2010).

3.2 Kapazität auf Autobahnen

3.2.1 Definition der Kapazität

Nach den Begriffsbestimmungen der FGSV (2012) ist die Kapazität eines Verkehrstroms definiert als die „größte Verkehrsstärke, die ein Verkehrstrom unter den gegebenen baulichen und verkehrlichen Bedingungen erreichen kann.“ In den derzeit gültigen Regelwerken (z. B. FGSV, 2015; TRB, 2010) wird die Kapazität vereinfachend als konstante, nur von systematischen Einflüssen abhängige Größe betrachtet. Verschiedene Untersuchungen (z. B. MINDERHOUD et al., 1997; PERSAUD et al., 1998; LORENZ und ELEFTERIADOU, 2000; ZURLINDEN, 2003; BRILON et al., 2005a) haben jedoch gezeigt, dass die Kapazität infolge der Zufälligkeit des Verkehrsablaufs und des individuellen Verhaltens der Fahrzeugführer erheblich variieren kann und deshalb als Zufallsgröße aufgefasst werden muss. Die Kapazität wird dann durch eine Verteilungsfunktion beschrieben. Diese ist definiert als die Wahrscheinlichkeit, dass es bei einer Verkehrsstärke q zu einem Zusammenbruch des Verkehrsflusses kommt.

3.2.2 Einflüsse auf die Kapazität

Die Kapazität auf Autobahnen wird von einer Reihe von Faktoren beeinflusst. Dazu zählen:

- Streckencharakteristik:
 - Querschnittsgestaltung (Fahrstreifenanzahl und -breite, Vorhandensein eines Seitenstreifens),

- Trassierung (Längsneigung, Kurvigkeit),
- verkehrsrechtliche Maßnahmen (Geschwindigkeitsbeschränkungen, Verkehrsbeeinflussungsanlagen, Überholverbote),
- Straßenzustand, Oberflächeneigenschaften,
- Verkehrszusammensetzung (insbesondere Schwerverkehrsanteil),
- Umfeldeinflüsse:
 - Helligkeit,
 - Witterungsbedingungen (Regen, Schnee, Glätte, Nebel, Wind),
- fahrzeugabhängige Faktoren:
 - Fahrzeugtyp (Abmessungen),
 - Fahreigenschaften (Beschleunigungs- und Bremsvermögen),
- fahrzeugführerabhängige Faktoren:
 - Fahreigenschaften (Seh- und Reaktionsvermögen, Sicherheitsbewusstsein),
 - Fahrtzweck (Ortskenntnis, Fahrweise, Wunschgeschwindigkeit).

Insbesondere wechselnde Umfeldeinflüsse sowie fahrzeug- bzw. fahrzeugführerabhängige Faktoren sind im Zuge der Planung von Autobahnen in der Regel nicht genau einzuschätzen. Die Kapazitätswerte des HBS (FGSV, 2015) gelten daher für Tageslicht und trockene Fahrbahn. Das Fahrverhalten der Fahrzeugführer wird insofern berücksichtigt, als die Lage der Strecke innerhalb oder außerhalb von Ballungsräumen als Kriterium für den Anteil der ortskundigen Verkehrsteilnehmer herangezogen wird. Darüber hinaus wird im HBS (FGSV, 2015) unterschieden nach der Fahrstreifenanzahl, der Längsneigung, der Geschwindigkeitsregelung und dem Schwerverkehrsanteil (SV-Anteil).

Im Bereich von Arbeitsstellen können weitere Faktoren die Kapazität beeinflussen. Dazu zählen insbesondere die Parameter der Verkehrsführung in der Arbeitsstelle:

- Breiten der einzelnen Behelfsfahrstreifen,
- Verschwenkungen,
- Überleitungen auf die Gegenfahrbahn von allen oder einem Teil der Fahrstreifen,
- Fahrstreifenreduktionen am Beginn der Arbeitsstelle und
- spezifische verkehrsrechtliche Maßnahmen (z. B. besondere Markierungen und Beschilderungen oder Überholverbote).

Die deutlich höhere Anzahl an Variationen der Verkehrsführung als bei normalen Straßenquerschnitten auf der freien Strecke führt zu großen Spannweiten innerhalb der Einflussgrößen. Dadurch erweitert sich die Anzahl an möglichen Einflusskombinationen erheblich.

Ziel der vorliegenden Untersuchung ist es unter anderem, aus der Vielzahl der möglichen Einflussfaktoren diejenigen herauszufiltern, die einen messbaren Einfluss auf den Verkehrsablauf und die Kapazität von Arbeitsstellen haben. Ein Überblick zu Kapazitätswerten für Arbeitsstellen mit unterschiedlichen Randbedingungen aus früheren Untersuchungen findet sich in Kapitel 3.4.

Capacity Drop

Neben den zuvor bereits genannten Einflussfaktoren wird die Kapazität auch vom Verkehrszustand systematisch beeinflusst. In verschiedenen Untersuchungen (z. B. BANKS,

1991; HALL und AGYEMANG-DUAH, 1991; PONZLET, 1996; BRILON und ZURLINDEN, 2003; REGLER, 2004) wurde nachgewiesen, dass die Kapazität im fließenden Verkehr in der Regel merklich über der Kapazität im gestauten Verkehr liegt. Dieses Phänomen wird als „Capacity Drop“ bezeichnet. Der Rückgang der Kapazität wird dabei auf die zuvor genannten fahrerführerabhängigen Einflussgrößen zurückgeführt. Während im fließenden Verkehr bei hoher Verkehrsnachfrage sehr kurze Lücken zwischen den einzelnen Fahrzeugen akzeptiert werden, bilden sich bei der Ausfahrt aus einem Stau Lücken mit größeren, sicherheitsbetonten Abständen (PONZLET, 1996). Dieses Verhalten führt zu geringeren Kapazitäten. Im Rahmen der genannten Untersuchungen ergaben sich in der Regel Kapazitätsrückgänge infolge eines Verkehrszusammenbruchs zwischen 4 und 12 %. Allerdings stellte sich auch heraus, dass in manchen Fällen kein oder sogar ein negativer Capacity Drop festgestellt werden kann. Grundsätzlich unterscheiden sich die Definitionen und Methoden zur Ermittlung des Capacity Drop in den einzelnen Untersuchungen deutlich voneinander.

3.2.3 Kapazität von Arbeitsstellen auf Autobahnen

Ein Verfahren zur Ermittlung der Kapazität von Arbeitsstellen wird im Leitfaden zum Arbeitsstellenmanagement auf Bundesautobahnen (BMVBS, 2011a) angegeben. Die dort enthaltenen Kapazitäten gehen auf KELLERMANN (1997) zurück und dienen im Rahmen eines überschlägigen Bewertungsverfahrens, welches in den zugehörigen Ausführungshinweisen (BMVBS, 2011b) näher erläutert wird, zur Einschätzung der verkehrlichen Auswirkungen einer Arbeitsstelle. Das Verfahren wurde weitgehend aus den durch den Leitfaden abgelösten RBAP (BMV, 1996) übernommen. Die wesentlichen Änderungen betrafen den Verzicht auf die Hilfsrechnungen zur Abschätzung der Verkehrsnachfrage und die Verminderung der längsneigungsabhängigen Geländefaktoren für Längsneigungen größer 2 % (RBAP, Tabelle 3-1),

Bei dem Bewertungsverfahren zur Einschätzung der verkehrlichen Auswirkungen von Arbeitsstellen handelt es sich um einen einfachen Vergleich von Verkehrsnachfrage und Kapazität in repräsentativen Spitzenstunden. Die Differenz S_{Diff} zwischen Verkehrsnachfrage und Kapazität pro Fahrstreifen nach Gleichung (3-10) wird als Indikator für die verkehrlichen Auswirkungen einer Arbeitsstelle verwendet.

$$S_{\text{Diff}} = (q_{\text{PE}} - C_{\text{RI,PE}}) / n_{\text{FS}} \quad (3-10)$$

mit:

$$S_{\text{Diff}} = \text{Differenz zwischen Verkehrsnachfrage und Kapazität} \quad [\text{Pkw-E/h/FS}]$$

$$q_{\text{PE}} = \text{Verkehrsnachfrage in der maßgebenden Spitzenstunde} \quad [\text{Pkw-E/h}]$$

$$C_{\text{RI,PE}} = \text{Kapazität der Strecke} \quad [\text{Pkw-E/h}]$$

$$n_{\text{FS}} = \text{Anzahl der Fahrstreifen der betrachteten Richtungsverkehrsführung} \quad [-]$$

Bei der Ermittlung von S_{Diff} berücksichtigt die Verkehrsstärke q_{PE} , die nach Gleichung (3-11) berechnet wird, sowohl den Einfluss des Schwerverkehrs durch die Umrechnung in Pkw-Einheiten als auch den Einfluss der Längsneigung auf dem betrachteten Abschnitt. Die Werte des zugehörigen Geländefaktors f_G sind in Tabelle 3-1 dargestellt.

$$q_{\text{PE}} = q \cdot (1 + b_{\text{SV}}/100 \cdot (f_G - 1)) \quad (3-11)$$

mit:

$$q_{\text{PE}} = \text{Verkehrsnachfrage in der maßgebenden Spitzenstunde} \quad [\text{Pkw-E/h}]$$

$$q = \text{geschätzte richtungsbezogene Verkehrsnachfrage in der Spitzenstunde} \quad [\text{Kfz/h}]$$

b_{SV} = Schwerverkehrsanteil in der Spitzenstunde [%]

f_G = längsneigungsabhängiger Geländefaktor nach Tabelle 3-1 [-]

	Steigungsklasse		
	eben < 2 %	hügelig 2 – 4 %	bergig > 4 %
Geländefaktor f_G	1,5	2	2,5

Tab. 3-1: Längsneigungsabhängiger Geländefaktor f_G (BMVBS, 2011b)

Falls die Kapazität der Arbeitsstelle bekannt ist, kann diese in Pkw-Einheiten umgerechnet und direkt mit der Verkehrsnachfrage verglichen werden. Andernfalls kann die Kapazität überschlägig nach Tabelle 3-2 geschätzt werden. Das Verfahren zur Bestimmung der Kapazität basiert auf Abminderungsfaktoren. Hierbei werden die typischen Einflussfaktoren Fahrstreifenbreite, Überleitung, Fahrstreifenreduktion und Ortsunkundigkeit der Fahrer berücksichtigt. Die einzelnen Abminderungen betragen 5 bis 10 % und können untereinander kombiniert werden. Die Überleitung von Fahrstreifen auf die Gegenfahrbahn wirkt sich nach KELLERMANN (1997) nur auf die Kapazität der übergeleiteten Fahrstreifen aus, im Berechnungsformular des Leitfadens zum Arbeitsstellenmanagement (BMVBS, 2011b) entsteht allerdings irrtümlich der Eindruck, dass der Reduktionsfaktor für den Gesamtquerschnitt angesetzt wird. Da der Sachverhalt im Text des Leitfadens nicht eindeutig beschrieben wird, ergeben sich Interpretationsspielräume für die Anwendung des Verfahrens. Die Beurteilung der verkehrlichen Auswirkungen auf der Grundlage von S_{Diff} und die damit einhergehend geforderten Maßnahmen sind in Tabelle 3-3 dargestellt.

	Reduktionsfaktor	Kapazität C_{PE} [Pkw-E/h/FS]	
		$b_{FS,Lkw} \geq 3,25 \text{ m}$ oder $b_{FS,Pkw} \geq 2,75 \text{ m}$	$b_{FS,Lkw} < 3,25 \text{ m}$ oder $b_{FS,Pkw} < 2,75 \text{ m}$
Grundwerte der Kapazität in Abhängigkeit von der Fahrstreifenbreite	1,0	1.830	1.720
Reduzierung der Kapazität durch:			
ÜL oder RFS	0,95	1.740	1.630
ÜL und RFS	$0,95 \cdot 0,95$	1.650	1.550
OU	0,9	1.640	1.550
OU und ÜL/OU und RFS	$0,9 \cdot 0,95$	1.560	1.470
OU und ÜL und RFS	$0,9 \cdot 0,95 \cdot 0,95$	1.480	1.400
ÜL: Überleitung auf die Gegenfahrbahn RFS: Reduktion der Anzahl der Fahrstreifen vor der Baustelle OU: Ortsunkundige, d. h. der geschätzte Anteil des berufsbedingten Verkehrs liegt unter 50 %			

Tab. 3-2: Richtwerte für die Ermittlung der Kapazität C_{PE} eines Fahrstreifens an Arbeitsstellen (BMVBS, 2011b)

S_{Diff} [Pkw-E/h/FS]	Verkehrliche Auswirkungen	Maßnahmen
≤ -100	keine Verkehrsbehinderung	Maßnahmen nicht unbedingt erforderlich
> -100 ≤ 200	geringe Verkehrsbehinderung	Medien-Information
> 200	starke Verkehrsbehinderung	alternative Ausführungsvarianten prüfen und darstellen, Medien-Information

Tab. 3-3: Beurteilung der Größe S_{Diff} hinsichtlich der verkehrlichen Auswirkung einer Arbeitsstelle (BMVBS, 2011b)

Das Bewertungsverfahren des Leitfadens (BMVBS, 2011a) soll mittelfristig durch das Verkehrsanalysesystem (VAS) ersetzt werden, welches eine verkehrliche Bewertung nach dem Prinzip der Ganzjahresanalyse ermöglicht. Im Rahmen dieser Umstellung sollen auch aktuelle Kapazitätswerte für Arbeitsstellen bereitgestellt werden. Die Ermittlung der Kapazitäten ist Gegenstand der vorliegenden Untersuchung. Die Erarbeitung des methodischen Ansatzes für das VAS erfolgte in der Untersuchung von GEISTEFELDT und HOHMANN (2014).

3.3 Methoden der Kapazitätsbestimmung

3.3.1 Deterministische Kapazitätsermittlung

Bei deterministischer Betrachtungsweise wird die Kapazität eines Autobahnquerschnitts anhand der Analyse empirischer Verkehrsdaten mithilfe eines Verkehrsflussmodells ermittelt. Die Kapazität entspricht dann der Verkehrsstärke am Scheitelpunkt der Kurve im q-v-Diagramm und stellt somit eine Konstante dar. Ein eindeutiger Scheitelpunkt liegt nur dann vor, wenn der Verkehrsablauf im Modell durch eine durchgehende Kurve beschrieben wird. Dies ist beim Modell nach VAN AERDE (1995) gegeben (vgl. Kapitel 3.1.2) und für ein Beispiel in Bild 3-3 dargestellt. Andere bekannte Modelle verwenden zweigeteilte Ansätze, sodass sich die Größe der Kapazität hier aus der Festlegung der Grenze zwischen den beiden Teilansätzen ergibt. Diese Modelle sind deshalb nur bedingt zur Ermittlung der Kapazität geeignet.

Das Modell von VAN AERDE (1995) wurde in der Untersuchung von BRILON und GEISTEFELDT (2010) zur Überprüfung der Bemessungskapazitäten des HBS (FGSV, 2001) eingesetzt. Da mit dem VAN AERDE-Modell nicht immer eine zufriedenstellende Anpassung an empirische Daten gelingt, wurde für die ermittelte Kapazität ein Vertrauensbereich definiert. Als untere und obere Vertrauensgrenzen für die Kapazität wurden dabei das 95. bzw. 99. Perzentil der Verkehrsstärke festgelegt. Sofern die Kapazität nach VAN AERDE über dem 99. Perzentil lag, wurde stattdessen der Perzentilwert als Nennwert der Kapazität (C_N) aufgefasst. Lag die Kapazität unter dem 95. Perzentil, aber höher als die Kapazität nach HBS (FGSV, 2001), wurde dieses Perzentil als Kapazität aufgefasst.

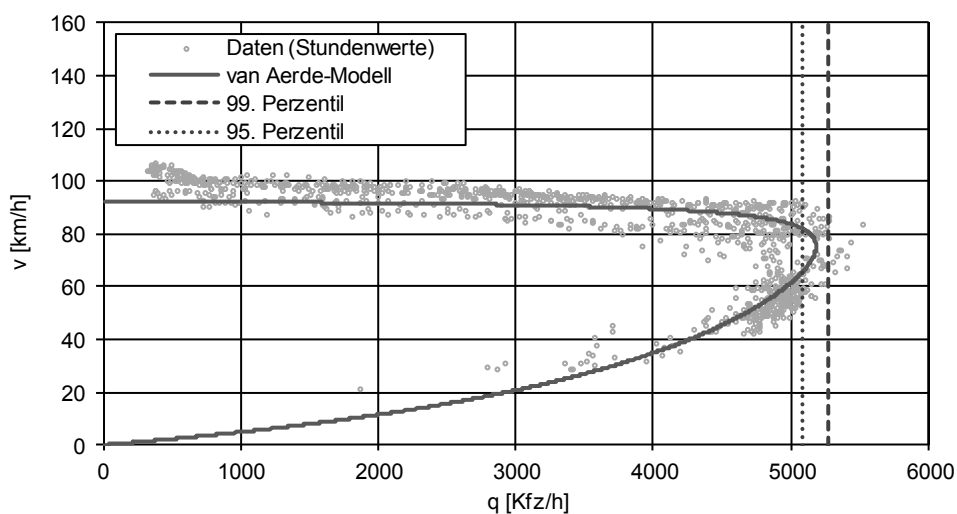


Bild 3-3: Beispiel für die Anpassung des VAN AERDE-Modells an Daten in Stunden-Intervallen im q-v-Diagramm

Einfluss der Intervalldauer

Die Intervalldauer hat einen erheblichen Einfluss auf die Gestalt des Fundamentaldiagramms und damit auch auf die Höhe der ermittelten Kapazität. Mit zunehmender Intervalldauer nimmt die Kapazität ab (vgl. z. B. KELLER und SACHSE, 1992 oder PONZLET, 1996). Die makroskopischen Kennwerte q , v und k können bei längeren Intervalldauern aus einer Aggregation verschiedener Einzelzustände entstehen und bilden somit einen Verkehrszustand ab, der in der Realität gar nicht existiert hat (HALL und BRILON, 1994). Je länger das Intervall gewählt wird, umso größer ist dieser Effekt der Mittelung. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn es während des Intervalls zu Zusammenbrüchen des Verkehrsflusses gekommen ist. In diesem Fall kommt es zur Mittelung von Werten aus dem oberen und unteren Ast des q - v -Diagramms, sodass sich vermehrt Punkte im Inneren der Parabel ergeben (instationäre Werte). Dieser Effekt führt wiederum dazu, dass der Scheitelpunkt des VAN AERDE-Modells verschoben wird und unrealistisch kleine Kapazitäten entstehen. Um dies bei der Anpassung des Modells zu vermeiden, ist es sinnvoll, Intervalle mit instationären Werten aus der Analyse auszuschließen (vgl. LEMKE, 2000; BRILON und GEISTEFELDT, 2010).

3.3.2 Stochastische Kapazitätsanalyse

Die Kapazität eines Autobahnquerschnittes ist in der Realität Schwankungen unterworfen, die insbesondere auf die Zufälligkeit der Verkehrszusammensetzung und des individuellen Fahrverhaltens zurückzuführen sind. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, die Kapazität als Zufallsgröße zu betrachten, welche durch folgende Verteilungsfunktion repräsentiert wird (vgl. BRILON et al., 2005a):

$$F_C(q) = p(C \leq q) \quad (3-12)$$

mit:

$F_C(q)$ = Verteilungsfunktion der Kapazität

$p(C \leq q)$ = Wahrscheinlichkeit, dass die Kapazität C kleiner oder gleich der Verkehrsstärke q ist

Im Mittelpunkt der stochastischen Kapazitätsanalyse steht die Auswertung von Verkehrszusammenbrüchen. Die Identifizierung der Zusammenbrüche kann anhand der Ganglinie der mittleren Geschwindigkeiten am betrachteten Querschnitt erfolgen. Jedes Intervall, in dem die Geschwindigkeit unter eine vorher festgelegte Grenzgeschwindigkeit fällt, wird als Zusammenbruchsintervall gewertet. Die Verkehrsstärke, die in dem Intervall direkt vor dem Zusammenbruch gemessen wurde, wird als Kapazitätswert aufgefasst. Für die Ermittlung der Verteilungsfunktion sind neben den Intervallen vor Verkehrszusammenbrüchen auch diejenigen Verkehrsstärken von Interesse, die im fließenden Verkehr gemessen werden und keinen Verkehrszusammenbruch nach sich ziehen. In diesen Intervallen kann die momentane Kapazität nicht gemessen werden, allerdings muss die Kapazität über der gemessenen Verkehrsstärke liegen.

Verteilungsfunktionen der Kapazität können mit statistischen Methoden für zensierte Daten empirisch geschätzt werden (BRILON und ZURLINDEN, 2003; GEISTEFELDT und BRILON, 2009). Dabei werden die Messdaten in unzensierte und zensierte Intervalle eingeteilt:

- In unzensierten Intervallen wird die Kapazität erreicht, es erfolgt ein Zusammenbruch des Verkehrsflusses. Die unmittelbar vor dem Zusammenbruch beobachtete Verkehrsstärke wird als Kapazitätswert aufgefasst.

- In zensierten Intervallen wird die Kapazität nicht erreicht, der Verkehr bleibt im fließenden Zustand. Es ergibt sich kein Kapazitätswert. Dafür kann jedoch die Aussage gemacht werden, dass die momentane Kapazität größer ist als die gemessene Verkehrsstärke.

Intervalle im Zustand des gestauten Verkehrs, d. h. nach einem Verkehrszusammenbruch, ermöglichen keine Aussage zur Kapazität im fließenden Verkehr und werden deshalb in der Analyse nicht weiter betrachtet.

Grundsätzlich ist diese Art der Kapazitätsanalyse nur bei kurzen Intervalldauern möglich, in denen ein direkter Zusammenhang zwischen dem Zusammenbruch und der davor gemessenen Verkehrsstärke hergestellt werden kann. Dieser Zusammenhang wäre beispielsweise bei der Betrachtung von Stunden-Intervallen nicht gegeben, da Zusammenbrüche in der Regel plötzlich auftreten und nicht auf den Verkehrszustand in einer gesamten Stunde zurückgeführt werden können. Unter Berücksichtigung sowohl der Verfügbarkeit der zur Analyse benötigten Daten als auch des Auswerteaufwands hat sich das 5-Minuten-Intervall als geeignete Grundlage für die stochastische Kapazitätsanalyse erwiesen (BRILON und ZURLINDEN, 2003). Entscheidend ist, dass nur Kapazitätswerte in die Analyse eingehen, die direkt auf Überlastungen am betrachteten Querschnitt zurückzuführen sind. Weiterhin sollten auch Zusammenbrüche ausgeschlossen werden, die bei geringen Verkehrsstärken – deutlich unter der erwarteten Kapazität – auftreten und nicht auf eine Überlastung des Querschnittes zurückzuführen sind.

Von großer Bedeutung für das Ergebnis der stochastischen Kapazitätsanalyse ist die Festlegung der Bedingungen, die den Verkehrszusammenbruch definieren. BRILON und ZURLINDEN (2003) definieren den Zusammenbruch grundsätzlich als das Unterschreiten einer Grenzgeschwindigkeit von 70 km/h:

$$v(i) > v_{\text{grenz}}$$

$$v(i+1) < v_{\text{grenz}}$$

mit:

$$v(i) = \text{mittlere Pkw-Geschwindigkeit im Intervall } i \quad [\text{km/h}]$$

$$v_{\text{grenz}} = \text{gewählte Grenzgeschwindigkeit für einen Verkehrszusammenbruch} \quad [\text{km/h}]$$

Um auszuschließen, dass Intervalle als Zusammenbrüche gewertet werden, die aus Geschwindigkeitsschwankungen im gestauten Verkehr resultieren, wurden von GEISTEFELDT (2007) erweiterte Grenzbedingungen definiert. Dabei werden nur noch Geschwindigkeiten unter der Grenzgeschwindigkeit, die über mindestens zwei Intervalle bestanden haben und eine Differenz zur vorherigen Geschwindigkeit von mindestens 10 km/h aufweisen, als Zusammenbruch gewertet. Zudem wird die Grenzgeschwindigkeit für jeden Querschnitt individuell anhand des zugehörigen q-v-Diagramms bestimmt. Die Grenzbedingungen lauten:

$$v(i-1) > v_{\text{grenz}}$$

$$v(i) > v_{\text{grenz}}$$

$$v(i+1) < v_{\text{grenz}}$$

$$v(i+2) < v_{\text{grenz}}$$

$$\frac{v(i-1) + v(i)}{2} - \frac{v(i+1) + v(i+2)}{2} > 10 \text{ km/h}$$

Für die Ermittlung einer Verteilungsfunktion der Kapazität aus Daten, die zensierte Werte enthalten, können nicht-parametrische und parametrische Schätzverfahren angewandt werden (BRILON und ZURLINDEN, 2003; GEISTEFELDT und BRILON, 2009). Bei der Product-Limit-Methode erfolgt eine Schätzung der Verteilungsfunktion ohne Annahme eines bestimmten Funktionstyps. Bei der Maximum-Likelihood-Methode hingegen wird ein Funktionstyp für die Anpassung der Verteilung gewählt. Die beiden Methoden werden im Folgenden dargestellt.

Product-Limit-Methode

Die Product-Limit-Methode ist ein nicht-parametrisches Verfahren. Das bedeutet, dass die Verteilungsfunktion ohne Annahme eines bestimmten Funktionstyps geschätzt wird. Die ursprüngliche Schätzfunktion der Lebensdauerverteilung von KAPLAN und MEIER (1958) lautet:

$$F(t) = 1 - \prod_{i: t_i < t} \frac{n_i - d_i}{n_i} \quad (3-13)$$

mit:

$$F(t) = \text{Schätzung der Lebensdauerverteilung} \quad [-]$$

$$n_i = \text{Anzahl der Individuen mit einer Lebensdauer } t \geq t_i \quad [-]$$

$$d_i = \text{Anzahl der Versagensfälle im Intervall } i \quad [-]$$

Angewendet auf die Verkehrsflussanalyse lautet die Product-Limit-Schätzung der Verteilungsfunktion der Kapazität (BRILON und ZURLINDEN, 2003):

$$F_C(q) = 1 - \prod_{i: q_i < q} \frac{k_i - 1}{k_i} \quad ; i \in \{C\} \quad (3-14)$$

mit:

$$F_C(q) = \text{Schätzung der Verteilungsfunktion der Kapazität} \quad [-]$$

$$k_i = \text{Anzahl der Intervalle mit einer Verkehrsstärke } q \geq q_i \quad [-]$$

$$C = \text{Menge der Intervalle, die einen Zusammenbruch nach sich ziehen (unzensierte Werte)}$$

Alle Intervalle, in denen die Verkehrsnachfrage größer ist als die Kapazität, d. h. in denen ein Verkehrszusammenbruch ausgelöst wird, bilden somit einen Faktor des Produkts aus Gleichung (3-14). Der Parameter d aus Gleichung (3-13) ist in diesem Fall immer gleich 1. Ein Nachteil bei der Bestimmung der Verteilungsfunktion der Kapazität mit der Product-Limit-Methode ist die Eigenschaft, dass die Funktion immer mit dem größten unzensierten Wert endet. Ist der größte beobachtete Stichprobenwert jedoch zensiert, d. h. auf die gemessene Verkehrsstärke folgte kein Zusammenbruch, so erreicht die Verteilungsfunktion nicht den Wert 1. Sie ist somit unvollständig.

Maximum-Likelihood-Methode

Das zuvor beschriebene Problem der unvollständigen Verteilungsfunktion kann dadurch umgangen werden, dass ein Funktionstyp, welcher die Product-Limit-Schätzung möglichst genau beschreibt, vorgegeben wird. Die Parameter des gewählten Funktionstyps lassen

sich dann mithilfe einer Maximum-Likelihood-Schätzung bestimmen. Die Likelihood-Funktion lautet (BRILON und ZURLINDEN, 2003):

$$L = \prod_{i=1}^n f_c(q_i)^{\delta_i} \cdot [1 - F_c(q_i)]^{1-\delta_i} \quad (3-15)$$

mit:

- L = Likelihood-Funktion
- n = Gesamtzahl der Intervalle [-]
- $f_c(q)$ = Dichtefunktion der Kapazität [-]
- $F_c(q)$ = Verteilungsfunktion der Kapazität [-]
- q_i = Verkehrsstärke im Intervall i [Kfz/h]
- δ_i = 1, wenn die Kapazität erreicht wird (unzensierte Intervalle)
= 0, wenn kein Zusammenbruch erfolgt (zensierte Intervalle)

Die optimal passenden Parameter für den gewählten Funktionstyp ergeben sich durch Maximierung der Likelihood-Funktion. BRILON und ZURLINDEN (2003) sowie GEISTEFELDT (2007) haben verschiedene Verteilungsfunktionen (Normalverteilung, Weibull-Verteilung, Gamma-Verteilung) hinsichtlich ihrer Eignung zur Beschreibung der Kapazitätsverteilung untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass die Kapazität von Bundesautobahnen am besten mit der Weibull-Verteilung beschrieben werden kann. Die Weibull-Verteilungsfunktion der Kapazität lautet:

$$F_c(q) = 1 - e^{-\left(\frac{q}{b}\right)^a} \quad \text{für } q \geq 0$$

mit:

- $F_c(q)$ = Wert der Verteilungsfunktion der Kapazität [-]
- q = Verkehrsstärke [Kfz/h]
- a = Formparameter [-]
- b = Maßstabsparameter [Kfz/h]

Der Formparameter a beschreibt die Streuung der Funktion und liegt üblicherweise in einer Größenordnung von 10 bis 25. Der Maßstabsparameter b ist proportional zum Erwartungswert der Verteilungsfunktion und kann zur Erfassung systematischer Einflüsse auf die Kapazität variiert werden.

Am Beispiel einer dreistreifigen Richtungsfahrbahn sind in Bild 3-4 die mit der Product-Limit- und der Maximum-Likelihood-Methode ermittelten Verteilungsfunktionen der Kapazität gegenübergestellt. Die Product-Limit-Schätzung endet bereits bei einem Wert von etwa 0,91 und erreicht nicht den Wert 1. Die Maximum-Likelihood-Schätzung ergibt dagegen eine durchgehende Weibull-Verteilungsfunktion.

Während bei der deterministischen Kapazitätsanalyse für die Anpassung des VAN AERDE-Modells ein möglichst großer Umfang an Datenpunkten sowohl im oberen als auch im unteren Ast des Fundamentaldiagramms vorliegen sollte, bestimmt bei der stochastischen Kapazitätsanalyse vor allem die Anzahl der Verkehrszusammenbrüche die Qualität der Ergebnisse. Im Hinblick auf die Kapazitätsanalyse von Arbeitsstellen, die in der Regel über einen relativ kurzen Zeitraum bestehen, aber häufig ausgeprägte Verkehrszusammenbrüche hervorrufen, kann das stochastische Verfahren somit vorteilhaft sein.

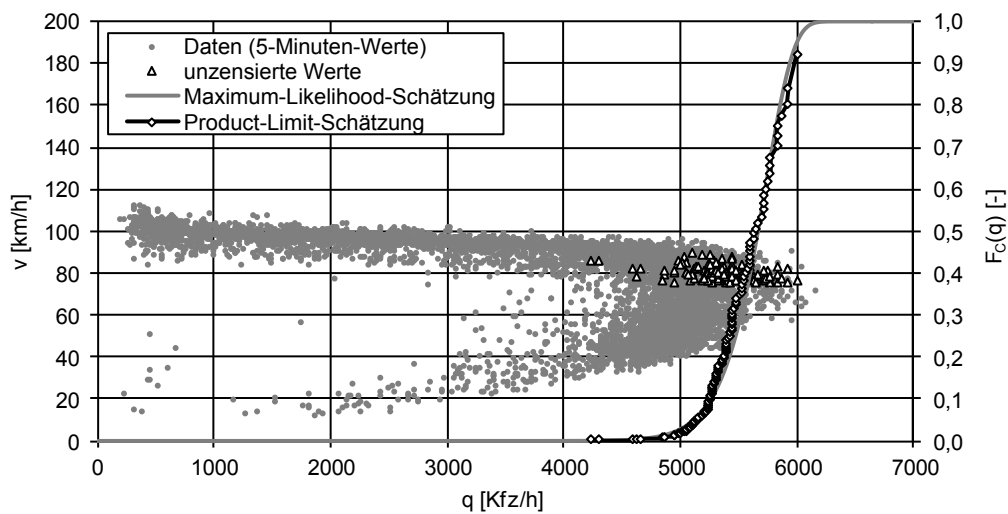


Bild 3-4: q-v-Diagramm sowie Product-Limit- und Maximum-Likelihood-Schätzung der Verteilungsfunktion der Kapazität am Beispiel einer dreistreifigen Richtungsverkehrsführung einer Arbeitsstelle

3.4 Bisherige Untersuchungen zum Verkehrsablauf an Arbeitsstellen

3.4.1 Nationale Untersuchungen

Der Verkehrsablauf im Bereich von Arbeitsstellen war in der Vergangenheit bereits Gegenstand zahlreicher Untersuchungen mit unterschiedlichen Zielsetzungen und Schwerpunkten. Die ersten wissenschaftlichen Studien stammen aus den 1980er und 1990er Jahren (z. B. HOFFMANN et al., 1981; SCHMUCK und BECKER, 1984; RESSEL, 1994) und entstanden dementsprechend noch vor der Einführung der zurzeit gültigen RSA (BMV, 1995). Weiterhin haben sich die Verkehrszusammensetzung und das Verkehrsaufkommen seit dieser Zeit maßgeblich verändert, sodass die Ergebnisse dieser Arbeiten nur eingeschränkt auf heutige Arbeitsstellen übertragbar sind.

Neuere Untersuchungen stammen von BECKMANN und ZACKOR (2001), OBER-SUNDERMEIER (2003) und SÜMMERMANN (2012). Kapazitätsuntersuchungen wurden bislang hauptsächlich für Arbeitsstellen längerer Dauer durchgeführt. Eine Übersicht über die oben erwähnten und weitere Untersuchungen zum Verkehrsablauf in Arbeitsstellen längerer und kürzerer Dauer ist nachfolgend dargestellt.

HOFFMANN et al. (1981)

Untersuchungen von HOFFMANN et al. (1981) beziehen sich ausschließlich auf eine Arbeitsstelle auf dem Berliner Stadtring mit einer 3+1-Verkehrsführung. Je nach Fahrtrichtung mit oder ohne Trennung der Fahrstreifen einer Richtungsfahrbahn ergaben sich hier Kapazitäten zwischen 3.000 und 4.000 Kfz/h, basierend auf der Auswertung von 2-Minuten-Intervallen. Zwar wird erwähnt, dass Anschlussstellen in der Arbeitsstelle und die Höhe des SV-Anteils einen Einfluss auf die Kapazität haben, quantifiziert werden diese Einflüsse jedoch nicht. Zudem beruhen die Ergebnisse auf Tagesmessungen, sodass von einer deutlich geringeren Datengrundlage als z. B. bei Dauerzählstellen ausgegangen werden kann. Weiterhin wurden Untersuchungen hinsichtlich des Geschwindigkeitsniveaus in der Arbeitsstelle durchgeführt. In der Fahrtrichtung mit baulich getrennten Fahrstreifen wurden die zulässigen Höchstgeschwindigkeiten von 60 km/h gut eingehalten. In der Gegenrichtung wurden aber vor allem auf dem Überholfahrestreifen Überschreitungen der zulässigen

Höchstgeschwindigkeit um bis zu 30 km/h gemessen. 60 % der Verkehrsteilnehmer fahren hier schneller als zulässig.

SCHMUCK und BECKER (1984)

Die Untersuchungen von SCHMUCK und BECKER (1984) beruhen auf einer Datengrundlage aus Arbeitsstellen mit 4+0- und 3+1-Verkehrsführungen. Die zugrunde liegenden Messungen weisen keine oder nur sehr geringe Überlastungen auf, sodass eine Schlussfolgerung hinsichtlich der Kapazitäten nur eingeschränkt möglich ist. Darauf wird in der Untersuchung auch explizit hingewiesen. Dennoch werden mithilfe einer Trendextrapolation Kapazitätswerte geschätzt. Für die Verkehrsführung 4+0 und für den baustellenabgewandten Richtungsverkehr in der Verkehrsführung 3+1 werden Kapazitäten zwischen 2.400 und 2.900 Kfz/h ermittelt. Für den baustellenzugewandten Verkehr mit 3+1-Verkehrsführung und dementsprechend ohne Überholmöglichkeiten werden geringfügig kleinere Kapazitäten von 2.000 bis 2.800 Kfz/h angegeben.

Weiterhin stellen SCHMUCK und BECKER (1984) bei der Analyse der gefahrenen Geschwindigkeiten in der Arbeitsstelle fest, dass die Höhe und das Ausmaß der Geschwindigkeitsüberschreitungen zunehmen, je geringer die zulässige Höchstgeschwindigkeit ist. Bei Geschwindigkeitsbeschränkungen auf 60 km/h wird die zulässige Höchstgeschwindigkeit, zumindest im niedrigeren Verkehrsstärkebereich, von nahezu allen Pkw überschritten. Beschränkungen auf 100 km/h werden hingegen fast immer eingehalten.

WEINSPACH (1988)

Die Untersuchungen von WEINSPACH (1988) bestätigen weitestgehend die Ergebnisse von SCHMUCK und BECKER (1984) und geben als Kapazität für zweistreifige Querschnitte in Arbeitsstellen einen Wert von etwa 2.700 Kfz/h an. Im Rahmen der Untersuchungen wurde festgestellt, dass die Geschwindigkeitsbeschränkung im Bereich der Überleitung am ehesten eingehalten wird. Kurz vor der Überleitung wurde eine Tendenz zu vermehrten Fahrstreifenwechsellvorgängen auf den rechten Fahrstreifen ermittelt.

RESSEL (1994)

Während die Kapazitäten in den zuvor genannten Untersuchungen auf Analysen des q-v-Diagramms oder des Fundamentaldiagramms beruhen, wurden von RESSEL (1994) empirisch ermittelte Bruttozeitlücken bei einem Rückstau vor der Arbeitsstelle zur Bestimmung von theoretischen Kapazitäten in Abhängigkeit von der Verkehrsführung und dem SV-Anteil verwendet. Dieses Vorgehen wird damit begründet, dass q-v-Diagramme immer nur Momentaufnahmen des Verkehrsgeschehens wiedergeben, wohingegen die Kapazität aus Bruttozeitlücken theoretisch und dementsprechend genauer bestimmt werden kann. Das zugrunde liegende Untersuchungskollektiv ist deutlich umfangreicher als bei den zuvor genannten Untersuchungen. Insgesamt wurden 22 stauanfällige Arbeitsstellen mit acht verschiedenen Verkehrsführungen aus den Jahren 1989 bis 1992 analysiert. Hierbei ging es hauptsächlich um die Analyse der Entstehung und Entwicklung von Verkehrsstauungen an Arbeitsstellen. Schwerpunkte waren Leistungsfähigkeitsuntersuchungen sowie Betrachtungen der Geschwindigkeits- und Zeitlückenverteilungen. Weiterhin wurde die Lage der sogenannten Stauwurzel (Ursprung des Staus) je nach Art der Verkehrsführung untersucht. Während bei einer Verringerung der Fahrstreifenbreite ohne Reduktion der Fahrstreifenanzahl die geringsten Geschwindigkeiten direkt im Bereich der Engstelle liegen, finden sich die geringsten Geschwindigkeiten und damit die Stauwurzeln bei Fahrstreifenreduktionen in der Regel im Bereich der Verflechtungsvorgänge 300 bis 1.000 m vor der eigentlichen Engstelle. Für den Staufall ist in Bild 3-5 das Geschwindigkeitsniveau über die Zeit im Zulauf

zu einer Arbeitsstelle und in der Arbeitsstelle selbst dargestellt. Hier wird deutlich, dass der maßgebende Engpass in der Regel am Beginn der Arbeitsstelle liegt. Ein Stau mit geringen Geschwindigkeiten entwickelt sich dementsprechend stromaufwärts der Arbeitsstelle.

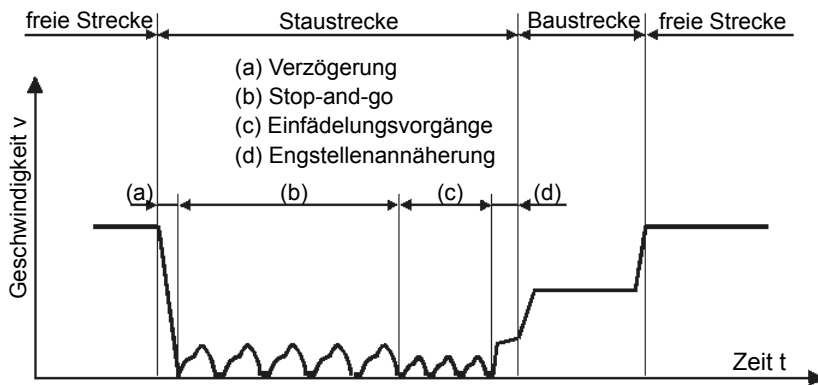


Bild 3-5: Schematische Darstellung des Geschwindigkeitsniveaus über die Zeit im Bereich einer Arbeitsstelle (RESSEL, 1994)

Grundsätzlich haben die Verringerung der Fahrstreifenbreite und eine starke Verschwenkung von Fahrstreifen einen Einfluss auf das Fahrverhalten dahingehend, dass das Sicherheitsbedürfnis der Verkehrsteilnehmer ansteigt und diese dementsprechend ihre Geschwindigkeit reduzieren und die Zeitlücken zum vorausfahrenden Fahrzeug erhöhen. Da im Rahmen der Messungen bei Verkehrsführungen ohne Fahrstreifenüberleitungen oder Fahrstreifenreduktionen (z. B. 2+2- oder 3+3-Verkehrsführung) keine Stauereignisse auftraten, wurden die Kapazitätsanalysen auf die Verkehrsführungen 4+0, 3+1, 2+1, 3+2 und 5+0 beschränkt.

Zur Kalibrierung des Modells zur Ermittlung der Kapazitäten auf der Grundlage von Bruttozeitlücken wurden im Zulauf der untersuchten Arbeitsstellen Zeitlückenverteilungen für die vier möglichen Fahrzeugtypenkombinationen Pkw-Pkw, Pkw-Lkw, Lkw-Pkw und Lkw-Lkw mittels Videotechnik erfasst. Aufeinanderfolgende Pkw wiesen demnach die kleinsten Zeitlücken und aufeinanderfolgende Lkw die größten Zeitlücken auf. Mit abnehmender Fahrstreifenbreite wurden die Zeitlücken größer. Die Berechnung der Kapazitäten erfolgte unter der Annahme, dass die Folge der Fahrzeugtypen im Verkehrsstrom zufällig ist, mithilfe einer Binomialverteilung und mittleren Zeitlücken der Fahrzeugtypenkombinationen. Als Einflussgrößen wurden nur der Güterverkehrsanteil und die Verkehrsführung berücksichtigt. Nach RESSEL (1994) stimmten die theoretisch ermittelten Kapazitäten, welche in Tabelle 3-4 dargestellt sind, gut mit den empirisch beobachteten Kapazitäten (im Stauabfluss) überein.

Güterverkehrsanteil	Maximale Verkehrsstärke im Arbeitsstellenengpass [Kfz/h]			
	0 %	10 %	20 %	30 %
einstreifige Richtungsfahrbahn				
VF 2+1	1.460	1.320	1.245	1.175
zweistreifige Richtungsfahrbahn				
VF 3+1	2.920	2.780	2.635	2.495
VF 4+0	2.830	2.670	2.520	2.380
VF 3+2	3.190	3.035	2.875	2.725
VF 5+0	2.880	2.725	2.565	2.410

Tab. 3-4: Kapazitätswerte für verschiedene Verkehrsführungsarten (jeweils baustellenzugewandte Seite) in Abhängigkeit vom Güterverkehrsanteil (nach RESSEL, 1994)

Die von RESSEL (1994) ermittelten Kapazitätswerte liegen in etwa im Bereich der bis dahin in anderen Untersuchungen beobachteten Werte. Auffällig ist jedoch, dass die Kapazitätswerte für 3+1-Verkehrsführungen im Gegensatz zu früheren Untersuchungen geringfügig größer sind als die Kapazitätswerte für 4+0-Verkehrsführungen.

SCHÖNBORN und SCHULTE (2012)

SCHÖNBORN und SCHULTE (2012) geben im Kommentar zu den RSA (BMV, 1995) Kapazitätswerte in Abhängigkeit vom SV-Anteil für zweistreifige Richtungsfahrbahnen an (vgl. Tabelle 3-5). Die Werte beruhen auf Beobachtungen des Verkehrsablaufs in einer einzelnen Arbeitsstelle der Autobahndirektion Nordbayern und sind dementsprechend nur eingeschränkt valide. Insbesondere ist der Einfluss des Lkw-Anteils auf die Kapazität im Vergleich zu anderen Untersuchungen extrem hoch.

Lkw-Anteil [%]	Maximale Verkehrsstärke [Kfz/h]
4	5.500
7	4.800
10	4.000
14	3.200
18	3.100

Tab. 3-5: Maximale Verkehrsstärken im Bereich von Arbeitsstellen bei zweistreifigen Richtungsfahrbahnen (nach SCHÖNBORN und SCHULTE, 2012)

STÖCKERT und KLOTZ (1999)

Ziel der Untersuchung von STÖCKERT und KLOTZ (1999) war die Entwicklung eines Verfahrens zur Bestimmung arbeitsstellenbedingter Zeitverluste an Arbeitsstellen kürzerer Dauer. Im Rahmen der Untersuchungen wurden dementsprechend auch Kapazitäten bestimmt. Die gewählten Kapazitäten resultieren zum Teil aus einer Literaturrecherche, wurden aber durch eigene Messungen ergänzt und verfeinert. Die Kapazitäten, welche aus den eigenen Messungen ermittelt wurden, stammen aus Anpassungen des VAN AERDE-Modells. Im Ergebnis werden, ähnlich wie im Verfahren nach den RBAP (BMV, 1996), Abminderungsfaktoren in Abhängigkeit von der Lage der Fahrstreifenreduktion und der Art der Verschwenkung der Fahrstreifen dargestellt (vgl. Tabelle 3-6). Die Grundleistungsfähigkeit wird mit 1.830 Pkw-E/h angenommen. Der Schwerverkehr und die Längsneigung werden bei der Umrechnung der Verkehrsnachfrage in Pkw-Einheiten berücksichtigt.

Auffallend ist der sehr hohe Reduktionsfaktor bei einer Verschwenkung von Fahrstreifen auf den Seitenstreifen. Dies wird unter anderem mit der mangelnden Akzeptanz der Nutzung des Seitenstreifens begründet, da die Seitenstreifennutzung zum Zeitpunkt der Analyse noch nicht sehr weit verbreitet war.

Parameter	Reduktionsfaktor
Fahrstreifenreduzierung rechts (langsame Fahrzeuge wechseln auf schnelleren Fahrstreifen)	0,90
Fahrstreifenreduzierung links (schnellere Fahrzeuge wechseln auf langsameren Fahrstreifen)	0,95
Verschwenkung von Fahrstreifen	0,95
Verschwenkung von Fahrstreifen auf den Seitenstreifen	0,50

Tab. 3-6: Korrekturfaktoren zur Berechnung der Kapazität eines Engpasses bei Tagesbaustellen bei einer Grundleistungsfähigkeit von 1.830 Pkw-E/h (nach STÖCKERT und KLOTZ, 1999)

BECKMANN und ZACKOR (2001)

BECKMANN und ZACKOR (2001), siehe auch OBER-SUNDERMEIER (2003), haben sehr umfangreiche Untersuchungen an Arbeitsstellen längerer und kürzerer Dauer durchgeführt. Ziel der Untersuchungen war die Entwicklung eines Verfahrens zur Stauprognose an Engpässen. Hierfür musste zunächst ein Verfahren zur Einschätzung von Kapazitäten für Engpässe festgelegt werden. Als Beispiel für gravierende Engpässe wurden im Rahmen der Untersuchungen hauptsächlich Arbeitsstellen betrachtet. Das Untersuchungskollektiv bestand aus 15 Arbeitsstellen längerer und 21 Arbeitsstellen kürzerer Dauer mit in der Regel ein bis zwei befahrbaren Fahrstreifen in der Arbeitsstelle. Als Kapazitätswerte wurden die Mittelwerte der Verkehrsstärken während der Staudauer betrachtet. Nach diesem Verfahren ergaben sich für Arbeitsstellen längerer Dauer Kapazitäten zwischen 1.070 und 1.718 Kfz/h/FS und für Arbeitsstellen kürzerer Dauer Werte zwischen 1.187 und 1.820 Kfz/h/FS.

Das entwickelte Verfahren zur Einschätzung von Kapazitätswerten an Arbeitsstellen lehnt sich stark an das Verfahren aus den RBAP (BMV, 1996) an, enthält aber eine erweiterte Anzahl an Reduktionsfaktoren und angepasste Wertebereiche. Die Grundkapazität von 1.830 Pkw-E/h/FS und das Verfahren der multiplikativen Abminderung bleiben erhalten. Die Einflüsse des Schwerverkehrs und der Längsneigung werden bei der Umrechnung der Verkehrsnachfrage in Pkw-Einheiten berücksichtigt. Die resultierende Tabelle, die auf den Ergebnissen der Untersuchung, aber auch auf Plausibilitätsüberlegungen und Vergleichen mit den Untersuchungen von RESSEL (1994) beruht, ist in Tabelle 3-7 dargestellt.

Grundkapazität 1.830 Pkw-E/h/Fahrstreifen		Reduktionsfaktor
Allgemein		
Fahrerkollektiv	Hoch belastete Stadtautobahn	1,05 - 1,10
	Überregionale Verbindungsstrecke	0,90 - 0,95
	Urlaubsverkehr	0,90
Widrige Umfeldbedingungen		0,85 - 0,95
Schwerverkehrsanteil + Längsneigung (E = Äquivalenzwert)		$\frac{1}{(1 - SVA + SVA \cdot E)}$
Reduktion eines benachbarten Fahrstreifens		0,95
Arbeitsstellen längerer Dauer		
Überleitung auf die Gegenfahrbahn		0,90 - 0,95
Geringere Fahrstreifenbreite		0,95
Arbeitsstellen kürzerer Dauer		
Verschwenkung von Fahrstreifen		0,90

Tab. 3-7: Faktoren für die Ermittlung der Kapazität von Arbeitsstellen nach OBER-SUNDERMEIER (2003)

NORKAUER (2004)

NORKAUER (2004) untersuchte den Verkehrsablauf an Arbeitsstellen kürzerer Dauer. Bei insgesamt 18 betrachteten Arbeitsstellen konnten in sieben Fällen Kapazitätswerte ermittelt werden, da es hier zu Verkehrszusammenbrüchen kam. In sechs Fällen handelte es sich um einstreifige Verkehrsführungen, bei denen Kapazitäten zwischen 1.500 und 1.820 Kfz/h ermittelt wurden. Im siebten Fall handelte es sich um eine zweistreifige Verkehrsführung mit Standstreifenmitbenutzung. Hier ergab sich eine Kapazität von 2.760 Kfz/h, wobei auf dem rechten Fahrstreifen 2.020 Kfz/h und auf dem Seitenstreifen lediglich 740 Kfz/h gemessen wurden.

BRILON et al. (2006)

In der Untersuchung von BRILON et al. (2006) wurde die Kapazität von Arbeitsstellen auf Bundesautobahnen in Hessen mit dem Verfahren der stochastischen Kapazitätsanalyse (vgl. Kapitel 2.3.2) ermittelt. Untersucht wurden sechs Arbeitsstellen im Zuge sechsstreifiger Autobahnen ohne Fahrstreifenreduktion. Da für alle untersuchten Messstellen die Kapazitätsverteilungen im Zeitraum mit und ohne Arbeitsstelle miteinander verglichen wurden, konnten direkte Aussagen über die Auswirkung der jeweiligen Arbeitsstellen getroffen werden. Im Ergebnis liegen die prozentualen Rückgänge der Kapazitäten bei Arbeitsstellen mit starker Verengung der Fahrbahn (z. B. 6s+0- oder 4+2-Verkehrsführung) zwischen 5 und 20 %, bei Arbeitsstellen mit geringer Querschnittseinschränkung (z. B. 3n+3-Verkehrsführung) wurden hingegen kaum Veränderungen der Kapazität festgestellt. Die Streuung der Kapazität ist in allen Fällen mit Arbeitsstelle geringer als im Vergleichsfall ohne Arbeitsstelle. Dies wird auf die Homogenisierung des Verkehrsflusses durch die Geschwindigkeitsbeschränkung in der Arbeitsstelle zurückgeführt.

Im Ergebnis der Untersuchung wurden für die modellbasierte Ermittlung der Kapazität Abminderungsfaktoren in Abhängigkeit von der Verkehrsführung und der Verengung der Fahrstreifen vorgeschlagen, die im Gegensatz zu dem Verfahren nach den RBAP (BMV, 1996) von der Kapazität ohne Arbeitsstelle ausgehen. Die Reduktionsfaktoren sind für verschiedene Arbeitsstellencharakteristika und Typen nach den RSA (BMV, 1995) in Tabelle 3-8 dargestellt.

Charakteristik der Verkehrsführung im Bereich der Arbeitsstelle in der betrachteten Fahrtrichtung	Mögliche Typen nach RSA (BMV, 1995)	ΔC
dreistreifig, stark verengt, mit Überleitung	6s+0, 5s+1	- 15 %
dreistreifig, stark verengt, ohne Überleitung	6s+0, 5s+0, 5s+1	- 10 %
dreistreifig, verengt, mit Überleitung	5s+1, 4+2	- 10 %
dreistreifig, verengt, ohne Überleitung	5s+0, 5s+1, 4+2, 3n+3	- 5 %
zweistreifig, stark verengt, mit Überleitung	5s+0, 4+0, 4s+2	- 15 %
zweistreifig, stark verengt, ohne Überleitung	4+0, 4s+0	- 10 %
zweistreifig, verengt, mit Überleitung	5s+0, 3s+1	- 10 %
zweistreifig, verengt, ohne Überleitung	3n+2s, 3n+2, 3s+0, 3s+1, 2n+2s, 2n+2	- 5 %
einstreifig, mit oder ohne Überleitung	3n+1, 3s+0, 2+0, 2n+1	- 10 %

Tab. 3-8: Abminderung der Kapazität nach BRILON et al. (2006) für Verkehrsführungen im Bereich von Arbeitsstellen ohne Fahrstreifenreduktion

SÜMMERMANN (2012); KEMPER et al. (2018)

KEMPER et al. (2018) untersuchten mit einem umfassenden Datenkollektiv die Verkehrssicherheit und den Verkehrsablauf in Arbeitsstellen längerer Dauer. Die Untersuchungen sind sehr aktuell, sodass von ähnlichen Randbedingungen hinsichtlich der Verkehrszusammensetzung und des Verhaltens der Verkehrsteilnehmer wie im vorliegenden Forschungsprojekt ausgegangen werden kann. SÜMMERMANN (2012) führte ergänzende Verkehrsablaufuntersuchungen mit Kapazitätsbetrachtungen durch. Die dabei verwendeten Methoden zur Kapazitätsermittlung stimmen weitestgehend mit den in der vorliegenden Untersuchung verwendeten Methoden nach BRILON und GEISTEFELDT (2010) überein.

SÜMMERMANN (2012) untersuchte für 3+1- und 4+0-Verkehrsführungen Kapazitäten, Geschwindigkeiten, Fahrstreifenaufteilungen und das Fahrstreifenwechselverhalten sowohl im Arbeitsstellenzulauf als auch im Innenbereich. Hinsichtlich der gefahrenen Geschwindigkeiten und der Fahrstreifennutzung bestätigten sich weitgehend die Ergebnisse früherer

Untersuchungen von SCHMUCK und BECKER (1984), KOCKELKE und ROSSBANDER (1988) sowie FISCHER und Brannolte (2006). Wichtigste Aussagen hierbei waren:

- Geschwindigkeitsbeschränkungen auf 60 km/h werden deutlich häufiger und deutlich stärker überschritten als Beschränkungen auf 80 km/h. Die mittlere Geschwindigkeit bei $v_{zul} = 60$ km/h ist um ca. 10 km/h geringer als bei $v_{zul} = 80$ km/h.
- Mit zunehmender Breite des Überholfahrstreifens nehmen die gefahrenen Geschwindigkeiten zu.
- Bei der Arbeitsstellendurchfahrt ist eine deutliche Tendenz der Fahrzeuge zur Nutzung des rechten Fahrstreifens auszumachen. Dieses Verhalten verstärkt sich mit zunehmender Arbeitsstellenlänge.
- Im Zulauf und in der Überleitung wird der Überholfahrstreifen deutlich besser genutzt.

Hinsichtlich des Fahrstreifenwechselerhaltens im Arbeitsstellenzulauf wurden Arbeitsstellen mit und ohne Überleitung auf die Gegenfahrbahn, jedoch keine Arbeitsstellen mit Fahrbahnteilungen untersucht. Auswirkungen des Vorhandenseins einer Überleitung auf das Fahrstreifenwechselerhalten wurden nicht festgestellt.

Im Rahmen der Kapazitätsanalyse ermittelte SÜMMERMANN (2012) zum Teil deutlich höhere Kapazitäten als in früheren Untersuchungen. Bei einem geringen SV-Anteil von weniger als 10 % und zwei Fahrstreifen je Fahrtrichtung wurden je nach Verkehrsführung und Fahrstreifenbreite Kapazitäten zwischen 3.000 und 3.700 Kfz/h bestimmt. Bei einem SV-Anteil von über 20 % reduzieren sich die Werte auf 2.500 bis 3.250 Kfz/h. Als maßgebende Einflussgrößen auf die Kapazität identifizierte SÜMMERMANN (2012) den Schwerverkehr und die Längsneigung. Beide Parameter haben demnach in Arbeitsstellen einen deutlich höheren Einfluss als auf der freien Strecke. Schon geringe Steigungen ($s < 2$ %) in Kombination mit einem hohen SV-Anteil führten zu einer deutlichen Reduktion der Kapazität, was insbesondere bei sehr schmalen Überholfahrstreifen auf Behinderungen bei Überholvorgängen zurückzuführen war. Der Einfluss der Geschwindigkeitsbeschränkung auf die Kapazität ist hingegen gering. Weiterhin stellte SÜMMERMANN (2012) fest, dass Arbeitsstellen mit 3+1-Verkehrsführung, insbesondere bei SV-Anteilen über 15 %, um bis zu 12 % höhere Kapazitäten aufweisen als Arbeitsstellen mit 4+0-Verkehrsführung. Begründet wird dies in erster Linie mit den deutlich höheren Fahrstreifenbreiten, insbesondere in der baulich getrennten Fahrtrichtung.

DINER (2011)

Während über den Einfluss einer Arbeitsstelle längerer Dauer auf den Verkehrsablauf bereits umfassende Analysen und Erkenntnisse vorliegen, können keine Aussagen darüber getroffen werden, ob bzw. in welcher Form diese auch auf eine Folge von Arbeitsstellen übertragbar sind. Aus ersten Analysen von DINER (2011) geht hervor, dass die Parameter der einzelnen Arbeitsstellen, wie z. B. die geringe Behelfsfahrstreifenbreite, hohe Verkehrsbelastung oder die Arbeitsstellenausstattung, deutlich stärkere Auswirkungen auf die Fahrweise der Verkehrsteilnehmer haben als die Arbeitsstellenfolge selbst. Im Rahmen der Analyse der Bauabschnitte und der Beruhigungsstrecken des sechsstreifigen Ausbaus der Autobahn A 1 zwischen Hamburg und Bremen konnten keine Abhängigkeiten des Geschwindigkeitsverhaltens der Verkehrsteilnehmer, der verkehrsstärkeabhängigen Fahrstreifenauslastung oder der Missachtung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit in den Untersuchungsstrecken von der Arbeitsstellenfolge ausgemacht werden.

Zusammenfassung

Wie die zuvor beschriebenen Untersuchungen gezeigt haben, ist die Analyse des Verkehrsablaufs in Arbeitsstellen von einer Vielzahl von Faktoren abhängig. Die Untersuchungen unterscheiden sich vor allem in der Größe des Untersuchungskollektivs, den betrachteten Verkehrsführungen und den berücksichtigten Einflussgrößen. Zudem wurde der Begriff der Leistungsfähigkeit bzw. Kapazität unterschiedlich aufgefasst. Es wurden maximale Verkehrsstärken, mittlere Verkehrsstärken, Verkehrsstärken vor und nach dem Zusammenbruch und stochastische Analysen zur Bestimmung der Kapazität angeführt. Weiterhin war die Methodik der Kapazitätsermittlung in vielen Untersuchungen gar nicht oder nur bedingt ersichtlich. Dies erschwert einen Vergleich der Kapazitäten. Eine Übersicht über die verschiedenen Kapazitätsangaben ist in Tabelle 3-9 dargestellt.

Hinsichtlich des Geschwindigkeitsverhaltens und der Fahrstreifenaufteilung in Arbeitsstellen stimmen die analysierten Untersuchungen weitgehend überein. Die Belastung des Überholfahrstreifens nimmt mit abnehmender Breite innerhalb der Arbeitsstelle ab. Im Zulauf zur Arbeitsstelle ist die Fahrstreifenbelastung ausgeglichener. Geschwindigkeitsbeschränkungen werden in der Regel von einem Großteil der Verkehrsteilnehmer nicht eingehalten. Der Anteil an Geschwindigkeitsüberschreitungen nimmt mit abnehmenden zulässigen Höchstgeschwindigkeiten zu. Am ehesten werden zulässige Höchstgeschwindigkeiten im Bereich von Überleitungen eingehalten.

Literaturquelle	Grenzwerte in Kfz/h			Bemerkungen zu Auswertemethodik und Untersuchungskollektiv
	einstreifig	zweistreifig	dreistreifig	
Arbeitsstellen längerer Dauer				
HOFFMANN et al. (1981)		3.000-4.000		Werte aus q-v-Diagramm geschätzt; VF 3+1
SCHMUCK, BECKER (1984)		2.000-2.900		Werte aus Trendextrapolationen; VF 3+1 und 4+0
WEINSPACH (1988)		2.700		keine Angabe zur Methodik
RESSEL (1994)	1.175-1.460	2.380-3.190		berechnete Kapazitätswerte aus gemessenen Bruttozeitlücken; abhängig von Verkehrsführung und SV-Anteil
BMV (1995), RSA	1.500	3.000		durchschnittlicher Lkw-Anteil, geringe Längsneigung
SCHÖNBORN, SCHULTE (2012)		3.100-5.500		maximale Verkehrsstärken; abhängig vom SV-Anteil
BMV (1996), RBAP	1.400-1.830			aus Abminderungsfaktoren in Pkw-E/h/FS, differenziert nach Verkehrsführung und Ortskundigkeit
OBER-SUNDERMEIER (2003)	1.070-1.484	2.316-3.436	4.618	mittlere Verkehrsstärken im Stau; abhängig von VF, SV-Anteil, Längsneigung und Fahrerkollektiv
BRILON et al. (2006)			5.950-6.350	Medianwerte aus stochastischer Kapazitätsanalyse, ohne Fahrstreifenreduktion
SÜMMERMANN (2012)		2.500-3.700		Werte nach VAN AERDE-Modell, differenziert nach SV-Anteil, Verkehrsführung und Längsneigung
Arbeitsstellen kürzerer Dauer				
STÖCKERT, KLOTZ (1999)	870-1.830			aus Abminderungsfaktoren; abhängig von FS-Reduktion und Verschwenkung
OBER-SUNDERMEIER (2003)	1.187-1.820	2.692-3.606		mittlere Verkehrsstärken im Stau, VF 2n+1 bzw. 3n+2
NORKAUER (2004)	1.500-1.820	2.760		zweistreifig mit Seitenstreifenmitbenutzung

Tab. 3-9: Zusammenstellung von Kapazitätswerten für Arbeitsstellen aus verschiedenen deutschen Literaturquellen

3.4.2 Internationale Untersuchungen

Schweiz

RUTISHAUSER et al. (1994) untersuchten die Leistungsfähigkeit einer Arbeitsstelle bei einer Reduktion von zwei auf einen Fahrstreifen auf der schweizerischen Nationalstraße N2. Ziel der Arbeit war eine Optimierung der Anordnung einer Fahrstreifenreduktion, sodass eine möglichst hohe Kapazität und Verkehrssicherheit erreicht wird. Im Rahmen der Untersuchungen wurden Kapazitäten von etwa 1.600 Kfz/h mithilfe des Fundamentaldiagramms geschätzt.

SPACEK et al. (2005) untersuchten für Arbeitsstellen auf Schweizer Autobahnen verkehrstechnische Maßnahmen zur Verbesserung der Sicherheit und des Verkehrsflusses. Da der Schwerpunkt der Untersuchungen auf der Verkehrssicherheit und auf Schwachlastzeiten liegt, wurden keine Kapazitäten ermittelt. Wie in zahlreichen vorausgegangenen Untersuchungen wurden bei der Betrachtung der gefahrenen Geschwindigkeiten im Zulauf und in den Arbeitsstellen erhebliche Geschwindigkeitsüberschreitungen festgestellt.

Niederlande

Die vierte Version des niederländischen Handbuchs für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (RIJKSWATERSTAAT, 2015) enthält umfangreiche Arbeitsstellenkapazitäten für verschiedene Verkehrsführungen in Arbeitsstellen längerer und kürzerer Dauer. Im Mittel sind die Arbeitsstellenkapazitäten etwa 23 % geringer als die Kapazitäten der freien Strecke. HEIKOOP und HENKENS (2016) weisen zudem darauf hin, dass die Streuung der Kapazitäten bei Arbeitsstellen in der Regel deutlich höher ist als auf der freien Strecke. Dies wird auf die höhere Anzahl möglicher beeinflussender Faktoren, welche nur schwer quantifiziert werden können (z. B. die Arbeitsintensität in der Arbeitsstelle), zurückgeführt. Arbeitsstellen mit Fahrbahnteilung haben hierbei auffallend niedrigere Kapazitäten als Arbeitsstellen ohne Fahrbahnteilung. In den niederländischen Richtlinien wird die Kapazität einer Arbeitsstelle grundsätzlich als die mittlere abfließende Verkehrsstärke im Stau aufgefasst.

Großbritannien

MATHEWS (1984) ermittelte für Arbeitsstellen mit ein- und zweistreifigen Richtungsfahrbahnen bei mittleren SV-Anteilen zwischen 15 und 20 % Kapazitäten zwischen 1.720 und 1.900 Pkw-E/h/FS.

YOUSIF (2002) führte für zwei Arbeitsstellen im Nordwesten von England Untersuchungen zu Verkehrsablauf und Verkehrssicherheit durch. Dazu wurden drei- bis vierstündige Videomessungen je Arbeitsstelle durchgeführt. In einer Arbeitsstelle lag eine Fahrstreifenreduktion vor, in der anderen eine Überleitung auf die Gegenfahrbahn. Überlastungen konnten nur in der Arbeitsstelle mit Überleitung gemessen werden. Im Rahmen der Analysen ergaben sich für diese Arbeitsstelle Verkehrsstärken im fließenden Verkehr von bis zu 2.250 Pkw-E/h/FS, wobei ein Lkw in zwei Pkw umgerechnet wurde. Im Rahmen der Untersuchungen des Geschwindigkeitsverhaltens stellte YOUSIF (2002) fest, dass sich nur 23 % der Fahrzeuge auf dem Hauptfahrstreifen und 11 % der Fahrzeuge auf dem Überholfahrstreifen an die Geschwindigkeitsbeschränkung von 50 mph halten. Diese Ergebnisse stimmen tendenziell mit deutschen Untersuchungen überein.

USA

Der Verkehrsablauf auf Autobahnen in den USA ist nur bedingt mit dem deutschen Verkehrsablauf vergleichbar (vgl. z. B. HALL und BRILON, 1994). Zudem treten auch innerhalb der USA je nach Art und Beschaffenheit der Autobahnen erhebliche Unterschiede in den Kapazitäten von Arbeitsstellen auf. Auch hinsichtlich der Praxis bei der Einrichtung von Arbeitsstellen unterscheiden sich die USA von Deutschland. So wird in den USA im Bereich von Arbeitsstellen auf Autobahnen in der Regel immer die Fahrstreifenanzahl reduziert. Eine Abminderung der Fahrstreifenbreite unter Beibehaltung aller Fahrstreifen, wie sie in Deutschland gewollt und zumeist auch praktiziert wird, ist in den USA hingegen unüblich. Dies führt dazu, dass der Einfluss der Reduktion von Fahrstreifen in den USA häufig die maßgebende Größe bei der Ermittlung der Kapazität von Arbeitsstellen darstellt.

Im Folgenden wird vor allem auf die Kapazitätsermittlung von Arbeitsstellen im Highway Capacity Manual (HCM; TRB, 2010) eingegangen. Zusätzlich werden vier Untersuchungen aus den USA näher vorgestellt. Die Ergebnisse verschiedener weiterer Kapazitätsuntersuchungen werden zudem zusammenfassend in Tabelle 3-10 dargestellt.

Das HCM (TRB, 2010) unterscheidet bei der Bestimmung der Kapazität zunächst grundsätzlich zwischen Arbeitsstellen kürzerer und längerer Dauer. Für Arbeitsstellen kürzerer Dauer wird von einem Grundwert von 1.600 Pkw-E/h/FS ausgegangen. Dieser Grundwert kann durch verschiedene Einflussfaktoren nach Gleichung (3-16) abgemindert werden. Berücksichtigt werden hierbei die Arbeitsintensität, der SV-Anteil und vorhandene Einfahrten im Arbeitsstellenbereich.

$$c_a = [(1.600 + I) \cdot f_{HV} \cdot N] - R \quad (3-16)$$

mit:

c_a	=	angepasster Kapazitätswert	[Pkw-E/h]
I	=	Parameter für die Arbeitsintensität in der Arbeitsstelle	[Pkw-E/h/FS]
f_{HV}	=	Schwerverkehrsfaktor	[-]
N	=	Anzahl der Fahrstreifen in der Arbeitsstelle	[-]
R	=	Parameter für Einfahrten im Arbeitsstellenbereich	[Pkw-E/h]

Für Arbeitsstellen längerer Dauer wurden im HCM 2000 (TRB, 2000) in Abhängigkeit von der Anzahl der zur Verfügung stehenden Fahrstreifen nach einer Fahrstreifenreduktion Kapazitätswerte zwischen 1.550 und 1.860 Pkw-E/h/FS angegeben. Im HCM 2010 (TRB, 2010) finden sich deutlich ausführlichere Kapazitätsangaben. Hierbei handelt es sich um Erfahrungswerte aus 13 verschiedenen Bundesstaaten, differenziert nach der Art der Fahrstreifenreduktion. Gemittelt über alle Staaten ergeben sich Kapazitätswerte zwischen 1.350 und 1.500 Pkw-E/h/FS. Die mittleren Kapazitäten haben sich demnach in neueren Untersuchungen deutlich reduziert. Die Einzelwerte schwanken zwischen 950 und 1.900 Pkw-E/h/FS. Aufgrund der hohen Bandbreite dieser Werte wird jedoch empfohlen, die Kapazität anhand lokaler Daten und Erfahrungen zu schätzen.

JIANG (1999) untersuchte den Verkehrsablauf in Arbeitsstellen auf Highways mit zweistreifigen Richtungsfahrbahnen im US-Bundesstaat Indiana. Hierbei wurden die Kapazitäten von je zwei Arbeitsstellen mit 3+0- und 2+1-Verkehrsführung betrachtet. Als Kapazität wurde die Verkehrsstärke vor einem Geschwindigkeitsrückgang, also die Verkehrsstärke vor dem Zusammenbruch, festgelegt. Für die beiden Arbeitsstellen ohne Überleitung auf die Gegenfahrbahn wurden Kapazitäten von 1.521 bzw. 1.537 Pkw-E/h ermittelt. Für die Ar-

beitsstellen mit Überleitung wurden deutlich höhere Kapazitäten von im Mittel 1.688 Pkw-E/h bestimmt. Dies widerspricht anderen Untersuchungen, in denen in der Regel von geringeren Kapazitäten bei einer Überleitung auf die Gegenfahrbahn ausgegangen wird, und wird hauptsächlich mit der Arbeitsintensität in den Arbeitsstellen begründet. Während der Verkehr in den Arbeitsstellen ohne Überleitung direkt am Baustellenbereich vorbeigeführt wird, ist der übergeleitete Verkehr aufgrund der Entfernung weitestgehend unbeeinflusst von den Baustellenaktivitäten. Weitere Einflussfaktoren werden nicht näher betrachtet.

KIM et al. (2001) beobachteten den Verkehrsablauf an zwölf Arbeitsstellen auf Strecken mit vierstreifigen Richtungsfahrbahnen in den USA unter Berücksichtigung der Verkehrsführung. Hierbei wurden ausschließlich Arbeitsstellen mit Fahrstreifenreduktion betrachtet. Aus den vorliegenden Daten wurde mittels multipler Regressionsanalyse ein Modell zur Berechnung der Kapazität einer Arbeitsstelle entwickelt, in dem die Lage der gesperrten Fahrstreifen (rechts oder links), der SV-Anteil, der seitliche Abstand zu den befahrbaren Fahrstreifen, die Länge der Arbeitsstelle, die Intensität der Arbeiten und die Längsneigung berücksichtigt werden. Die Gleichung zur Ermittlung der Kapazität ist im Folgenden dargestellt.

$$C = 1.857 - 168,1 \cdot \text{NUMCL} - 37,0 \cdot \text{LOCCL} - 9,0 \cdot \text{HV} + 92,7 \cdot \text{LD} - 34,3 \cdot \text{WL} - 106,1 \cdot \text{WI}_H - 2,3 \cdot \text{WG} \cdot \text{HV} \quad (3-17)$$

mit:

C = Kapazität [Pkw-E/h/FS]

NUMCL = Anzahl der gesperrten Fahrstreifen

LOCCL = Lage der gesperrten Fahrstreifen (rechts oder links)

HV = SV-Anteil

LD = Abstand der befahrenen zu den gesperrten Fahrstreifen

WL = Länge der Arbeitsstellen

WI_H = Arbeitsintensität

WG = Arbeitsstellenart

Im Vergleich mit anderen Modellen zur Kapazitätsermittlung (z. B. ABRAMS und WANG, 1981; KRAMMES und LOPEZ, 1994), einschließlich des Modells aus dem damaligen HCM (TRB, 2000), ergaben sich mit dem neu entwickelten Modell genauere Ergebnisse.

Zur Weiterentwicklung des HCM (TRB, 2010) haben YEOM et al. (2015) weitere Modelle zur Neubildung der Kapazität an Arbeitsstellen untersucht. Ziel der Untersuchungen war eine umfangreiche Betrachtung der Kapazität von Arbeitsstellen auf amerikanischen Highways, die für alle Bundesstaaten gültig sein sollte. Hierzu wurden zum einen Daten aus Literaturanalysen und zum anderen empirische Daten aus selbst durchgeführten Messungen aus den gesamten USA herangezogen und miteinander fusioniert. Bei der Fusionierung wurden sowohl unterschiedliche Vorgehensweisen bei der Ermittlung der Kapazität und unterschiedliche Kapazitätsdefinitionen als auch Variationen in den untersuchten Randbedingungen berücksichtigt. Anhand dieser Datengrundlage wurden sechs verschiedene Modelle hinsichtlich ihrer Eignung zur Beschreibung der Kapazität ermittelt, wobei die Kapazität als maximale Verkehrsstärke im Stau (Stauabfluss) definiert wurde. Für das gewählte Modell wurden 75 % der Daten zur Kalibrierung und 25 % zur Validierung herangezogen. Als Modellvariablen wurden die Art der Fahrstreifenreduktion, die Art der Begren-

zung (Kegel/Bake oder Beton), die Lage innerhalb oder außerhalb von Ballungsräumen, der seitliche Abstand zur Arbeitsstelle und die Tageszeit (Tag- oder Nachtbaustelle) verwendet. Alle anderen Einflussgrößen wurden anhand einer Sensitivitätsanalyse als nicht maßgebend eingestuft. Die entwickelte Gleichung zur Ermittlung der Kapazität lautet:

$$\text{Average QDR} = 2.093 - 154 \cdot f_{\text{LCSI}} - 194 \cdot f_{\text{barrier}} - 179 \cdot f_{\text{area}} + 9 \cdot f_{\text{lateral_12}} - 59 \cdot f_{\text{day_night}} \quad (3-18)$$

mit:

Average QDR = durchschnittlicher Stauabfluss [Pkw-E/h/FS]

f_{LCSI} = Faktor zur Berücksichtigung des Verhältnisses zwischen offenen und insgesamt vorhandenen Fahrstreifen

f_{barrier} = Art der Abgrenzung zum Arbeitsraum

f_{area} = Lage der Arbeitsstelle in ländlichen oder städtischen Räumen

$f_{\text{lateral_12}}$ = Abstand der befahrenen Fahrstreifen zum Arbeitsstellenbereich

$f_{\text{day_night}}$ = Durchführung der Arbeitsstellen am Tag oder in der Nacht

LOCHRANE et al. (2014, 2015) untersuchten das Fahrverhalten innerhalb von Arbeitsstellen im Vergleich zur freien Strecke im fließenden und gestauten Verkehr mit dem Ziel, Fahrverhaltensparameter ähnlich dem Modell nach WIEDEMANN (1974) für die mikroskopische Verkehrsflusssimulation abzuleiten. Hierfür wurde eine umfangreiche Feldstudie mit Testfahrten und Befragungen der Testfahrer durchgeführt. Bisherige Fahrzeugfolgemodelle sehen in der Regel nur ein Fahrverhalten für alle Verkehrssituationen vor. In der Untersuchung wird hingegen nachgewiesen, dass für alle vier analysierten Fälle (freie Strecke und fließender Verkehr, freie Strecke und gestauter Verkehr, Arbeitsstelle und fließender Verkehr, Arbeitsstelle und gestauter Verkehr) unterschiedliches Folgeverhalten beobachtet werden kann. Hierauf aufbauend werden kalibrierte Parameter des Fahrzeugfolgmodells für alle vier Kategorien angegeben.

Zusammenfassung

In Tabelle 3-10 sind die Kapazitätsangaben aus verschiedenen internationalen Quellen zusammengefasst. Die OECD (1990) gibt in ihrer Veröffentlichung zur Verkehrsführung und Verkehrssicherheit im Bereich von Arbeitsstellen eine Reihe von Kapazitätswerten für verschiedene Mitgliedsstaaten an. Die Herkunft der Werte wird nicht weiter erläutert. Der Vollständigkeit halber werden die angegebenen Daten ebenfalls in Tabelle 3-10 dargestellt.

Literaturquelle	Grenzwerte in Kfz/h		Bemerkungen zu Auswertemethodik und Untersuchungskollektiv
	einstreifig	zweistreifig	
Arbeitsstellen längerer Dauer			
MATHEWS (1984, GB)	1.720-1.900		Werte in Pkw-E/h/FS; SV-Anteil von 15-20 %
OECD (1990)	1.540-1.650		VF 2+0 bei SV 15 % (GB)
	1.540		VF 2+1 bei SV 15 % (GB)
		3.280	VF 3+2 bei SV 15 % (GB)
		2.980	VF 5+0 bei SV 15 % (GB)
	1.340		VF 2+1 (USA)
		2.980	VF 3+2 (USA)
	1.100		VF 2+1 (D und CH)
		2.400	VF 3+2 (D und CH)
	2.650	VF 5+0 (D und CH)	
RUTISHAUSER et al. (1994, CH)	1.600		Schätzung aus Fundamentaldiagramm
JIANG (1999, USA)	1.521-1.688		Werte in Pkw-E/h; VF 3+0 und 2+1
TRB (2000, USA), HCM	1.550-1.860		
MAZE et al. (2000, USA)	1.400-1.600		
AL-KAISY und HALL (2001, USA)	1.853-2.252		
YOUSIF (2002, GB)	2.250		Werte in Pkw-E/h/FS; 1 Lkw entspricht 2 Pkw
HCM (2010, USA)	1.350-1.500		gemittelte Werte aus einer Reihe von Untersuchungen aus verschiedenen US-Staaten
YEOM et al. (2015, USA)	1.145-2.139		Werte in Pkw-E/h/FS
Arbeitsstellen kürzerer Dauer			
KRAMMES und LOPEZ (1994, USA)	1.600		
SARASUA et al. (2004, USA)	1.460		
TRB (2010, USA), HCM	1.600		Grundkapazität; Abminderung nach Gleichung (3-16)

Tab. 3-10: Zusammenstellung von Kapazitätswerten für Arbeitsstellen aus verschiedenen internationalen Literaturquellen

4 Theoretische Grundlagen und Kenntnisstand zur Verkehrssicherheit in Arbeitsstellen auf Autobahnen

4.1 Bewertung der Verkehrssicherheit

Die Grundlagen für die Sicherheitsbewertung von Straßenverkehrsanlagen sind Unfallkenngrößen. Diese werden zur Beschreibung, Analyse und Bewertung der Verkehrssicherheit von Straßenverkehrsanlagen benötigt. Dabei sind sogenannte Basiswerte, Anteilswerte und Verhältniswerte zu unterscheiden (vgl. BARK et al., 2008).

Die Basiswerte beschreiben sowohl das Unfallgeschehen als auch infrastrukturelle und verkehrliche Bedingungen. Basiswerte zum Unfallgeschehen sind beispielsweise die Anzahl der Unfälle, differenziert nach Kategorie, Typ, Ortslage usw., die Anzahl der Beteiligten und Verunglückten differenziert nach Alter, Art der Verkehrsbeteiligung usw., sowie die Unfallkosten. Auf die Infrastruktur und den Verkehr bezogene Basiswerte sind z. B. die Länge der betrachteten Strecke – bzw. hier der betrachteten Arbeitsstelle – oder die Verkehrsstärke (in der Regel der DTV).

Mit Anteilswerten, die sich aus dem Verhältnis einer Teilmenge zur Gesamtmenge eines Basiswerts ergeben, wird die Charakteristik und die Struktur des Unfallgeschehens analysiert. Anteilswerte sind beispielsweise der Anteil eines bestimmten Unfalltyps an allen Unfalltypen oder der Anteil der Unfälle mit schwerem Personenschaden (Kategorien 1+2) an allen Unfällen mit Personenschaden (Kategorien 1-3). Die Verteilung der Unfalltypen beschreibt die Unfallcharakteristik, die Verteilung der Kategorien die Unfallstruktur.

Mit Verhältniswerten wird das Unfallgeschehen bewertet, indem ein Basiswert des Unfallgeschehens zu einem anderen Basiswert des Unfallgeschehens oder zu einem infrastrukturellen bzw. verkehrlichen Basiswert ins Verhältnis gesetzt wird. Solche Verhältniswerte sind z. B. die jeweiligen Anzahlen der Getöteten, Schwer- und Leichtverletzten pro 100 Unfälle mit schwerem Personenschaden, welche die Verunglücktenstruktur beschreiben. Weitere Verhältniswerte sind die Kosten pro Unfall, z. B. auch die Unfallkostensätze, oder auch Unfalldichten und Unfallkostendichten sowie Unfallraten und Unfallkostenraten, die nachfolgend erläutert werden.

4.1.1 Unfallkenngrößen

Unfalldichten und -kostendichten werden im Allgemeinen aus dem Unfallgeschehen ganzer Kalenderjahre ermittelt. Da Arbeitsstellen längerer Dauer nur wenige Tage bis einige Wochen bzw. Monate dauern und Arbeitsstellen kürzerer Dauer sogar nur wenige Stunden, sind die Berechnungen auf diese Betrachtungszeiträume anzupassen.

Die nachfolgend auf einzelne Arbeitsstellen bezogenen Kenngrößen beziehen sich bei Arbeitsstellen längerer Dauer immer auf eine Arbeitsstelle mit gleichbleibender Verkehrsführung. Bei Änderung der Verkehrsführungen, z. B. von 4+0 auf 2+2 oder der Umlegung des Verkehrs auf die Gegenrichtung, also von 4+0 auf 0+4, werden von den Ländern diese in der Regel als gesonderte Arbeitsstellen betrachtet und dementsprechend gemeldet. Bei

Arbeitsstellen kürzerer Dauer beziehen sich die Kenngrößen ebenfalls auf nur eine gleichbleibende Verkehrsführung.

Die Unfalldichte ist ein Maß für die Häufigkeit der während des betrachteten Zeitraums in einer Arbeitsstelle geschehenen Unfälle je km Strecke, bezogen (d. h. hochgerechnet) auf ein Jahr. Sie berücksichtigt lediglich die Anzahl der Unfälle, unabhängig von deren Schwere.

Unfallraten und Unfallkostenraten werden im Allgemeinen, wie die Unfalldichten und -kostendichten, aus dem Unfallgeschehen ganzer Kalenderjahre ermittelt. Deshalb sind bei Arbeitsstellen längerer Dauer auch hier die Berechnungen auf deren Betrachtungszeitraume anzupassen.

Die Unfallrate beschreibt die durchschnittliche Anzahl der Unfälle, die bezogen auf eine Fahrleistung von 1 Mio. Kfz · km in einer Arbeitsstelle während des jeweiligen Betrachtungszeitraums entfallen. Die Unfallkostenrate beziffert die durchschnittlichen volkswirtschaftlichen Kosten durch Unfälle in einer Arbeitsstelle, bezogen auf 1.000 Kfz · km. Sie sind somit ein Maß für das fahrleistungsbezogene Risiko, in einen Unfall verwickelt zu werden oder dabei zu verunglücken.

Da die ausschließlich häufigkeitsbezogenen Unfall- und Unfallkostendichten nicht die Fahrleistung berücksichtigen, werden im Weiteren ausschließlich Unfallraten und Unfallkostenraten als Kenngrößen betrachtet.

Arbeitsstellen längerer Dauer

Die Unfallrate $UR_{A,i}$ einzelner Arbeitsstellen wurde in bisherigen Untersuchungen zum Unfallgeschehen in Arbeitsstellen längerer Dauer, beispielsweise von EMDE und HAMESTER (1983) und von FISCHER und BRANNOLTE (2006), wie folgt berechnet:

$$UR_{A,i} = \frac{10^6 \cdot n_{U,A,i}}{DTV_{A,i} \cdot L_{A,i} \cdot t_{A,i}} \quad (4-1)$$

mit:

$$UR_{A,i} = \text{Unfallrate der Arbeitsstelle } i \quad [U/(10^6 \text{ Kfz} \cdot \text{km})]$$

$$n_{U,A,i} = \text{Anzahl der Unfälle in der Arbeitsstelle } i \text{ im Betrachtungszeitraum } t_{A,i} \quad [U]$$

$$DTV_{A,i} = \text{durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke in der Arbeitsstelle } i \text{ im Kalenderjahr der Arbeitsstelleneinrichtung} \quad [\text{Kfz}/d]$$

$$L_{A,i} = \text{Länge der Arbeitsstelle } i \quad [\text{km}]$$

$$t_{A,i} = \text{Betrachtungszeitraum (Dauer der Arbeitsstelle)} \quad [d]$$

Analog hierzu wurde die Unfallkostenrate $UKR_{A,i}$ bisher, z. B. auch von FISCHER und BRANNOLTE (2006), wie folgt berechnet:

$$UKR_{A,i} = \frac{1.000 \cdot UK_{A,i}}{DTV_{A,i} \cdot L_{A,i} \cdot t_{A,i}} \quad (4-2)$$

mit:

$$UKR_{A,i} = \text{Unfallkostenrate der Arbeitsstelle } i \quad [€/(1.000 \text{ Kfz} \cdot \text{km})]$$

$$UK_{A,i} = \text{Unfallkosten der Arbeitsstelle } i \text{ im Betrachtungszeitraum } t_{A,i} \quad [€]$$

$$DTV_{A,i} = \text{durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke in der Arbeitsstelle } i \text{ im Kalenderjahr der Arbeitsstelleneinrichtung} \quad [\text{Kfz}/d]$$

$L_{A,i}$ = Länge der Arbeitsstelle i [km]

$t_{A,i}$ = Betrachtungszeitraum (Dauer der Arbeitsstelle) in Tagen [d]

Durch den Bezug auf die Fahrleistung, die sich aus dem $DTV_{A,i}$ eines Jahres und der Dauer der Arbeitsstelle (in Tagen) ergibt, werden bei den so berechneten $UR_{A,i}$ und $UKR_{A,i}$ jahreszeitliche Schwankungen im Verkehrsaufkommen nicht berücksichtigt. Dies erscheint für den Vergleich verschiedener Arbeitsstellen nicht ausreichend, da die tatsächliche Verkehrsbelastung und damit die tatsächliche Fahrleistung im Betrachtungszeitraum (Einrichtungsdauer der Arbeitsstelle) unberücksichtigt bleiben.

Zur Berücksichtigung der tatsächlichen Verkehrsbelastungen und Fahrleistungen wird deshalb der Jahresganglinientyp des Kfz-Verkehrs (Bild 4-1) für den Autobahnabschnitt, in dem die betrachtete Arbeitsstelle liegt, sowie die jahreszeitliche Lage der Arbeitsstelle (Bild 4-2) einbezogen. Hierzu wird aus dem tagesgenauen Beginn und der Dauer (in Tagen) der Arbeitsstelle und dem zugeordneten Jahresganglinientyp sowie den betroffenen Anteilswerten des Wochenverkehrs am Kfz-Jahresverkehr der Faktor $f_{KW,A,i}$ berechnet:

$$f_{KW,A,i} = \frac{\frac{n_{t,KW,k}}{7} \cdot p_{KW,k} + \sum_{j=k+1}^{m-1} p_{KW,j} + \frac{n_{t,KW,m}}{7} \cdot p_{KW,m}}{100} \quad (4-3)$$

mit:

$f_{KW,A,i}$ = Faktor zur Berücksichtigung der Anteilswerte des Wochenverkehrs am Kfz-Jahresverkehr in der Arbeitsstelle i [-]

$n_{t,KW,k}$ = Anzahl der Tage in der ersten Kalenderwoche des Einrichtungszeitraums der Arbeitsstelle i [d]

$p_{KW,k}$ = Anteil der ersten Kalenderwoche des Einrichtungszeitraums der Arbeitsstelle i am Kfz-Jahresverkehr [%]

$p_{KW,j}$ = Anteile der zweiten bis vorletzten Kalenderwoche des Einrichtungszeitraums der Arbeitsstelle i am Kfz-Jahresverkehr [%]

$n_{t,KW,m}$ = Anzahl der Tage in der letzten Kalenderwoche des Einrichtungszeitraums der Arbeitsstelle i [d]

$p_{KW,m}$ = Anteil der letzten Kalenderwoche des Einrichtungszeitraums der Arbeitsstelle i am Kfz-Jahresverkehr [%]

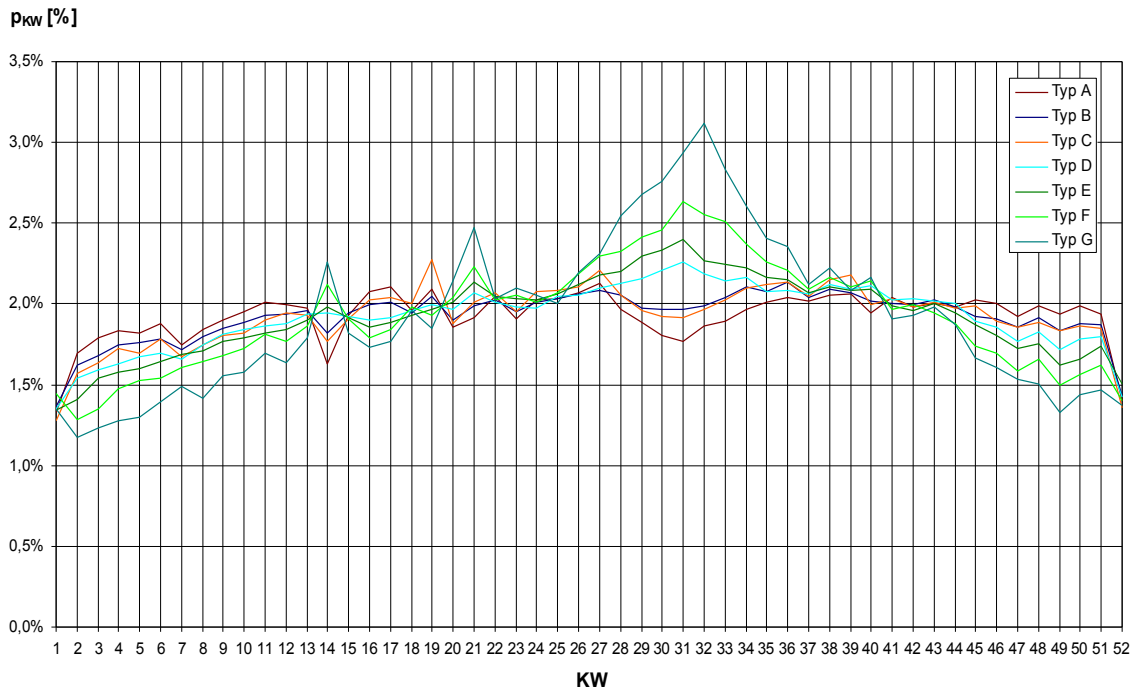


Bild 4-1: Jahrganglinientypen des Kfz-Verkehrs (FITSCHEN und KOSSMANN, 2008)

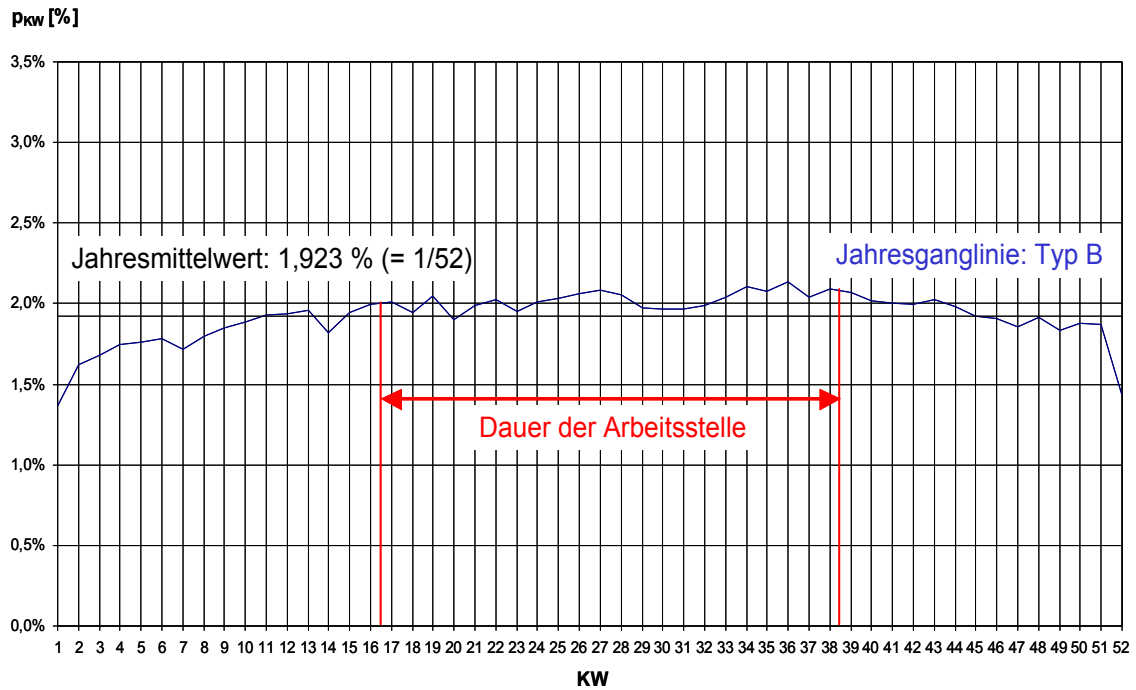


Bild 4-2: Berücksichtigung der Jahrganglinie des Kfz-Verkehrs und der zeitlichen Lage der Arbeitsstelle (KEMPER et al., 2018)

Unter Berücksichtigung der Jahresganglinie des Kfz-Verkehrs bzw. des Faktors $f_{KW,A,i}$ ergibt sich dann die Unfallrate $UR_{A,i,JG}$ zu:

$$UR_{A,i,JG} = \frac{10^6 \cdot n_{U,A,i}}{f_{KW,A,i} \cdot 365 \cdot DTV_{A,i} \cdot L_{A,i} \cdot t_{DTV,A,i}} \quad (4-4)$$

mit:

$UR_{A,i,JG}$ = Unfallrate der Arbeitsstelle i mit Berücksichtigung der Jahresganglinie des Kfz-Verkehrs [U/(10⁶ Kfz · km)]

$n_{U,A,i}$ = Anzahl der Unfälle in der Arbeitsstelle i im Betrachtungszeitraum $t_{A,i}$ [U]

$f_{KW,A,i}$ = Faktor zur Berücksichtigung der Anteilswerte des Wochenverkehrs am Kfz-Jahresverkehr in der Arbeitsstelle i [-]

365 = Tage pro Jahr [d/a]

$DTV_{A,i}$ = durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke in der Arbeitsstelle i im Kalenderjahr der Arbeitsstelleneinrichtung [Kfz/d]

$L_{A,i}$ = Länge der Arbeitsstelle i [km]

$t_{DTV,A,i}$ = Bezugszeitraum des zu Grunde gelegten $DTV_{A,i}$ in der Arbeitsstelle i [a]

Analog hierzu ergibt sich die Unfallkostenrate $UKR_{A,i,JG}$ zu:

$$UKR_{A,i,JG} = \frac{1.000 \cdot UK_{A,i}}{f_{KW,A,i} \cdot 365 \cdot DTV_{A,i} \cdot L_{A,i} \cdot t_{DTV,A,i}} \quad (4-5)$$

mit:

$UKR_{A,i,JG}$ = Unfallkostenrate der Arbeitsstelle i mit Berücksichtigung der Jahresganglinie des Kfz-Verkehrs [€/ (1.000 Kfz · km)]

$UK_{A,i}$ = Unfallkosten der Arbeitsstelle i im Betrachtungszeitraum $t_{A,i}$ [€]

$f_{KW,A,i}$ = Faktor zur Berücksichtigung der Anteilswerte des Wochenverkehrs am Kfz-Jahresverkehr in der Arbeitsstelle i [-]

365 = Tage pro Jahr [d/a]

$DTV_{A,i}$ = durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke in der Arbeitsstelle i im Kalenderjahr der Arbeitsstelleneinrichtung [Kfz/d]

$L_{A,i}$ = Länge der Arbeitsstelle i [km]

$t_{DTV,A,i}$ = Bezugszeitraum des zu Grunde liegenden $DTV_{A,i}$ in der Arbeitsstelle i [a]

Der Bezugszeitraum des zu Grunde liegenden $DTV_{A,i}$ ist hier jeweils ein Jahr ($t_{DTV,A,i} = 1$ a).

Mit den Unfall- und Unfallkostenraten $UR_{A,i,JG}$ bzw. $UKR_{A,i,JG}$ können grundsätzlich differenzierte Verteilungen wie Summenhäufigkeiten ermittelt werden. Kennwerte dieser Verteilungen sind beispielsweise der Medianwert ($UR_{A,50}$ und $UKR_{A,50}$ bzw. $UR_{A,JG,50}$ und $UKR_{A,JG,50}$) oder auch andere Quantile.

Für Unfall- oder Verunglücktenverteilungen bzw. deren Verhältnisswerte können darüber hinaus auch weitere statistische Tests durchgeführt werden. Somit können hier z. B. für die Verteilungen der $UR_{A,i}$ und der $UR_{A,i,JG}$ grundsätzlich die jeweiligen Standardabweichungen

berechnet werden. So haben beispielsweise auch FISCHER und BRANNOLTE (2006) für verschiedene Teilkollektive die jeweilige Standardabweichung der $UR_{A,i}$ berechnet.

Für auf Unfallkosten basierende Kenngrößen, also hier die $UKR_{A,i,JG}$, können dagegen keine statistischen Tests durchgeführt werden, da es sich bei Unfallkosten nicht um Ereignishäufigkeiten handelt (vgl. BRÜHNING und VÖLKER, 1982, sowie FGSV, 1991).

Als maßgebende Kenngrößen zur Bewertung der Verkehrssicherheit eignen sich die mittlere Unfallrate $UR_{A,M,JG}$ und vor allem die mittlere Unfallkostenrate $UKR_{A,M,JG}$ aller Arbeitsstellen bzw. eines Teilkollektivs ausgewählter Arbeitsstellen. Letztere ist geeigneter und aussagekräftiger, da sie nicht nur die Anzahl, sondern auch die Schwere der Unfälle berücksichtigt.

Die mittlere Unfallrate $UR_{A,M,JG}$ ergibt sich direkt aus den Unfallraten $UR_{A,i,JG}$ der einzelnen Arbeitsstellen zu:

$$UR_{A,M,JG} = \frac{\sum (UR_{A,i,JG} \cdot f_{KW,A,i} \cdot DTV_{A,i} \cdot L_{A,i})}{\sum (f_{KW,A,i} \cdot DTV_{A,i} \cdot L_{A,i})} \quad (4-6)$$

mit:

$UR_{A,M,JG}$ = mittlere Unfallrate eines Kollektivs von Arbeitsstellen mit Berücksichtigung der Jahresganglinie des Kfz-Verkehrs und der unterschiedlichen Einrichtungszeiträume der Arbeitsstellen [U/(10⁶ Kfz · km)]

$UR_{A,i,JG}$ = Unfallrate der Arbeitsstelle i mit Berücksichtigung der Jahresganglinie des Kfz-Verkehrs [U/(10⁶ Kfz · km)]

$f_{KW,A,i}$ = Faktor zur Berücksichtigung der Anteilswerte des Wochenverkehrs am Kfz-Jahresverkehr in der Arbeitsstelle i [-]

$DTV_{A,i}$ = durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke in der Arbeitsstelle i im Kalenderjahr der Arbeitsstelleneinrichtung [Kfz/d]

$L_{A,i}$ = Länge der Arbeitsstelle i [km]

Analog hierzu ergibt sich die mittlere Unfallkostenrate $UKR_{A,M,JG}$ direkt aus den Unfallkostenraten $UKR_{A,i,JG}$ der einzelnen Arbeitsstellen zu:

$$UKR_{A,M,JG} = \frac{\sum (UKR_{A,i,JG} \cdot f_{KW,A,i} \cdot DTV_{A,i} \cdot L_{A,i})}{\sum (f_{KW,A,i} \cdot DTV_{A,i} \cdot L_{A,i})} \quad (4-7)$$

mit:

$UKR_{A,M,JG}$ = mittlere Unfallkostenrate eines Kollektivs von Arbeitsstellen mit Berücksichtigung der Jahresganglinie des Kfz-Verkehrs und der unterschiedlichen Einrichtungszeiträume der Arbeitsstellen [€/ (1.000 Kfz · km)]

$UKR_{A,i,JG}$ = Unfallkostenrate der Arbeitsstelle i mit Berücksichtigung der Jahresganglinie des Kfz-Verkehrs in der Arbeitsstelle [€/ (1.000 Kfz · km)]

$f_{KW,A,i}$ = Faktor zur Berücksichtigung der Anteilswerte des Wochenverkehrs am Kfz-Jahresverkehr in der Arbeitsstelle i [-]

$DTV_{A,i}$ = durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke in der Arbeitsstelle i im Kalenderjahr der Arbeitsstelleneinrichtung [Kfz/d]

$L_{A,i}$ = Länge der Arbeitsstelle i [km]

Bei den nachfolgenden Unfallanalysen wird die mittlere Unfallkostenrate $UKR_{A,M,JG}$ als die maßgebende Kenngröße zu Grunde gelegt.

Arbeitsstellen kürzerer Dauer

Zur Berücksichtigung der tatsächlichen Fahrleistungen wird die Gesamtverkehrsmenge $M_{A,i}$ in der jeweils betrachteten Arbeitsstelle im konkreten Einrichtungszeitraum $t_{A,i}$ zu Grunde gelegt. Diese ist in Abhängigkeit vom stundengenauen Beginn und der Dauer der Arbeitsstelle aus dem richtungsbezogenen DTV und den zugeordneten Jahres-, Wochen- und Tagesganglinientypen des Kfz-Verkehrs für den Autobahnabschnitt, in dem die betrachtete Arbeitsstelle liegt, zu ermitteln.

Die Unfallrate $UR_{A,i}$ einer Arbeitsstelle kürzerer Dauer bzw. einzelner Bereiche innerhalb dieser Arbeitsstelle wird wie folgt berechnet:

$$UR_{A,i} = \frac{10^6 \cdot n_{U,A,i}}{M_{A,i} \cdot L_{A,i}} \quad (4-8)$$

mit:

$$UR_{A,i} = \text{Unfallrate der Arbeitsstelle } i \quad [U/(10^6 \text{ Kfz} \cdot \text{km})]$$

$$n_{U,A,i} = \text{Anzahl der Unfälle in der Arbeitsstelle } i \text{ im Einrichtungszeitraum } t_{A,i} \quad [U]$$

$$M_{A,i} = \text{Gesamtverkehrsmenge in der Arbeitsstelle } i \text{ im Einrichtungszeitraum } t_{A,i} \quad [\text{Kfz}]$$

$$L_{A,i} = \text{betrachte Länge im Bereich der Arbeitsstelle } i \quad [\text{km}]$$

Die Unfallkostenrate $UKR_{A,i}$ einer Arbeitsstelle kürzerer Dauer wird wie folgt berechnet:

$$UKR_{A,i} = \frac{1.000 \cdot UK_{A,i}}{M_{A,i} \cdot L_{A,i}} \quad (4-9)$$

mit:

$$UKR_{A,i} = \text{Unfallkostenrate der Arbeitsstelle } i \quad [€/(1.000 \text{ Kfz} \cdot \text{km})]$$

$$UK_{A,i} = \text{Unfallkosten der Arbeitsstelle } i \text{ im Einrichtungszeitraum } t_{A,i} \quad [€]$$

$$M_{A,i} = \text{Gesamtverkehrsmenge in der Arbeitsstelle } i \text{ im Einrichtungszeitraum } t_{A,i} \quad [\text{Kfz}]$$

$$L_{A,i} = \text{betrachte Länge im Bereich der Arbeitsstelle } i \quad [\text{km}]$$

Mit den Unfall- und Unfallkostenraten $UR_{A,i}$ bzw. $UKR_{A,i}$ können differenzierte Verteilungen wie Summen-häufigkeiten ermittelt werden. Kennwerte dieser Verteilungen sind beispielsweise der Medianwert ($UR_{A,50}$ bzw. $UKR_{A,50}$) oder auch andere Quantile. Des Weiteren lässt sich die mittlere $UR_{A,M}$ bzw. $UKR_{A,M}$ aller Arbeitsstellen bzw. eines Teilkollektivs ausgewählter Arbeitsstellen ermitteln.

Die mittlere Unfallrate $UR_{A,M}$ ergibt sich dann aus den Unfallraten $UR_{A,i}$ der einzelnen Arbeitsstellen zu:

$$UR_{A,M} = \frac{\sum (UR_{A,i} \cdot M_{A,i} \cdot L_{A,i})}{\sum (M_{A,i} \cdot L_{A,i})} \quad (4-10)$$

mit:

$$UR_{A,M} = \text{mittlere Unfallrate eines Kollektivs von Arbeitsstellen} \quad [U/(10^6 \text{ Kfz} \cdot \text{km})]$$

$UR_{A,i}$ = Unfallrate der Arbeitsstelle i [U/(10⁶ Kfz · km)]

$M_{A,i}$ = Gesamtverkehrsmenge in der Arbeitsstelle i im Einrichtungszeitraum $t_{A,i}$ [Kfz]

$L_{A,i}$ = betrachte Länge im Bereich der Arbeitsstelle i [km]

Analog hierzu ergibt sich die mittlere Unfallkostenrate $UKR_{A,M}$ direkt aus den Unfallkostenraten $UKR_{A,i}$ der einzelnen Arbeitsstellen zu:

$$UKR_{A,M} = \frac{\sum (UKR_{A,i} \cdot M_{A,i} \cdot L_{A,i})}{\sum (M_{A,i} \cdot L_{A,i})} \quad (4-11)$$

mit:

$UKR_{A,M}$ = mittlere Unfallkostenrate eines Kollektivs von Arbeitsstellen [€/(1.000 Kfz · km)]

$UKR_{A,i}$ = Unfallkostenrate der Arbeitsstelle i [€/(1.000 Kfz · km)]

$M_{A,i}$ = Gesamtverkehrsmenge in der Arbeitsstelle i im Einrichtungszeitraum $t_{A,i}$ [Kfz]

$L_{A,i}$ = betrachte Länge im Bereich der Arbeitsstelle i [km]

4.1.2 Ermittlung der Unfallkosten

Zur Ermittlung der Unfallkostenraten sind zunächst die Unfallkosten zu berechnen, welche die volkswirtschaftlichen Verluste (z. B. Reparaturkosten, medizinische Rehabilitation, Ausfall der Erwerbstätigkeit, Verwaltungskosten) durch Straßenverkehrsunfälle beziffern und Unfallanzahl und -schwere zusammenfassen. Dazu sind unterschiedliche Berechnungsarten möglich. Für Unfälle mit Personenschaden können pauschale Unfallkostensätze verwendet werden, oder es erfolgt eine direkte oder indirekte Anpassung der Kostensätze:

- Die Verwendung von pauschalen, auf Basis des Gesamtunfallgeschehens in Deutschland ermittelten Kostensätzen nach Straßen- und Unfallkategorien bzw. zusätzlich nach Unfalltypen kann zu Ungenauigkeiten in der Bewertung führen, da zeitliche Veränderungen und örtliche Abweichungen der Verunglücktenstruktur nicht ausreichend berücksichtigt werden.
- Die direkte Anpassung der Unfallkostensätze erfolgt über die Verunglücktenstruktur des untersuchten Unfallkollektivs und erfordert eine ausreichende Anzahl von Unfällen mit Personenschaden (Kategorien 1-3). Zusätzlich kann dabei nach dem Unfalltyp differenziert werden, sofern die jeweiligen Kollektive ausreichend groß sind.
- Die indirekte Anpassung der Unfallkostensätze erfolgt über die Verunglücktenstruktur größerer Unfallkollektive, die das eigentliche Untersuchungskollektiv enthalten, wenn das untersuchte Unfallkollektiv für die direkte Anpassung die vorgegebene Mindestgröße nicht erreicht.

Für ausreichend große Kollektive von Unfällen mit Personenschaden (Kategorien 1-3) sollte eine direkte Anpassung der Unfallkostensätze vorgenommen werden, da hiermit die spezifische Verunglücktenstruktur am besten berücksichtigt wird. Erfüllt das Unfallkollektiv an den betrachteten Straßenverkehrsanlagen innerhalb eines Untersuchungsgebiets nicht die Mindestanforderungen, so ist eine indirekte Anpassung in der Regel angemessen und immer noch besser als die Verwendung pauschaler Unfallkostensätze.

Grundsätzlich könnten auch für Unfälle mit Sachschaden (Kategorien 4-6) angepasste Unfallkostensätze ermittelt werden. Hierzu müssten aber die tatsächlichen Sachschadenskosten aller Unfälle bekannt sein. Die genauen Sachschadenskosten sind aber nur mit einem

sehr hohen Aufwand zu erfassen, beispielsweise aus Gutachten von Kraftfahrzeugsachverständigen oder den Daten der Versicherungen (die in den Verkehrsunfallanzeigen angegebenen, von der Polizei geschätzten Sachschadenskosten sind zu ungenau). Deshalb ist es im Allgemeinen ausreichend, die pauschalen, auf Basis des Gesamtunfallgeschehens in Deutschland ermittelten Kostensätze zu Grunde zu legen, hier die pauschalen Kostensätze für Unfälle mit Sachschaden auf Autobahnen. Auch nach dem ersten Entwurf des Handbuchs für die Bewertung der Verkehrssicherheit von Straßen (HVS) werden für die Berechnung angepasster Unfallkosten nur die Kostensätze der Unfälle mit Personenschaden angepasst, während die Unfallkosten der Unfälle mit Sachschaden mit den pauschalen Kostensätzen ermittelt werden (BARK et al., 2008).

Die Berechnung der arbeitsstellenbezogenen Unfallkosten $UK_{A,i}$ und der daraus abgeleiteten Unfallkostenraten $UKR_{A,M,JG}$ für Arbeitsstellen längerer Dauer und Unfallkostenraten $UKR_{A,M}$ für Arbeitsstellen kürzerer Dauer sollte auf einer einheitlichen Grundlage erfolgen. Die in den bisherigen Untersuchungen von beispielsweise FISCHER und BRANNOLTE (2006) für Arbeitsstellen längerer Dauer sowie von KEMPER (2010) und KEMPER et al. (2012) für Arbeitsstellen kürzerer Dauer ermittelten Unfallkostenraten wurden mit Kostensätzen zum Preisstand 2000 ermittelt. Lediglich KEMPER et al. (2018) haben in ihren Untersuchungen zu Arbeitsstellen längerer Dauer einen aktuelleren Preisstand (Preisstand 2010) zu Grunde gelegt. Um einen Vergleich mit den bisherigen Ergebnissen der zuvor genannten Untersuchungen zu ermöglichen, sollte deshalb auch hier eine Berechnung für den Preisstand 2000 erfolgen. Für die zukünftige Anwendung der zu ermittelnden Unfallkostenraten sollten jedoch möglichst die Kostensätze zum Preisstand 2010 zu Grunde gelegt werden.

4.2 Untersuchungen zur Verkehrssicherheit in Arbeitsstellen

Zur Verkehrssicherheit in Arbeitsstellen längerer Dauer und auch zur Verkehrssicherheit in Arbeitsstellen kürzerer Dauer liegen zahlreiche Untersuchungen vor. Diese betrachten z. T. unterschiedliche Aspekte wie den Vergleich verschiedener Verkehrsführungen oder verschiedener Absicherungsmaßnahmen. Eine Vielzahl der deutschen Untersuchungen ist bereits älter (aus den 1980er und 1990er Jahren). Deren Ergebnisse hinsichtlich ermittelter Unfallkenngrößen wie Unfallraten und Unfallkostenraten können aufgrund der seitdem eingetretenen Veränderungen im Verkehrsgeschehen allgemein und in der Absicherung von Arbeitsstellen im Besonderen sowie aufgrund der Entwicklung des Unfallgeschehens auf deutschen Autobahnen insgesamt (allgemeiner Rückgang der Unfallanzahl und -schwere) in ihren absoluten Größen nicht mehr als aktuell angesehen werden. Dies gilt insbesondere für Unfallkostenraten, da sich auch die Ansätze zur volkswirtschaftlichen Berechnung von Unfallkosten – und damit die Kostensätze für Unfälle – seitdem geändert haben. Deshalb werden im Weiteren nur tendenzielle bzw. qualitative Aussagen von Untersuchungen vor dem Jahr 2000 dargestellt. Die Nennung absoluter Werte einzelner Unfallkenngrößen erfolgt nur aus aktuelleren Untersuchungen.

4.2.1 Arbeitsstellen längerer Dauer

Die Verkehrssicherheit in Arbeitsstellen längerer Dauer wurde in der Vergangenheit bereits in verschiedenen Untersuchungen analysiert. In den älteren Studien aus den 1980er und 1990er Jahren, z. B. von EMDE und HAMESTER (1983) sowie Kockelke und Rossbänder (1988), wurde dabei hauptsächlich die Sicherheit verschiedener Arbeitsstellenbereiche (Zulauf, Überleitung bzw. Verschwenkung, Innenbereich) miteinander verglichen. Dabei erfolgten auch Vergleiche verschiedener Verkehrsführungen. In neueren Untersuchungen erfolgten darüber hinaus auch Betrachtungen zum Einfluss von Art und Ausführung der

Gegenverkehrstrennungen, z. B. ansatzweise von RÜFFER und BRAUN (2001) sowie in umfangreicherem Maß von FISCHER und BRANNOLTE (2006) und aktuell von KEMPER et al. (2018). Zudem sind diesbezüglich noch Untersuchungen aus der Schweiz von LAUBE (2001) sowie SPACEK, LAUBE und SANTEL (2005) und aus Österreich von NADLER, HANKO und SCHREFEL (1988) sowie HANKO (1995) zu nennen.

Vergleich verschiedener Verkehrsführungen

Von EMDE und HAMESTER (1983) wurde das Unfallgeschehen in Arbeitsstellen längerer Dauer der Jahre 1979 und 1980 in Bayern, Hessen und Nordrhein-Westfalen analysiert. Das Untersuchungskollektiv umfasste 12 Arbeitsstellen mit 3+1-Verkehrsführung und 69 Arbeitsstellen mit 4+0-Verkehrsführung. Insgesamt wurden 5.265 Unfälle mit schwerem Personen- und schwerem Sachschaden, 4.112 innerhalb der Arbeitsstellen und 1.153 in den Bereichen unmittelbar vor und hinter den Arbeitsstellen, berücksichtigt. Das Unfallgeschehen wurde getrennt für verschiedene Bereiche untersucht. In der Überleitung und im Innenbereich wurden insgesamt über 78 % der Unfälle verzeichnet.

Insgesamt lagen die Unfallraten aller Unfälle innerhalb der einzelnen Arbeitsstellenbereiche bei 3+1-Verkehrsführungen auf niedrigerem Niveau als bei 4+0-Verkehrsführungen. Zusätzlich haben EMDE und HAMESTER (1983) das Unfallgeschehen hinsichtlich schwerer und leichter Personenschäden analysiert: Bei der Rate der Unfälle mit schwerem Personenschaden konnten keine Unterschiede zwischen 3+1- und 4+0-Verkehrsführungen festgestellt werden. Die Rate der Unfälle mit leichtem Personenschaden hingegen war in Arbeitsstellen mit 3+1-Verkehrsführung niedriger als in Arbeitsstellen mit 4+0-Verkehrsführung.

Aktuelle Untersuchungen zur Verkehrssicherheit verschiedener Verkehrsführungen haben KEMPER et al. (2018) durchgeführt. Dabei wurden Arbeitsstellen mit 3+1-, 4+0- und 4+2-Verkehrsführungen in den Jahren 2003 bis 2006 betrachtet. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Unfallkostenraten von Arbeitsstellen mit 4+0-Verkehrsführung im Gegenverkehrstrennungsbereich höher sind als für solche mit 3+1-Verkehrsführung. Die Unfallkostenraten von Arbeitsstellen mit 4+2-Verkehrsführung sind im Bereich der Gegenverkehrstrennung am höchsten. Die Unfallraten von Arbeitsstellen mit 4+0- und 3+1-Verkehrsführung sind sowohl für die Arbeitsstellen insgesamt als auch im Bereich der Gegenverkehrstrennung geringer als die Unfallraten von Arbeitsstellen mit 4+2-Verkehrsführung. Tendenziell sind die Unfallraten bei Arbeitsstellen mit 4+0- und 3+1-Verkehrsführung im Bereich der Gegenverkehrstrennung bezogen auf die Unfälle mit Personenschaden (Kategorien 1-3) etwas geringer als im gesamten Arbeitsstellenbereich. Auf Basis aller Unfälle (Kategorien 1-6) sowie bei Arbeitsstellen mit 4+2-Verkehrsführung ist es eher umgekehrt.

Betrachtung einzelner Bereiche in Arbeitsstellen

Von EMDE und HAMESTER (1983) wurden Unfallraten für die einzelnen Bereiche von Arbeitsstellen ermittelt. In den Abschnitten 2 km vor sowie hinter der Arbeitsstelle lagen die Unfallraten deutlich unter den Unfallraten innerhalb der Arbeitsstelle. Der Bereich der Rückleitung wies ebenfalls hohe Unfallraten auf, diese liegen jedoch, ausgenommen bei Arbeitsstellen mit 4+0-Verkehrsführung mit Baufeld in Fahrtrichtung, unter den Unfallraten der Überleitung. Deutlich unfallauffälliger im Verhältnis zu den Vor- und Nachlaufbereichen war der separat untersuchte Entflechtungsbereich (1 km hinter dem Ende der Arbeitsstelle und der Aufhebung des Überholverbots für Lkw über 3,5 t, Kraftomnibusse und Pkw mit Anhänger sowie der Beschränkung der V_{zul}).

Zu tendenziell vergleichbaren Ergebnissen kamen auch KOCKELKE und ROSSBANDER (1988). In ihren Untersuchungen wurden Unfälle aus 15 Monaten von Januar 1987 bis April 1988 in sieben Arbeitsstellen ausgewertet. Vier Arbeitsstellen wurden dauerhaft mit einer 4+0-Verkehrsführung betrieben, bei zwei Arbeitsstellen wurde während der Bauzeit von einer 4+0- zu einer 2+2-Verkehrsführung gewechselt, und eine Arbeitsstelle hatte eine 3+3-Verkehrsführung.

NADLER, HANKO und SCHREFEL (1988) sowie HANKO (1995) untersuchten das Unfallgeschehen in Autobahnbaustellen in Österreich in den Jahren 1981 bis 1984 und kamen zu dem Ergebnis, dass die Unfallraten im Bereich von Arbeitsstellen längerer Dauer in der ersten Überleitung ihr Maximum erreichen. Ausgewertet wurden verschiedene Verkehrsführungen sowohl mit als auch ohne Gegenverkehrstrennung. Sie stellten fest, dass die Unfallraten im Baustellenbereich (einschließlich dem Vorlaufbereich) höher sind als auf der freien Strecke. NADLER, HANKO und SCHREFEL (1988) konstatieren, dass die Unfallschwere im Vorlaufbereich deutlich über der im Arbeitsstelleninnenbereich liegt.

Besonders kritisch ist somit der Überleitungsbereich von Arbeitsstellen auf Autobahnen zu sehen. Hier ist die Unfallrate höher als im Innenbereich selbst. Unabhängig davon besteht im Innenbereich von Arbeitsstellen mit Gegenverkehrstrennung eine deutlich erhöhte Unfallgefahr. Die bislang umfassendsten Untersuchungen zum Unfallgeschehen in Arbeitsstellen mit Gegenverkehrstrennung wurden von FISCHER und BRANNOLTE (2006) sowie KEMPER et al. (2018) durchgeführt.

FISCHER und BRANNOLTE (2006) führten eine Sicherheitsbewertung von verschiedenen Maßnahmen zur Trennung des Gegenverkehrs durch. Neben Analysen der Unfälle aus den Jahren 1999 bis 2002 in insgesamt 219 Arbeitsstellen mit 3+1-, 4+0- und 4+2-Verkehrsführungen untersuchten sie dabei auch den Verkehrsablauf in 15 Arbeitsstellen mit Gegenverkehrstrennung. Hinsichtlich der Verkehrssicherheit kamen FISCHER und BRANNOLTE (2006) zu dem Schluss, dass die mittlere Unfallschwere bei einer baulichen Trennung der Gegenverkehre deutlich niedriger ist als bei einer Trennung durch Markierung. Daher ist die Unfallkostenrate von Arbeitsstellen mit 4+0-Verkehrsführungen mit einer Trennung durch Markierung auch deutlich höher als die Unfallkostenrate bei Trennung mit Leitschwellen oder transportablen Schutzwänden. Für 3+1- und 4+2-Verkehrsführungen ließen sich aufgrund des geringen Kollektivs von Arbeitsstellen keine entsprechenden Aussagen ableiten. Die Fahrstreifenbreiten wirken sich nach FISCHER und BRANNOLTE (2006) zwar nicht auf die Unfallrate aus, sie vermuten aber, dass mit zunehmenden Fahrstreifenbreiten mit einem Anstieg der Unfallkostenrate zu rechnen ist.

KEMPER et al. (2018) konnten für Arbeitsstellen mit 4+0-, 4+2- und 3+1-Verkehrsführung differenzierte Unfallraten und Unfallkostenraten für verschiedene Bereiche ermitteln (Tabelle 4-1). Dabei wurden die Unfallkostenraten unter Berücksichtigung der Jahresganglinie des Kfz-Verkehrs und auf Basis nach Verkehrsführung differenzierter, angepasster Unfallkostensätze für Personenschäden ermittelt. Diese sind, wie auch die Unfallraten bei Arbeitsstellen mit 4+0-Verkehrsführung, im Bereich der Gegenverkehrstrennung etwas geringer als die mittlere Unfallkostenrate für den gesamten Arbeitsstellenbereich, bei Arbeitsstellen mit 3+1-Verkehrsführung dagegen tendenziell höher und bei Arbeitsstellen mit 4+2-Verkehrsführung sogar deutlich höher als die mittlere Unfallkostenrate für den gesamten Arbeitsstellenbereich. Unfälle im Überleitungsbereich von Arbeitsstellen mit 3+1-Verkehrsführung sind nicht schwerer als diejenigen in Überleitungen von Arbeitsstellen mit 4+0-Verkehrsführung, aber es treten deutlich mehr Unfälle auf (die Unfallrate ist mehr als doppelt so hoch), weshalb die Unfallkostenrate deutlich höher ist (ebenfalls mehr als doppelt so hoch). Im Überleitungsbereich von Arbeitsstellen mit 4+2-Verkehrsführung

fallen die Unfälle etwas weniger schwer aus als in Überleitungen von Arbeitsstellen mit 4+0- oder 3+1-Verkehrsführung. Zu berücksichtigen ist dabei, dass das Kollektiv sowohl der Arbeitsstellen mit 3+1-Verkehrsführung als auch der Arbeitsstellen mit 4+2-Verkehrsführung deutlich geringer ist als das Kollektiv derjenigen mit 4+0-Verkehrsführung. Deshalb konnten Detailanalysen auch nur für Arbeitsstellen mit einer 4+0-Verkehrsführung durchgeführt werden. Diese haben ergeben, dass schmale Fahrstreifen im Arbeitsstelleninnenbereich etwas sicherer sind als breite Fahrstreifen (die Unfallkostenrate ist etwas geringer) und die Reduzierung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit auf 60 km/h eine weitere Erhöhung der Sicherheit bewirken kann.

Bereich	UKR _{A,M,JG} (Kat. 1-6) [€/ (1.000 Kfz · km)] für Verkehrsführung		
	4+0 (n _A = 88)	3+1 (n _A = 24)	4+2 (n _A = 14)
Arbeitsstelle gesamt	13,3	9,3	15,2
Zulaufbereich	14,5	5,3	13,7
Überleitung	14,2	29,6	12,7
Innenbereich	14,0	10,0	19,4

Tab. 4-1: Vergleich der Unfallkostenraten in Arbeitsstellen längerer Dauer mit Gegenverkehrstrennung auf Basis eines Kollektivs von 126 Arbeitsstellen zum Preisstand 2010 (KEMPER et al., 2018)

Anschlussstellen innerhalb von Arbeitsstellen

Für Anschlussstellen innerhalb von Arbeitsstellen geben die RSA (BMV, 1995) mit den Regelplänen DII/9 und DII/10 differenzierte Vorgaben zur Absicherung dieser Bereiche. So kann die Einfahrt der Anschlussstelle je nach Art und Länge des Beschleunigungsstreifens mit Zeichen 205 StVO oder Zeichen 206 StVO geregelt werden.

Der Einfluss von Anschlussstellen im Bereich von Arbeitsstellen auf das Unfallgeschehen wurde in Deutschland bislang noch nicht umfassend untersucht. Zu nennen sind hier lediglich die Untersuchungen der Obersten Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern (OBB, 2009) und von KEMPER et al. (2018).

Bei den Unfalluntersuchungen der Obersten Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern (OBB, 2009) in Arbeitsstellen auf bayerischen Autobahnen wurde festgestellt, dass sich die Ausführung von Zufahrten mit Zeichen 206 StVO „Halt! Vorfahrt gewähren!“ negativ auf das Unfallgeschehen auswirkt. Fehlt an einer Zufahrt der Beschleunigungsstreifen und ist gleichzeitig auf der durchgehenden Hauptfahrbahn eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h angeordnet, potenziert sich das Unfallrisiko. Sind Anschlussstellen vorhanden, verdoppelt sich die Unfallrate gegenüber Arbeitsstellen ohne Ein- und Ausfahrten.

Auch KEMPER et al. (2018) konnten nachweisen, dass Anschlussstellen im Arbeitsstelleninnenbereich die Unfallwahrscheinlichkeit in den betrachteten Verkehrsführungen erhöhen. Erhöhungsfaktoren wurden hier aber nicht ermittelt.

Im Rahmen von Untersuchungen in der Schweiz stellte LAUBE (2001) für je eine 3+1- und eine 4+0-Verkehrsführung fest, dass sich die Unfallraten durch eine im Arbeitsstellenbereich befindliche Anschlussstelle verdoppelt haben. Seine Ergebnisse zeigen, dass die Unfallraten in der 3+1-Verkehrsführung deutlich über der Unfallrate bei 4+0-Verkehrsführungen liegen. Des Weiteren stellte er fest, dass der Einfluss von Anschlussstellen die Unfallraten deutlich ansteigen lässt. Im Gegensatz zu den RSA (BMV, 1995) werden in den schweizerischen Regelwerken aber keine exakten Vorgaben zur Absicherung von Ein- und Ausfahrten im Bereich von Arbeitsstellen gemacht.

4.2.2 Arbeitsstellen kürzerer Dauer

Arbeitsstellen kürzerer Dauer mit Sperrung mindestens eines Fahrstreifens stellen immer einen Eingriff in den Verkehrsablauf dar und beeinflussen somit auch das Unfallgeschehen. Die Häufigkeit, Länge und Dauer der Fahrstreifensperrungen durch Arbeitsstellen kürzerer Dauer ist dabei u. a. von den durchgeführten Tätigkeiten, aber auch von den Arbeitszeitplanungen der einzelnen Autobahnmeistereien abhängig. Die hierzu vorliegenden Angaben von DURTH, KLOTZ und STÖCKERT (1999), STÖCKERT (2001), WOLTERECK (2001) oder KEMPER (2010) erlauben deshalb keine Ableitung pauschaler Mittelwerte für das Bundesautobahnnetz.

Alle bisherigen Untersuchungen zum Unfallgeschehen im Bereich von Arbeitsstellen kürzerer Dauer, z. B. von GREBE und HANKE (1991) sowie STÖCKERT (2001), zeigen, dass dort ein erhebliches Unfallrisiko besteht. So ist laut STÖCKERT (2001) die Unfallrate in Arbeitsstellen kürzerer Dauer deutlich höher als auf der freien Strecke und liegt sogar noch über der Unfallrate von Arbeitsstellen längerer Dauer. Letzteres führt er u. a. auf die Fahrstreifensperrungen bei Arbeitsstellen kürzerer Dauer zurück, die aus Zeit- und Kostengründen häufig nicht zu vermeiden sind, während bei Arbeitsstellen längerer Dauer weitestgehend versucht wird, die vorhandene Fahrstreifenanzahl beizubehalten.

Auch die Unfallfolgen sind größer. Nach DURTH und STÖCKERT (2002) ist die Unfallkostenrate in Arbeitsstellen kürzerer Dauer insgesamt etwa siebenmal höher als auf der freien Strecke. Grundlage ihrer Untersuchungen war das Unfallgeschehen auf den Autobahnen in Hessen der Jahre 1991 bis 1996. Bei der ausschließlichen Betrachtung von Arbeitsstellen auf der Fahrbahn mit Sperrung mindestens eines Fahrstreifens ist die Unfallkostenrate laut KEMPER (2010) immerhin noch etwa viermal höher als auf der freien Strecke, wobei diese in Abhängigkeit von der Verkehrsführung und der Tageszeit (Tag/Nacht) deutlich variiert. Der Untersuchung liegt das gesamte Unfallgeschehen aus den Jahren 2002 bis 2005 in allen Arbeitsstellen kürzerer Dauer auf den Autobahnen im Regierungsbezirk Köln zu Grunde.

Die aktuellsten Untersuchungen zur Verkehrssicherheit von Arbeitsstellen kürzerer Dauer wurden von KEMPER et al. (2012) durchgeführt. Dabei wurde auf die aus den Untersuchungen von KEMPER (2010) vorliegenden Daten zu Arbeitsstellen kürzerer Dauer zurückgegriffen. Insgesamt wurden in die Unfallanalyse 5.803 Arbeitsstellen kürzerer Dauer mit Sperrung mindestens eines Fahrstreifens auf zwei- und dreistreifigen Richtungsfahrbahnen einbezogen, davon 4.948 Tagesbaustellen und 855 Nachtbaustellen. Betrachtet wurden alle Unfälle im pauschal mit 2 km Länge angesetzten Zulaufbereich vor der fahrbaren Absperrtafel.

In den 4.948 Tagesbaustellen sind insgesamt 194 Unfälle im Zulaufbereich von 2 km Länge aufgetreten. Der überwiegende Teil sind Unfälle mit leichtem Sachschaden (Kategorie 5), 29 Unfälle hatten einen Personenschaden (Kategorien 1-3) zur Folge, davon sind nur 3 Unfälle mit schwerem Personenschaden (Kategorien 1+2). Die Unfallanzahl in den Zulaufbereichen der 855 Nachtbaustellen ist mit insgesamt 27 Unfällen gering. Von diesen Unfällen ist lediglich ein Unfall mit Personenschaden (Kategorie 3). Die übrigen Unfälle hatten lediglich Sachschaden (Kategorien 4-6) zur Folge, wobei es sich dabei überwiegend um Unfälle mit leichtem Sachschaden (Kategorie 5) handelt.

Für die betrachteten Arbeitsstellen kürzerer Dauer wurden jeweils die Unfallraten und die Unfallkostenraten aller einzelnen Arbeitsstellen berechnet und daraus dann für die jeweiligen Teilkollektive die mittleren Unfallraten bzw. mittleren Unfallkostenraten ermittelt (siehe Tabelle 4-2 und Tabelle 4-3). Aufgrund des geringen Unfallgeschehens insbesonde-

re in Arbeitsstellen mit Sperrung von zwei Fahrstreifen (1. und 2. Überholfahrstreifen bzw. Haupt- und 1. Überholfahrstreifen) ist eine Ableitung gesicherter Unfall- und Unfallkostenraten für solche Arbeitsstellen nicht möglich. Die berechneten Unfall- und Unfallkostenraten sind deshalb nur eingeschränkt verwendbar.

Lässt man die vergleichsweise seltenen Arbeitsstellen mit Sperrung von zwei Fahrstreifen außer Acht, zeigt sich, dass die mittlere Unfallkostenrate bei Arbeitsstellen kürzerer Dauer mit Sperrung eines Fahrstreifens nachts deutlich geringer ist als bei entsprechenden tagsüber eingerichteten Arbeitsstellen. Ausgenommen davon sind Arbeitsstellen mit Sperrung des Überholfahrstreifens auf einer zweistreifigen Richtungsfahrbahn. Hier sind die mittleren Unfallkostenraten bei Tag und Nacht etwa gleich hoch.

n_{FS} [-]	Verkehrsführung	Regelplan	n_A [-]	$UR_{A,M}$ [U/(10 ⁶ Kfz · km)]	$UKR_{A,M}$ [€/(1.000 Kfz · km)]
2	2 = Sperrung Überholfahrstreifen	DIII/2l	1.649	1,01	11,0
2	4 = Sperrung Hauptfahrstreifen	DIII/2r	1.113	1,64	40,9
3	5 = Sperrung 2. Überholfahrstreifen	DIII/2l	1.227	1,72	19,0
3	6 = Sperrung 1. + 2. Überholfahrstreifen	DIII/5	56	0,88	27,2
3	8 = Sperrung Hauptfahrstreifen	DIII/2r	879	1,53	26,7
3	9 = Sperrung Haupt- + 1. Überholfahrstreifen	DIII/4	24	1,59	12,7

Tab. 4-2: Mittlere Unfallraten $UR_{A,M}$ und mittlere Unfallkostenraten $UKR_{A,M}$ (Preisstand 2000) im Zulaufbereich von Tagesbaustellen (KEMPER et al., 2012)

n_{FS} [-]	Verkehrsführung	Regelplan	n_A [-]	UR_A [U/(10 ⁶ Kfz · km)]	UKR_A [€/(1.000 Kfz · km)]
2	2 = Sperrung Überholfahrstreifen	DIV/1l	202	0,67	13,1
2	4 = Sperrung Hauptfahrstreifen	DIV/1r	251	1,84	14,7
3	5 = Sperrung 2. Überholfahrstreifen	DIV/1l	116	1,25	10,0
3	6 = Sperrung 1. + 2. Überholfahrstreifen	DIV/3	78	6,68	53,5
3	8 = Sperrung Hauptfahrstreifen	DIV/1r	117	1,16	13,4
3	9 = Sperrung Haupt- + 1. Überholfahrstreifen	DIV/2	91	4,07	39,7

Tab. 4-3: Mittlere Unfallraten $UR_{A,M}$ und mittlere Unfallkostenraten $UKR_{A,M}$ (Preisstand 2000) im Zulaufbereich von Nachtbaustellen (KEMPER et al., 2012)

4.3 Neuartige Methoden zur Verbesserung des Verkehrsablaufs und der Verkehrssicherheit in Arbeitsstellen

Im Rahmen des Arbeitsstellenmanagements wurden in den letzten Jahren verschiedene Strategien entwickelt, um den Verkehrsablauf im Bereich von Arbeitsstellen zu verbessern und somit die Verkehrssicherheit und die Kapazität zu erhöhen. Zu diesen Verfahren gehören insbesondere das modifizierte Reißverschlussverfahren im Vorlauf zur Arbeitsstelle und das versetzte Fahren im Innenbereich einer Arbeitsstelle. Diese und weitere neuartige Methoden zur Verbesserung des Verkehrsablaufs und der Verkehrssicherheit auf Autobahnen wurden ausführlich von ZIMMERMANN et al. (2016) behandelt. Auf bereits vorliegende Ergebnisse aus früheren Forschungsvorhaben zu diesem Thema soll deshalb hier nur relativ kurz eingegangen werden.

4.3.1 Modifiziertes Reißverschlussverfahren

Beim Einzug eines Fahrstreifens (sowohl auf der freien Strecke als auch vor Arbeitsstellen) tritt auf deutschen Autobahnen das Reißverschlussverfahren nach § 7 Abs. 4 StVO in Kraft. Dieses gibt vor, dass ein Fahrstreifenwechsel erst unmittelbar vor dem Fahrstreifeneinzug erfolgen soll. Dabei soll immer ein Fahrzeug des durchgehenden Fahrstreifens ein Fahrzeug des eingezogenen Fahrstreifens einfädeln lassen. Das Reißverschlussverfahren ist insbesondere bei hohen Verkehrsstärken von Vorteil, da durch das geordnete Einordnen von einer höheren Kapazität des Engpasses ausgegangen wird.

Das Reißverschlussverfahren kann nur dann Wirkung zeigen, wenn sich die Verkehrsteilnehmer an die Regelung halten. Dies ist jedoch häufig nicht in ausreichendem Maße der Fall. In der Vergangenheit wurden verschiedene Strategien entwickelt, um die Einhaltung des Reißverschlussverfahrens zu unterstützen. Zum einen wird unter der Einengungstafel (Zeichen 531 StVO) das Zusatzzeichen „Reißverschluss erst in ... m“ (Zeichen 1005-30 StVO) angeordnet. Weiterhin wurden bereits seit den 1980er Jahren Untersuchungen zur Wirkung einer durchgezogenen Linie im Vorfeld der Fahrstreifenreduktion durchgeführt. VOLKENHOFF et al. (2010) konnten nachweisen, dass durch die Aufbringung der durchgezogenen Linie die Anwendung des Reißverschlussverfahrens erleichtert und der Verkehrsablauf positiv beeinflusst wird. Eine stauverhindernde Wirkung der Markierung konnte dagegen nicht belegt werden. Im Einzelfall ist eine gestiegene Verflechtungsgeschwindigkeit im Stau beim Einsatz der modifizierten Markierung beobachtet worden, woraus sich eine höhere Kapazität des Engpasses ableiten ließ.

4.3.2 „Versetzt Fahren“ in der Arbeitsstelle

Ziel der Sonderbeschilderung „Versetzt Fahren“ in Arbeitsstellen längerer Dauer mit zwei Richtungsfahrstreifen ist es, bei einem sehr schmalen linken Fahrstreifen einen gleichmäßigen Verkehrsablauf mit entsprechend höherer Verkehrssicherheit zu bewirken. Das Schild hat keine rechtliche Grundlage und wirkt ausschließlich als Empfehlung. Entscheidend ist jedoch, dass die Vorgabe „Versetzt Fahren“ das in Deutschland gültige Rechtsfahrgebot (§ 2 Abs. 2. StVO) aufhebt. Bei Anordnung dieses Schildes (Bild 4-3 links) sind die Verkehrsteilnehmer also berechtigt, auch dann den linken Fahrstreifen zu benutzen, wenn keine Überholabsicht vorhanden ist. Durch das versetzte Fahren sollen die beiden Fahrstreifen innerhalb der Arbeitsstelle optimal ausgenutzt werden, auch wenn Überholen aufgrund des sehr schmalen linken Fahrstreifens nicht möglich oder nicht gewollt ist. Das Schild „Versetzt Fahren“ allein verbietet das Überholen allerdings nicht. Hierfür muss zusätzlich das Zeichen 276 StVO (Überholverbot) eingesetzt werden. Während das Schild „Versetzt Fahren“ schon seit längerem angewendet wird, ist die Kombination beider Schilder (Bild 4-3 rechts) relativ neu.

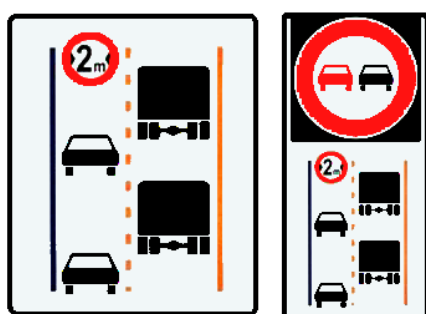


Bild 4-3: Zeichen „Versetzt Fahren“ (links) und „Versetzt Fahren“ in Kombination mit „Überholverbot“ (rechts)

SÜMMERMANN und STEINAUER (2010) haben an einer Pilotbaustelle auf der A 61 bei Alzey in Rheinland-Pfalz im Rahmen einer Begleituntersuchung die Potenziale einer solchen Beschilderung hinsichtlich des Verkehrsablaufs und der Verkehrssicherheit untersucht, wobei der Schwerpunkt der Untersuchungen auf der Verkehrssicherheit lag. Der Verkehrsablauf wurde nur insofern betrachtet, als stockender Verkehr und Verkehrszusammenbrüche das Unfallrisiko erhöhen. Untersucht wurden sowohl die Wirkung der Pilotmaßnahme als auch die Akzeptanz der Verkehrsteilnehmer. Hierbei stellte sich heraus, dass die Geschwindigkeitsbeschränkung von 80 km/h in der Arbeitsstelle sehr gut eingehalten wurde. Dies wird auf den sehr hohen SV-Anteil und den mit 2,50 m sehr schmalen linken Fahrstreifen zurückgeführt, sodass der Pkw-Verkehr am Überholen gehindert wird. Der Anteil an überholenden Fahrzeugen nimmt mit zunehmender Verkehrsstärke ab. Jedoch hält sich trotz des Verbotsschildes etwa die Hälfte der Verkehrsteilnehmer nicht an das Überholverbot. Aufgrund der geringen Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Haupt- und Überholfahrstreifen wird jedoch auf einen harmonischen Verkehrsfluss geschlossen, der die Verkehrssicherheit erhöht und die Wahrscheinlichkeit von Verkehrszusammenbrüchen reduziert. SÜMMERMANN und STEINAUER (2010) gehen aber auch davon aus, dass bei einer Geschwindigkeitsbeschränkung auf 60 km/h das Überholbestreben und die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen den beiden Fahrstreifen zunehmen und die Wirkung der Beschilderung nachlassen würde. Erste Auswertungen zum Unfallgeschehen weisen zudem darauf hin, dass die Anzahl der Unfälle in der Pilotbaustelle nur etwa halb so groß war wie in Baustellen mit Regelbeschilderung. Aufgrund des relativ kurzen Analysezeitraums wird jedoch auch darauf verwiesen, dass deutlich längere Analysezeiträume notwendig sind, um statistisch tragfähige Aussagen zu treffen.

4.3.3 Permanenter Linkseinzug bei Arbeitsstellen kürzerer Dauer

Eine Möglichkeit zur Erhöhung der Kapazität und der Verkehrssicherheit bei Arbeitsstellen kürzerer Dauer mit Arbeiten auf dem rechten Fahrstreifen ist die Einziehung des linken Fahrstreifens mit anschließender Verschwenkung. Diese Art der Absicherung wird in den Schweizer Richtlinien (VSS, 1999) schon seit mehreren Jahren als Absicherungsvariante für Arbeitsstellen kürzerer Dauer vorgegeben und auch in Baden-Württemberg seit einiger Zeit eingesetzt (Bild 4-4).

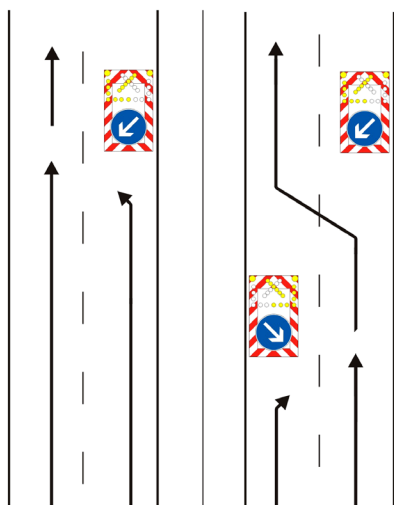


Bild 4-4: Absicherung nach RSA 95 (links) sowie mit Einzug des linken Fahrstreifens (rechts)

Neben einer Kapazitätserhöhung werden die verbesserte Begreif- und Erkennbarkeit der Verkehrsführung und die damit erreichbare Verstetigung des Verkehrsflusses von KLEIN (2003) als vorteilhaft eingeschätzt. Die Absicherung orientiert sich somit an den Vorgaben für Arbeitsstellen längerer Dauer (z. B. Regelplan II/4a nach RSA, 1995) sowie für Fahrstreifenreduktionen auf Bundesautobahnen, bei denen auch zunächst der linke Fahrstreifen eingezogen wird. Das Potenzial dieser modifizierten Absicherung liegt darin begründet, dass sich der schnellere, flexiblere Verkehrsstrom auf dem Überholfahrstreifen in den langsameren Verkehrsstrom des Hauptfahrstreifens (zumeist überwiegend Schwerverkehr) einsortieren muss. Innerhalb von Steigungsstrecken kommen die Vorteile dieser Absicherung daher besonders stark zum Tragen.

Eine Anwendung für dreistreifige Richtungsfahrbahnen ist denkbar, wurde aber im Rahmen der Versuche nicht betrachtet. Einsatzgrenzen bezüglich der Verkehrsstärke, des SV-Anteils oder der Längsneigung konnten bislang jedoch noch nicht abgeleitet werden. KLEIN (2003) räumt sogar ein, dass bei geringem Verkehrsaufkommen gegebenenfalls keine Verbesserung des Verkehrsablaufs gegenüber der Absicherung entsprechend den gültigen Regelplänen der RSA (1995) erreicht wird. Es konnten jedoch keine einschränkenden Bedingungen oder Nachteile festgestellt werden.

Konkrete Aussagen zur Sicherheitswirkung dieser Maßnahme können auf Grundlage der Untersuchungen von KLEIN (2003) nicht abgeleitet werden. Grundsätzlich ist zwar davon auszugehen, dass die Erkennbarkeit der Arbeitsstelle durch die zweite, vorgezogene Absperrtafel auf dem linken Fahrstreifen verbessert wird. Damit einhergehend kann auch eine erhöhte Aufmerksamkeit der Verkehrsteilnehmer erreicht werden. Gleichwohl ist hierdurch eine Erhöhung der Sicherheit gegenüber Auffahrunfällen auf die fahrbare Absperrtafel gerade bei geringen Verkehrsstärken nicht zwangsläufig gegeben, da eine zusätzliche Warnung unachtsamer Kraftfahrer auf dem rechten Fahrstreifen, also insbesondere der Lkw-Fahrer, vor der Arbeitsstelle durch diese Maßnahme nicht erfolgt. Die oftmals besonders schwerwiegenden Unfälle, die durch unaufmerksame oder übermüdete Lkw-Fahrer verursacht werden, können so nicht vermieden werden. Zudem ist durch die zweite Absperrtafel ein weiteres Hindernis auf der Fahrbahn vorhanden. Eine weitere Schwierigkeit liegt darin begründet, dass diese Variante durch die Sperrung beider Fahrstreifen auf den ersten Blick auch als Vollsperrung gedeutet werden könnte. Daher ist die Einhaltung des vorgegebenen Abstands zwischen den beiden Absperrtafeln von großer Bedeutung (KEMPER, 2010).

5 Analyse des Verkehrsablaufs – Dauerzählstellendaten

5.1 Kapazität von Arbeitsstellen längerer Dauer

5.1.1 Datengrundlage und Untersuchungskollektiv

Ziel der Analyse des Verkehrsablaufs ist in erster Linie die Ermittlung von Kapazitätswerten für Arbeitsstellen mit unterschiedlichen Randbedingungen. Hierfür sind Verkehrsdaten erforderlich, welche die gesamte Bandbreite möglicher Verkehrszustände bis hin zur Überlastung umfassen. Für die Ermittlung aussagekräftiger Schätzwerte der Kapazität ist dabei eine möglichst große Anzahl von Überlastungen erforderlich. Dies setzt eine Datenerhebung über lange Zeiträume voraus. Für die Analyse sind daher insbesondere Daten von Dauerzählstellen geeignet. Zusammenbrüche des Verkehrsflusses infolge der Engpasswirkung von Arbeitsstellen treten in der Regel am Beginn der Arbeitsstelle oder im Bereich der Fahrstreifenreduktion (soweit vorhanden) unmittelbar vor der Arbeitsstelle auf. Für die Ermittlung der Kapazität von Arbeitsstellen sind daher Daten erforderlich, die im Zulauf zur Arbeitsstelle erfasst werden.

Eine Analyse der Arbeitsstellenkapazität setzt voraus, dass im unmittelbaren Zulauf zu den in den Baubetriebsmeldungen gemeldeten Arbeitsstellen Dauerzählstellen vorhanden sind und diese während der Einrichtungsdauer der Arbeitsstelle in Betrieb waren. Um eine möglichst große Anzahl geeigneter Arbeitsstellen ermitteln zu können, ist dementsprechend eine große Anzahl von Zählstellen notwendig. Eine hohe Zählstellendichte ist insbesondere auf den hoch belasteten Autobahnen in den Bundesländern Nordrhein-Westfalen, Hessen und Bayern gegeben.

Für die vorliegende Untersuchung lagen Daten von sämtlichen Dauerzählstellen auf Autobahnen in Nordrhein-Westfalen aus den Jahren 2010 bis 2012 und in Hessen aus den Jahren 2009 bis 2012 vor (jeweils etwa 1.700 Querschnitte auf Hauptfahrbahnen), die vom Landesbetrieb Straßenbau Nordrhein-Westfalen bzw. von Hessen Mobil Straßen- und Verkehrsmanagement bereitgestellt wurden. Hinzu kommen Daten einzelner Zählstellen für ältere oder aktuellere Zeiträume. Darüber hinaus wurden Daten aus den Jahren 2012 bis 2014 von Zählstellen in Bereichen ausgewählter Arbeitsstellen auf den Autobahnen A 8 und A 9 von der Autobahndirektion Südbayern, auf den Autobahnen A 6 und A 61 vom Landesbetrieb Mobilität Rheinland-Pfalz und auf der Autobahn A 2 von der Niedersächsischen Landesbehörde für Straßenbau und Verkehr zur Verfügung gestellt.

Zur Eingrenzung des etwa 1.200 Baubetriebsmeldungen umfassenden Kollektivs aus den Bundesländern Nordrhein-Westfalen und Hessen in den Jahren 2009 bzw. 2010 bis 2012 wurden zunächst alle Arbeitsstellen, die nicht als stauanfällig angesehen werden können, aus der Betrachtung ausgeschlossen. Als Maßstab galt hier der in den Baubetriebsmeldungen angegebene DTV. Als Grenzwert wurde ein DTV pro Fahrstreifen von ca. 12.500 Kfz/d festgelegt. Damit reduzierte sich das Kollektiv auf etwa 500 Arbeitsstellen.

Eine Unter- oder Obergrenze hinsichtlich der Arbeitsstellenlänge, wie sie für die Unfalluntersuchungen festgelegt wurde, wurde für die Analyse des Verkehrsablaufs nicht verwendet. Auch Arbeitsstellen mit einer Länge von weniger als 700 m können erhebliche Verkehrsstörungen verursachen, da hauptsächlich die Ausprägung der Engstelle maßgebend ist. Eine Mindesteinrichtungsdauer wurde ebenfalls nicht festgelegt, da auch Arbeitsstellen von kurzer Dauer einen erheblichen Eingriff in den Verkehrsablauf bewirken können. Um

die Kapazität auf der Grundlage einer ausreichend großen Datenmenge analysieren zu können, sind jedoch in der Regel nur Arbeitsstellen mit längeren Einrichtungsdauern geeignet.

Zur Festlegung des endgültigen Untersuchungskollektivs wurde für alle hinsichtlich der Verkehrsbelastung geeigneten Arbeitsstellen die genaue Lage der Arbeitsstelle mit der Lage umliegender Dauerzählstellen verglichen. Anhand der Geschwindigkeits- und Verkehrsstärkeganglinien sowie der q-v-Diagramme der jeweiligen Messquerschnitte wurde dann die Eignung der Zählstellen beurteilt. Betrachtet wurden Geschwindigkeitsreduzierungen aufgrund von Geschwindigkeitsbeschränkungen zur gemeldeten Einrichtungszeit der Arbeitsstelle sowie die Plausibilität der aufgezeichneten Verkehrsstärken und das Vorhandensein von Verkehrszusammenbrüchen. Darüber hinaus wurde die Vollständigkeit der Angaben zu den jeweiligen Arbeitsstellen in den Baubetriebsmeldungen und den verkehrsrechtlichen Anordnungen geprüft.

Die wesentlichen Gründe für den Ausschluss von Arbeitsstellen aus den weiteren Analysen waren:

- fehlende Verkehrsdaten während des Einrichtungszeitraumes,
- offensichtlich falsch erfasste Verkehrsstärken, z. B. durch Verschwenkungen der Behelfsfahstreifen im Arbeitsstelleninnenbereich,
- fehlende Verkehrszusammenbrüche,
- mehrere Bauphasen hintereinander, die zeitlich nicht mehr eindeutig eingeordnet werden konnten, und
- fehlende Informationen/Planunterlagen, z. B. zu Fahrstreifenbreiten.

Letztendlich konnten die Daten von 66 Richtungsverkehrsführungen von Arbeitsstellen ausgewertet werden. Davon konnten in 40 Fällen Kapazitäten ermittelt werden. Bei den anderen Arbeitsstellen war die Anzahl der Zusammenbrüche nicht ausreichend, um aussagekräftige Schätzwerte der Kapazität zu ermitteln. Die Aufteilung der Arbeitsstellen auf die verschiedenen Verkehrsführungen ist in Bild 5-1 dargestellt.

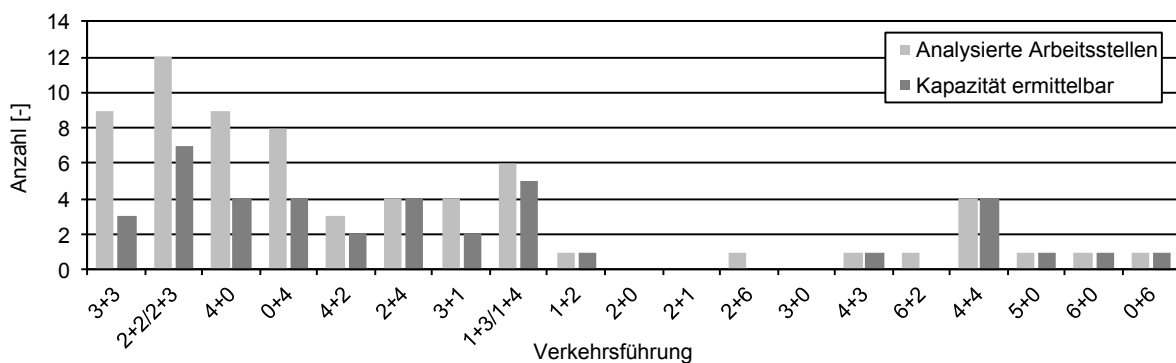


Bild 5-1: Anzahl der untersuchten Arbeitsstellen in Abhängigkeit von der Verkehrsführung

Die maßgebenden Randbedingungen für alle Arbeitsstellen (Richtungsverkehrsführungen), an denen Kapazitäten ermittelt werden konnten, sind in Tabelle 5-1 dargestellt. Hierbei ergibt sich die folgende Charakteristik des Untersuchungskollektivs:

- 24 Arbeitsstellen innerhalb und 16 außerhalb von Ballungsräumen,
- 1 einstreifige, 23 zweistreifige, 11 dreistreifige und 5 vierstreifige Richtungsverkehrsführungen,

Arbeitsstellen-ID	Lage	s [%]	b _{sv} [%]	Verkehrsführung	n _{FS}	n _{FS,ü}	b _{FS} [m]	Fahrstreifenreduktion	v _{zul} [km/h]
NW 2012_805	aB	3	7,5	1+2	1	0	3,75	ja	80
RP 2014_002	aB	3	10,0	2+2	2	0	3,25/2,50	nein	80
NW 2010_404	iB	< 2	12,5	2s+2s	2	0	3,25/2,50	nein	80
NW 2011_647	iB	< 2	12,5	3s+1	2	0	3,25/2,50	nein	80
RP 2012_002	aB	< 2	12,5	4s+0	2	0	3,25/2,50	nein	80
RP 2014_001a	aB	4	15,0	4s+0	2	0	3,25/2,50	nein	80
NW 2011_632	iB	< 2	20,0	2+3n	2	0	3,25/2,60	nein	80
NW 2011_519	iB	< 2	10,0	4s+0	2	0	3,50/3,25	nein	80
NW 2011_641	iB	< 2	20,0	2s+3	2	0	3,50/3,50	nein	80
NW 2012_620	aB	< 2	17,5	2s+3n	2	0	3,00/2,60	ja	60
NI 2012_001	aB	< 2	15,0	3+1	2	0	3,75/3,50	ja	80
RP 2012_003	aB	5	12,5	4s+0	2	0	3,25/2,50	ja	80
HE 2013_001	aB	3	7,5	5s+0	2	0	3,25/2,75	ja	80
NW 2010_706	iB	< 2	12,5	2+2	2	0	3,50/3,50	ja	80
NW 2012_634	iB	< 2	17,5	2+2	2	0	3,75/3,75	ja*	80
NW 2011_636a	iB	3	7,5	1+4	2	1	3,25/3,25	nein	80
NW 2011_636b	iB	3	22,5	1+4	2	1	3,25/3,25	nein	80
NW 2010_639	iB	< 2	7,5	1+3s	2	1	3,75/3,25	nein	80
NI 2012_002	aB	< 2	5,0	1+3	2	1	3,75/3,50	ja	60
NI 2012_003	aB	< 2	20,0	1+3	2	1	3,75/3,50	ja	80
RP 2014_001b	aB	< 2	12,5	0+4s	2	2	3,25/2,50	nein	80
RP 2012_001	aB	< 2	15,0	0+4s	2	2	3,25/2,50	nein	80
NW 2012_644	iB	< 2	10,0	0+4s	2	2	3,25/2,60	nein	80
RP 2013_001	aB	4	12,5	0+4s	2	2	3,25/2,50	ja	80
HE 2001_003	iB	< 2	10,0	3+3n	3	0	3,25/2,50/2,50	nein	80
HE 2001_005	iB	< 2	10,0	6s+0	3	0	3,25/2,50/2,50	nein	80
HE 2012_401	aB	3	15,0	4s+2	3	0	3,25/3,00/2,60	nein	80
NW 2010_296	iB	< 2	10,0	3+3	3	0	3,25/3,00/2,75	nein	60
NW 2011_517	iB	< 2	10,0	3+3	3	0	3,25/3,00/2,75	nein	60
NW 2012_654	iB	< 2	10,0	4s+2	3	0	3,25/3,00/2,75	nein	60
NW 2010_291	iB	< 2	12,5	2+4s	3	1	3,25/2,50/3,00	nein	80
HE 2012_388	aB	< 2	10,0	2+4s	3	1	3,25/2,75/3,50	nein	80
NW 2012_657	iB	< 2	12,5	2+4s	3	1	3,60/3,00/3,25	nein	60
BY 2014_001	aB	3	7,5	2+4s	3	1	3,25/3,00/3,75	nein	80
HE 2001_002	iB	< 2	10,0	0+6s	3	3	3,25/2,50/2,50	nein	80
HE 2010_100	iB	< 2	12,5	4+4	4 (3+TSF)	0	3,25/3,00/2,75/2,50	nein	80
HE 2009_185	iB	< 2	10,0	4+4	4 (3+TSF)	0	3,25/3,25/2,75/2,75	nein	80
HE 2011_300	iB	< 2	10,0	4s+3s	4	0	3,25/3,25/3,25/2,75	nein	80
HE 2012_387a	iB	< 2	12,5	4+4	4 (3+TSF)	0	3,25/3,25/3,00/3,00	nein	80
HE 2012_387b	iB	< 2	12,5	4+4	4 (3+TSF)	0	3,25/3,25/3,00/3,00	nein	80

* modifiziertes Reißverschlussverfahren

Tab. 5-1: Parameter der Untersuchungsstellen der Kapazitätsanalysen

- 26 Richtungsverkehrsführungen ohne Überleitung, 5 mit Überleitung aller Fahrstreifen und 9 mit Überleitung eines Teils der Fahrstreifen und somit einer Fahrbahnteilung,
- 10 Richtungsverkehrsführungen mit Fahrstreifenreduktion, davon eine mit modifiziertem Reißverschlussverfahren,
- Fahrstreifenbreiten zwischen 2,50 m und 3,75 m auf dem oder den Überholfahrstreifen und zwischen 3,00 m und 3,75 m auf dem Hauptfahrstreifen,
- 10 Arbeitsstellen mit hohen SV-Anteilen von (im Mittel) mindestens 15 % in den maßgebenden Spitzenstunden und
- 10 Arbeitsstellen mit Steigungen von mehr als 2 %.

5.1.2 Datenaufbereitung

Plausibilisierung der Zählstellendaten

Zur Ermittlung der Kapazitäten im Bereich der einzelnen Arbeitsstellen musste zunächst der genaue Untersuchungszeitraum festgelegt werden. Der Zeitraum mit verringerten Geschwindigkeiten in der Ganglinie der Zählstellendaten stimmte dabei nicht immer mit der gemeldeten Einrichtungszeit der Arbeitsstelle überein. Ein Rückgang der Geschwindigkeitsganglinie vor dem gemeldeten Beginn konnte auf eine weitere Arbeitsstellenphase vor der betrachteten Phase hinweisen. Erfolgte der Geschwindigkeitsrückgang allerdings erst nach dem angegebenen Beginn der Arbeitsstelle oder stiegen die Geschwindigkeiten vor dem Ende wieder an, wurde davon ausgegangen, dass die Angaben zur Einrichtungszeit fehlerhaft waren. Bild 5-2 zeigt hierfür ein Beispiel anhand der Geschwindigkeitsganglinie aus den Daten einer Zählstelle für das Jahr 2010. In der Ganglinie ist eine deutliche Reduktion der Geschwindigkeit im Zeitraum vom 03.03. bis 19.05.2010 zu erkennen. Die korrigierten Baubetriebsmeldungen und auch die vorliegende verkehrsrechtliche Anordnung geben jedoch eine Arbeitsstelle im Zeitraum bis zum 30.06.2010 an. In diesem Fall war eine Analyse des Verkehrsablaufs nur in dem Zeitraum möglich, in dem die Geschwindigkeitsdaten der Zählstelle das Vorhandensein der Arbeitsstelle bestätigten.

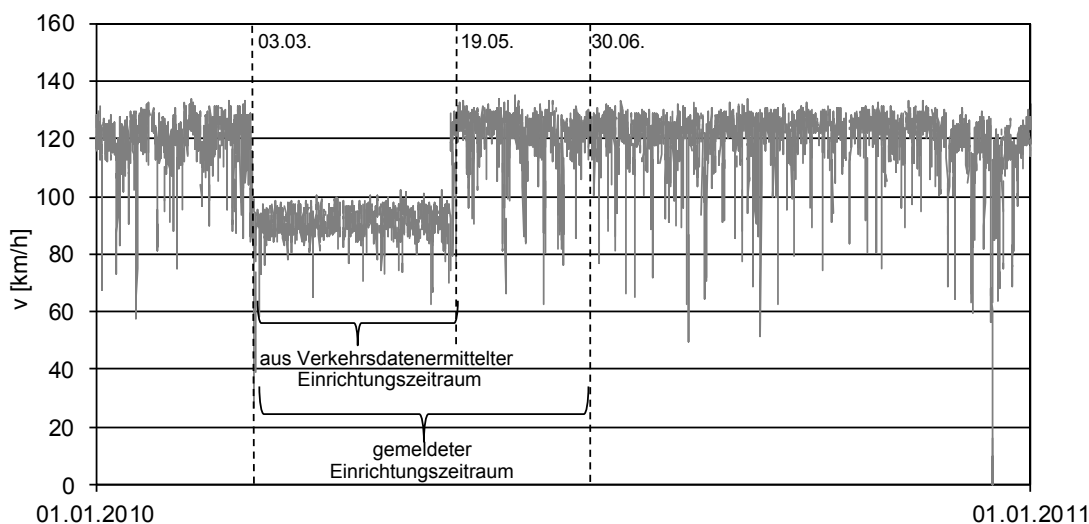


Bild 5-2: Geschwindigkeitsganglinie für eine ausgewählte Zählstelle im Bereich einer Arbeitsstelle

Grundsätzlich wurden die ersten und letzten Tage der Arbeitsstelleneinrichtung nicht in die Analyse einbezogen, da davon ausgegangen werden kann, dass an diesen Tagen noch Auf- oder schon Abbauarbeiten stattfinden, die die Kapazität beeinflussen. Weiterhin wurden die Daten auch auf Unregelmäßigkeiten während des Arbeitsstellenzeitraums untersucht.

So wurden z. B. kurzzeitige Abnahmen der Verkehrsstärke an einzelnen Tagen, welche vermutlich auf zusätzliche Fahrstreifensperrungen o. Ä. zurückzuführen sind, so weit wie möglich aus der Datengrundlage entfernt.

Aufbereitung der Zählstellendaten

Nach Festlegung der zu verwendenden Zählstellendaten und des genauen Auswertzeitraums erfolgte für jede Untersuchungsstelle zunächst eine Aufbereitung der Ausgangsdaten. In alle Analysen gingen nur Intervalle bei trockener Witterung (Tagesniederschlag < 1 mm) und Tageshöchsttemperaturen über 0 °C ein, da Regenereignisse und Glätte einen erheblichen Einfluss auf die Kapazität haben können. Abweichend von den im HBS (FGSV, 2015) definierten Randbedingungen wurden allerdings auch Intervalle bei Dunkelheit berücksichtigt, da die Spitzenstunde der Verkehrsnachfrage bei Arbeitsstellen im Winter häufig außerhalb der Tageshelligkeit liegt.

Einen wesentlichen Einfluss auf den Verkehrsablauf und die Kapazitäten von Autobahnen kann auch die Höhe des SV-Anteils haben. Für die Analyse der Kapazität sind vor allem die Intervalle im Bereich der höchsten Verkehrsstärken von Interesse. Der SV-Anteil bei hohen Verkehrsstärken ist aber im Allgemeinen geringer als der Mittelwert des SV-Anteils über alle Intervalle. Aus diesem Grund wurden nur die Intervalle zur Analyse herangezogen, bei denen der SV-Anteil maximal um 5 % vom SV-Anteil bei den höchsten Verkehrsstärken abwich.

5.1.3 Methodik und Ergebnisse der deterministischen und stochastischen Kapazitätsanalysen

Das Vorgehen bei der Analyse der Kapazität von Arbeitsstellen längerer Dauer orientierte sich an der Methodik, die auch zur Überprüfung der Kapazitäten für die Fortschreibung des HBS-Bemessungsverfahrens für Strecken von Autobahnen zur Anwendung kam (BRILON und GEISTEFELDT, 2010). Somit ist die Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit den Bemessungswerten des HBS (FGSV, 2015) gewährleistet. Dabei wurden sowohl das Verfahren der Kapazitätsermittlung durch Anpassung des VAN AERDE-Modells an das q-v-Diagramm (vgl. Kapitel 3.1.2) als auch die Verfahren der stochastischen Kapazitätsanalyse (vgl. Kapitel 3.3.2) angewandt. Während bei der Analyse der Kapazität im q-v-Diagramm ein fester Kapazitätswert C_{det} bestimmt wird, ergibt sich mit dem stochastischen Verfahren eine Verteilungsfunktion der Kapazität, sodass als Ergebnis die Parameter der Verteilung vorliegen. Dabei können Kennwerte der Verteilung, z. B. das 5. Perzentil, als Nennwert der Kapazität definiert werden.

Die deterministische Ermittlung der Kapazität im q-v-Diagramm erfolgte in Stunden-Intervallen. Hierbei war es notwendig, instationäre Werte, welche sich durch die Aggregation von 5-Minuten- zu Stunden-Intervallen ergeben, aus der Datengrundlage zu entfernen (vgl. Kapitel 3.3.1). Als Grenzwert für die Standardabweichung der Geschwindigkeiten in den zwölf 5-Minuten-Intervallen einer Stunde wurden 10 km/h angesetzt. Um eine größere Anzahl von Wertepaaren zu generieren, wurden gleitende Stunden-Intervalle in 15-Minuten-Schritten gebildet.

Bei der Anpassung des VAN AERDE-Modells stellte sich heraus, dass bei 25 von 40 untersuchten Arbeitsstellen keine zufriedenstellende Modellanpassung möglich war. Bereits in früheren Untersuchungen (z. B. BRILON und GEISTEFELDT, 2010) wurde festgestellt, dass die Anpassung des VAN AERDE-Modells nicht immer in zufriedenstellender Weise gelingt. Bei den hier durchgeführten Kapazitätsanalysen von Arbeitsstellen war dies jedoch vergleichsweise häufig der Fall. Dies ist vor allem auf zwei Gründe zurückzuführen. Zum einen

kann eine zu geringe Anzahl an Intervallen mit stationären Verhältnissen im gestauten Verkehr vorliegen. Dies ist insbesondere bei Arbeitsstellen der Fall, bei denen der Analysezeitraum kurz ist und nur wenige Überlastungen auftreten. Allerdings können auch bei einer geringen Anzahl an Intervallen im gestauten Verkehr durchaus adäquate Anpassungen gelingen. Noch entscheidender für die Güte der Anpassung ist die Form des q-v-Diagramms. Bild 5-3 zeigt zwei Beispiele für q-v-Diagramme von Zählstellen im Zulauf zu Arbeitsstellen, die aufgrund der Form des Diagramms keine geeigneten Anpassungen des VAN AERDE-Modells ermöglichen. Ein grundsätzliches Problem stellt die deutliche Zweiteilung des q-v-Diagramms in einen oberen und unteren Ast dar. Für eine gute Anpassung sollte eine möglichst durchgehende Punktwolke vom oberen in den unteren Ast vorliegen. Dies ist in beiden hier dargestellten Diagrammen nicht der Fall und führt zu zwei unterschiedlichen Ausprägungen der Modellkurve. Im linken Diagramm liegt der Scheitelpunkt der Funktion deutlich unter den höchsten Verkehrsstärken. Dies liegt daran, dass der untere Ast des q-v-Diagramms nahezu horizontal verläuft. Da die Funktion jedoch definitionsgemäß durch den Nullpunkt verlaufen muss, ergibt sich keine gute Anpassung. Im rechten Diagramm liegt der Scheitelpunkt der Funktion deutlich über den höchsten Verkehrsstärken. Hier verläuft die Kurve zwar sehr gut angepasst sowohl durch den Bereich des fließenden als auch des gestauten Verkehrs, gerade im Bereich des Scheitelpunktes fehlen aber die notwendigen Datenpunkte für eine adäquate Anpassung.

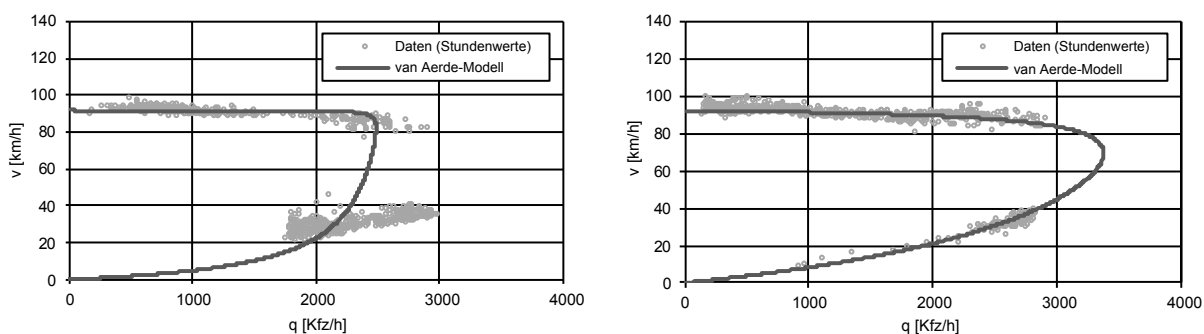


Bild 5-3: Anpassung des VAN AERDE-Modells für die Arbeitsstellen NW_2012_636a und NW_2012_636b an das q-v-Diagramm in Stunden-Intervallen

Die Ermittlung von Verteilungsfunktionen der Kapazität für alle Arbeitsstellen des Untersuchungskollektivs erfolgte auf der Grundlage von 5-Minuten-Intervallen und unter Annahme Weibull-verteilter Kapazitäten bei der Maximum-Likelihood-Schätzung. Zur Identifikation von Zusammenbrüchen des Verkehrsflusses wurden die von GEISTEFELDT (2007) festgelegten Grenzbedingungen verwendet. Für die Güte der Ergebnisse der stochastischen Kapazitätsanalyse ist vor allem die Anzahl der Zusammenbrüche maßgebend. Die Plausibilität der ermittelten Verteilungsfunktion der Kapazität hängt allerdings auch von der Verteilung der Verkehrsstärken vor den Zusammenbrüchen ab. Wurden Zusammenbrüche hauptsächlich bei eher geringen Verkehrsstärken gemessen und liegen im Bereich der höchsten Verkehrsstärken nur zensierte Werte vor, ergibt sich häufig eine unrealistisch hohe Varianz der Verteilungsfunktion der Kapazität. Sind die Zusammenbrüche hingegen gleichmäßig über einen bestimmten Bereich verteilt, wird in der Regel eine gute Anpassung erreicht. Eine gute Anpassung zeichnet sich insbesondere durch eine weitgehende Übereinstimmung der parameterfreien Product-Limit-Schätzung und der parametrisierten Maximum-Likelihood-Schätzung der Kapazitätsverteilung aus. Für die 40 Arbeitsstellen des Untersuchungskollektivs war nur bei 7 Arbeitsstellen keine gute Anpassung möglich. Für die beiden Beispiele aus Bild 5-3 zeigt Bild 5-4 die q-v-Diagramme in 5-Minuten-Intervallen und die mit der Maximum-Likelihood- und der Product-Limit-Methode ermittelten Verteilungsfunktionen der Kapazität.

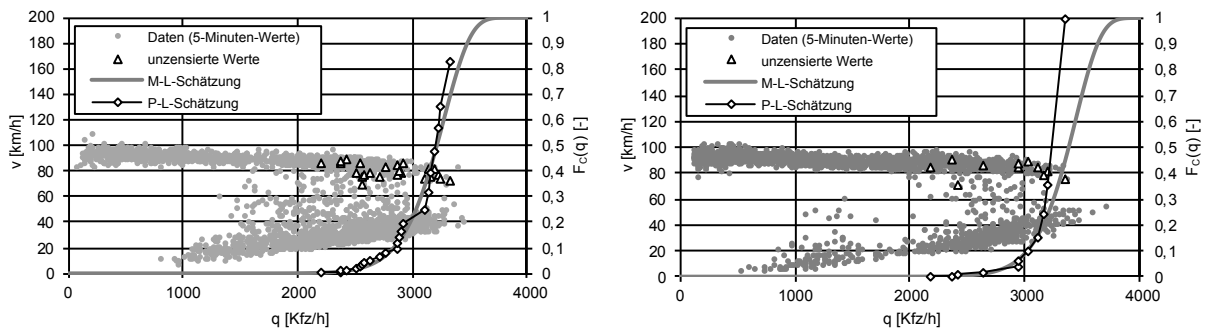


Bild 5-4: Product-Limit-Schätzung (P-L) und Maximum-Likelihood-Schätzung (M-L) der Verteilungsfunktion der Kapazität für die Arbeitsstellen NW_2012_636a und NW_2012_636b

Anhand der näheren Analyse der Arbeitsstellen, für die plausible Kapazitätsschätzungen sowohl durch die Anpassung des VAN AERDE-Modells im q-v-Diagramm als auch mit den Verfahren der stochastischen Kapazitätsanalyse möglich waren, konnte festgestellt werden, dass das 5. Perzentil der Verteilungsfunktion der Kapazität ($q_{FC,5}$) im Mittel in etwa der mit dem VAN AERDE-Modell ermittelten Kapazität C_{det} in Stunden-Intervallen entspricht. Ein Beispiel hierfür ist in Bild 5-5 dargestellt. Allerdings schwanken die 5. Perzentile deutlich, sodass es auch vorkommt, dass das 5. Perzentil der Verteilungsfunktion größer als das 99. Perzentil der Verkehrsstärken (q_{99}) oder sogar größer als der Maximalwert der Verkehrsstärken (q_{max}) in Stunden-Intervallen ist. In diesem Fall wurde stattdessen das 99. Perzentil der Verkehrsstärken als Kapazität angesetzt. Dies entspricht im Prinzip der Vorgehensweise bei der Definition eines Vertrauensbereichs für die Kapazität im q-v-Diagramm, wie sie für die Fortschreibung der Kapazitätswerte des HBS (BRILON, GEISTEFELDT, 2010) erfolgt ist. Der festgelegte Kapazitätswert für jede Arbeitsstelle wird als Nennwert der Kapazität C_N bezeichnet.

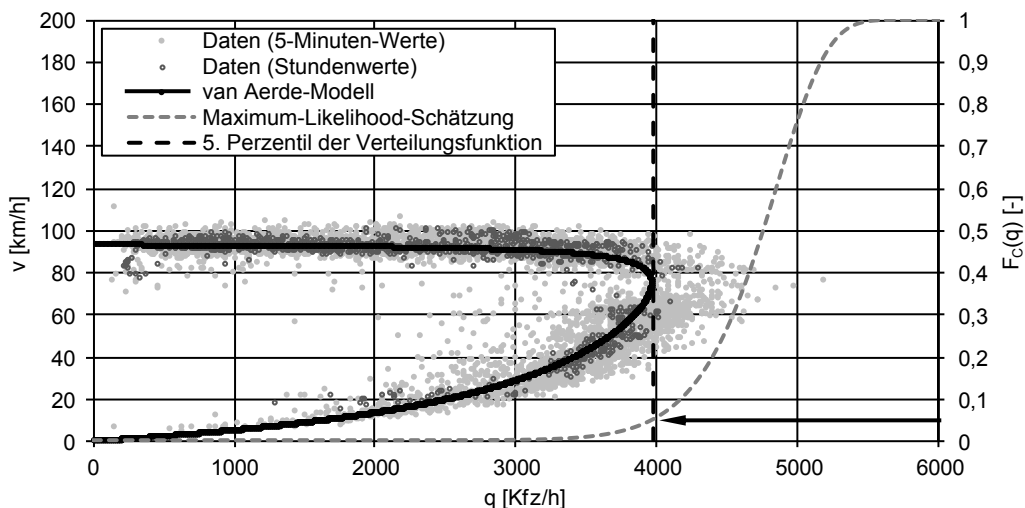


Bild 5-5: Vergleich der Kapazität am Scheitelpunkt der VAN AERDE-Modellfunktion in Stunden-Intervallen mit dem 5. Perzentil der Verteilungsfunktion der Kapazität in 5-Minuten-Intervallen am Beispiel der Arbeitsstelle BY_2014_001

In Tabelle 5-2 sind für alle Arbeitsstellen die Ergebnisse der deterministischen und stochastischen Kapazitätsanalyse zusammengefasst. Detaillierte Informationen zu den jeweiligen Arbeitsstellen und die zugehörigen q-v-Diagramme in 5-Minuten- und Stunden-Intervallen sind im Anhang A dargestellt.

Arbeitsstellen-ID	deterministische Kapazitätsermittlung			stochastische Kapazitätsermittlung					
	q_{\max} [Kfz/h]	q_{99} [Kfz/h]	C_{\det} [Kfz/h]	v_{grenz} [km/h]	Zusammen- brüche	a [-]	b [Kfz/h]	$q_{FC,5}$ [Kfz/h]	C_N [Kfz/h]
1-streifige Querschnitte									
NW 2012_805	1.759	1.739	(1.890)	70	18	16	2.104	1.745	1.739
2-streifige Querschnitte									
RP 2014_002	3.298	3.100	(3.342)	60	33	22	3.728	3.256	3.100
NW 2010_404	3.354	3.239	(3.004)	70	29	15	4.166	3.402	3.239
NW 2011_647	3.732	3.590	(3.312)	60	31	(16)	(4.601)	(3.811)	3.590
RP 2012_002	3.311	3.063	(3.146)	80	15	26	3.703	3.299	3.063
RP 2014_001a	2.867	2.649	(2.288)	60	37	9	3.549	2.581	2.581
NW 2011_632	3.379	3.356	3.304	70	11	16	4.005	3.308	3.308
NW 2011_519	3.616	3.435	3.355	80	56	15	4.382	3.576	3.435
NW 2011_641	3.212	3.122	(2.732)	70	7	12	3.966	3.103	3.103
NW 2012_620	3.701	3.431	-	90	8	15	4.057	3.334	3.334
NI 2012_001	3.543	3.412	(3.124)	80	19	18	4.136	3.514	3.412
RP 2012_003	3.067	2.937	-	80	16	20	3.691	3.171	2.937
HE 2013_001	3.528	3.354	(2.543)	80	22	16	4.130	3.413	3.354
NW 2010_706	4.281	4.215	(3.931)	60	27	24	4.416	3.910	3.910
NW 2012_634	2.950	2.909	(3.034)	80	7	(19)	(3.464)	(2.975)	2.909
NW 2011_636a	2.911	2.828	(3.379)	70	11	17	3.458	2.895	2.828
NW 2011_636b	2.973	2.929	(2.486)	70	24	15	3.294	2.707	2.707
NW 2010_639	3.590	3.557	3.408	60	20	13	4.124	3.287	3.287
NI 2012_002	3.620	3.500	3.422	80	5	22	4.106	3.587	3.500
NI 2012_003	2.957	2.800	-	80	4	15	3.702	3.046	2.800
RP 2014_001b	2.910	2.804	(2.627)	80	20	16	3.553	2.948	2.804
RP 2012_001	2.863	2.663	(2.285)	70	47	11	3.426	2.646	2.646
NW 2012_644	3.971	3.681	(3.767)	80	19	(13)	(5.066)	(4.010)	3.681
RP 2013_001	3.349	3.054	-	70	26	14	3.899	3.161	3.054
3-streifige Querschnitte									
HE 2001_003	5.458	5.373	5.242	90	39	19	6.243	5.321	5.321
HE 2001_005	5.295	4.879	4.844	80	80	18	5.854	4.959	4.879
HE 2012_401	4.315	4.088	(4.263)	80	8	26	4.899	4.366	4.088
NW 2010_296	5.877	5.674	5.340	80	155	24	5.994	5.301	5.301
NW 2011_517	5.844	5.673	5.417	80	158	21	6.119	5.318	5.318
NW 2012_654	5.528	5.271	5.181	75	120	26	5.748	5.117	5.117
NW 2010_291	4.831	4.668	(4.847)	90	7	(17)	(5.734)	(4.817)	4.668
HE 2012_388	5.076	4.943	(4.856)	75	3	(23)	(6.048)	(5.317)	4.943
NW 2012_657	5.198	5.010	4.900	80	30	19	5.689	4.875	4.875
BY 2014_001	4.287	4.083	3.995	75	17	15	4.973	4.057	4.057
HE 2001_002	6.222	5.874	5.659	70	83	18	6.577	5.593	5.593
4-streifige Querschnitte									
HE 2010_100	6.721	6.530	6.488	80	36	20	7.183	6.211	6.211
HE 2009_185	7.584	7.413	7.258	80	4	(20)	(9.130)	(7.858)	7.413
HE 2011_300	4.989	4.563	(5.636)	80	5	(16)	(6.025)	(4.977)	4.563
HE 2012_387a	7.936	7.373	(7.078)	80	35	19	8.685	7.421	7.373
HE 2012_387b	7.428	7.180	(6.831)	75	29	17	8.841	7.431	7.180

Tab. 5-2: Ergebnisse der deterministischen und stochastischen Kapazitätsanalyse (Klammerwerte kennzeichnen eine schlechte Anpassung des VAN AERDE-Modells bzw. der Verteilungsfunktion)

Aufgrund der unterschiedlichen Parameter der Verkehrsführungen und der allgemein großen Bandbreite der Kapazität auch bei vergleichbaren Randbedingungen weisen die Kapazitäten der Kollektive erhebliche Spannweiten auf. So wurden für zweistreifige Richtungsverkehrsführungen Kapazitäten zwischen 2.581 und 3.910 Kfz/h ermittelt. Für dreistreifige Richtungsverkehrsführungen liegen die Kapazitäten zwischen 4.057 und 5.593 Kfz/h, wobei zwei Werte (4.057 und 4.088 Kfz/h) auffallend niedrig sind. Bei den betreffenden Arbeitsstellen handelt es sich um die einzigen dreistreifigen Arbeitsstellen im Untersuchungskollektiv mit einer Steigung von mehr als 2 %.

Für die vierstreifigen Richtungsverkehrsführungen wurden in zwei Fällen Kapazitäten ermittelt, die deutlich unter den anderen drei Kapazitäten liegen. An beiden Arbeitsstellen ist dies auf die Lage der Arbeitsstelle zurückzuführen. Die Arbeitsstelle HE_2011_300 liegt an der Autobahn A 3 unmittelbar vor der Ausfahrt des Wiesbadener Kreuzes, wo die beiden rechten Fahrstreifen subtrahiert werden (Ausfahrttyp A 8 nach den RAA; FGSV, 2008). Der Verkehrszusammenbruch entsteht demnach nicht direkt infolge der Arbeitsstelle, sondern aufgrund der niedrigen Kapazität des stromabwärts folgenden Bereichs. Die sehr niedrige Kapazität von 4.563 Kfz/h wurde daher aus den weiteren Untersuchungen ausgeschlossen. Die Arbeitsstelle HE_2010_100 weist ähnliche Randbedingungen auf. Hier geht in der Arbeitsstelle der temporär freigegebene Seitenstreifen in die Ausfahrt der Anschlussstelle Obertshausen über. Die ermittelte Kapazität von 6.211 Kfz/h wurde somit ebenfalls nicht weiter berücksichtigt. Die übrigen Kapazitäten, die ebenfalls für Arbeitsstellen mit drei Richtungsfahrstreifen und temporärer Seitenstreifenfreigabe im Zulauf ermittelt wurden, liegen zwischen 7.180 und 7.413 Kfz/h.

Anhand der vorliegenden Einzelergebnisse werden im nächsten Schritt die unterschiedlichen Einflussgrößen auf den Verkehrsablauf analysiert.

5.1.4 Einflussgrößen auf den Verkehrsablauf

Als Einflussgrößen auf den Verkehrsablauf bzw. die Kapazität kommen in Arbeitsstellen längerer Dauer viele Parameter in Frage. Die verschiedenen Einflussgrößen können dabei aus unterschiedlichen Datenquellen entnommen werden. Hierbei handelt es sich zum einen um die Baubetriebsmeldungen bzw. die verkehrsrechtlichen Anordnungen und zum anderen um Angaben, die aus den Zählstellendaten ermittelt werden können. Hinzu kommen Daten aus anderen Quellen, die nicht in direktem Zusammenhang zu der Arbeitsstelle stehen (z. B. Lage im Netz und Längsneigung).

Die folgenden Einflussgrößen werden hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Kapazität näher untersucht:

- Verkehrsführung:
 - Fahrstreifenanzahl in der Arbeitsstelle,
 - Vorhandensein einer Fahrstreifenreduktion,
 - Vorhandensein einer Fahrstreifenüberleitung,
- Fahrstreifenbreiten,
- zulässige Höchstgeschwindigkeit,
- Vorhandensein von Anschlussstellen in der Arbeitsstelle,
- SV-Anteil in der Spitzenstunde,
- Fahrerkollektiv, repräsentiert durch die Lage im Netz (innerhalb oder außerhalb von Ballungsräumen), und
- Längsneigung.

Verkehrsführung und Fahrstreifenbreiten

Die Verkehrsführung in Arbeitsstellen längerer Dauer wird charakterisiert durch die Anzahl der Behelfsfahrstreifen, das Vorhandensein einer Fahrstreifenreduktion und die Anzahl der übergeleiteten Fahrstreifen. Die Anzahl der Behelfsfahrstreifen reicht im Rahmen des Untersuchungskollektivs von einem Fahrstreifen bis drei Fahrstreifen mit temporärer Seitenstreifenfreigabe. Im Sinne einer einfachen Erfassung der unterschiedlichen Ausprägungen einer Fahrstreifenüberleitung wird für jede Arbeitsstelle nur unterschieden, ob eine Überleitung von allen oder nur von einem Teil der Fahrstreifen vorliegt. Hierbei wird berücksichtigt, dass nicht nur das Vorhandensein einer Überleitung, sondern auch das Vorhandensein einer Fahrbahnteilung einen maßgebenden Einfluss auf die Kapazität haben kann, weil im Bereich vor der Fahrbahnteilung Störungen durch strategische Fahrstreifenwechsel der Verkehrsteilnehmer entstehen können. Zudem können insbesondere Anschlussstellen innerhalb der Arbeitsstelle zu einer ungleichmäßigen Auslastung der getrennt geführten Fahrstreifen beitragen.

Die Anzahl der Fahrstreifen und das Vorhandensein von Überleitungen sind theoretisch direkt aus der Bezeichnung der Verkehrsführung nach den RSA (BMV, 1995) abzuleiten. Dennoch ist es nicht zielführend, Kapazitäten von Arbeitsstellen allein in Abhängigkeit von der Verkehrsführung zu bewerten, da manche Verkehrsführungen fahrtrichtungsbezogen vergleichbar sind. So weisen z. B. die Verkehrsführungen 3+3, 4+2, 5+1 und 6+0 in der Regel in einer Fahrtrichtung drei durch Leitlinien getrennte Behelfsfahrstreifen ohne Überleitung auf, die sich ggf. nur durch die Fahrstreifenbreiten unterscheiden. Es ist dementsprechend sinnvoller, alle Verkehrsführungen durch die oben genannten Parameter zu beschreiben.

Bei der Festlegung der zu untersuchenden Einflussgrößen wurde davon ausgegangen, dass neben der Verkehrsführung auch die Breite der einzelnen Behelfsfahrstreifen einen Einfluss auf die Kapazität einer Arbeitsstelle hat. Da jeder Fahrstreifen nach den maßgebenden Richtlinien (RSA, BMV, 1995; RAA, FGSV, 2008) Breiten zwischen 2,50 m (3,00 m bei Nutzung durch den Schwerverkehr) und 3,75 m annehmen kann, sind viele unterschiedliche Kombinationen von Fahrstreifenbreiten möglich. Auch wenn in der Regel bestimmte Kombinationen deutlich häufiger auftreten als andere, kann es praktikabel sein, die Gesamtquerschnittsbreite in mehrere Klassen einzuordnen. Eine andere Möglichkeit ist die Bewertung der Fahrstreifenbreite ausschließlich in Abhängigkeit von dem Fahrstreifen mit der geringsten Breite oder eine Einzelbetrachtung jedes Fahrstreifens, wie es bei dem Kapazitätsmodell im Leitfaden zum Arbeitsstellenmanagement auf Bundesautobahnen (BMVBS, 2011b) der Fall ist.

Bild 5-6 zeigt die ermittelten Kapazitäten für alle analysierten Arbeitsstellen mit zwei Behelfsfahrstreifen in der betrachteten Fahrtrichtung in Abhängigkeit von der kleinsten Fahrstreifenbreite. Dabei ist kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Fahrstreifenbreite und der Kapazität zu erkennen. Auch bei einer differenzierten Betrachtung der Lage im Netz (innerhalb oder außerhalb von Ballungsräumen) und unter Berücksichtigung von Überleitungen, Fahrbahnteilungen und Fahrstreifenreduktionen ergibt sich kein eindeutiger Zusammenhang. Nur bei der geringsten zulässigen Fahrstreifenbreite von 2,50 m ist die Kapazität erkennbar niedriger als bei den übrigen Fahrstreifenbreiten. Hier ist auch die Bandbreite der Kapazitäten mit Werten zwischen 2.650 und 3.600 Kfz/h sehr hoch, wobei alle niedrigen Werte für Autobahnen außerhalb von Ballungsräumen ermittelt wurden. Die Einflüsse des SV-Anteils und der Steigung werden in der Darstellung allerdings noch nicht berücksichtigt. Wird statt der kleinsten Fahrstreifenbreite die Gesamtfahrbahnbreite betrachtet, ergibt sich ein vergleichbares Bild.

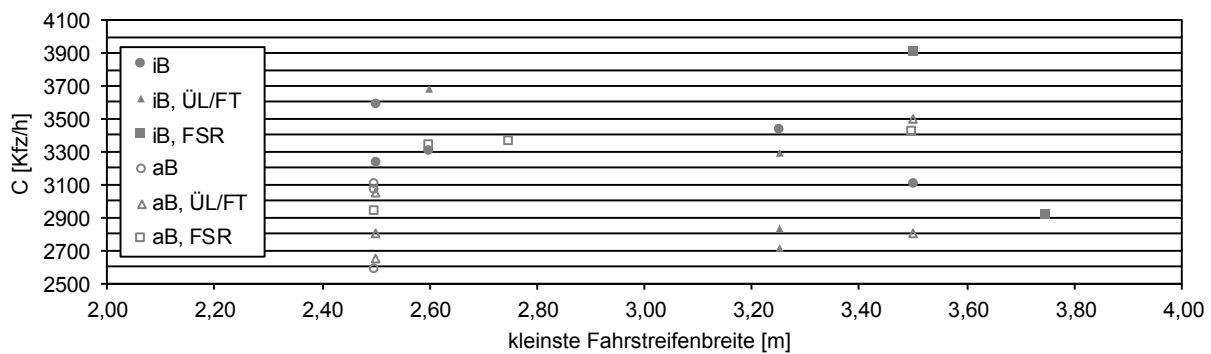


Bild 5-6: Darstellung der ermittelten Kapazitäten in Abhängigkeit von der kleinsten Fahrstreifenbreite unter Berücksichtigung der Lage innerhalb oder außerhalb von Ballungsräumen (iB/aB), des Vorhandenseins einer Überleitung (ÜL) und/oder Fahrbahnteilung (FT) und Fahrstreifenreduktion (FSR) für alle analysierten Arbeitsstellen mit zweistreifiger Richtungsverkehrsführung

Zulässige Höchstgeschwindigkeiten

In Arbeitsstellen wird die zulässige Höchstgeschwindigkeit in der Regel auf 60 km/h oder 80 km/h beschränkt. Dabei sollen 80 km/h im Normalfall und 60 km/h nur in Ausnahmefällen angeordnet werden (vgl. Kapitel 2.2). Dies spiegelt sich auch im Untersuchungskollektiv wider. Lediglich bei sechs der untersuchten Arbeitsstellen war eine Geschwindigkeitsbeschränkung auf 60 km/h angeordnet, darunter vier Arbeitsstellen mit dreistreifiger Richtungsverkehrsführung. Bild 5-7 zeigt alle ermittelten Kapazitäten für dreistreifige Richtungsverkehrsführungen in Abhängigkeit von der zulässigen Höchstgeschwindigkeit. Hier wird deutlich, dass die zulässige Höchstgeschwindigkeit keinen erkennbaren Einfluss auf die Kapazität hat. Daher wird die zulässige Höchstgeschwindigkeit in den Auswertungen nicht weiter betrachtet.

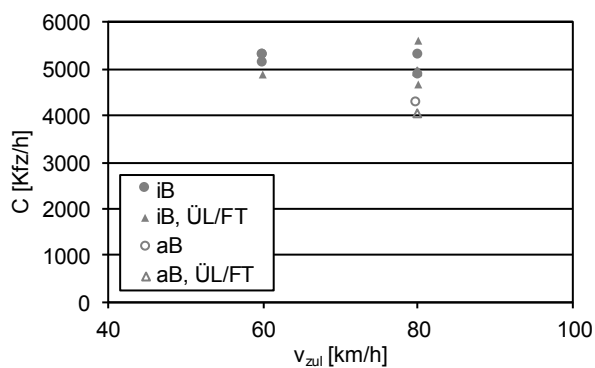


Bild 5-7: Darstellung der ermittelten Kapazitäten in Abhängigkeit von der zulässigen Höchstgeschwindigkeit unter Berücksichtigung der Lage innerhalb oder außerhalb von Ballungsräumen (iB/aB) und des Vorhandenseins einer Überleitung (ÜL) und/oder Fahrbahnteilung (FT) für alle analysierten Arbeitsstellen mit dreistreifiger Richtungsverkehrsführung

Anschlussstellen in der Arbeitsstelle

Das Vorhandensein von Anschlussstellen in einer Arbeitsstelle kann aus der verkehrsrechtlichen Anordnung entnommen werden. Bei entsprechend hohen Zuflussverkehrsströmen in der Anschlussstelle kann diese, neben dem Beginn der Arbeitsstelle, einen weiteren Engpass darstellen. Allerdings war die Datengrundlage der vorliegenden Untersuchung nicht für eine Analyse der Auswirkungen von Anschlussstellen geeignet, da innerhalb der analysierten Arbeitsstellen keine funktionierenden Zählstellen vorhanden waren.

Schwerverkehrsanteil in den Spitzenstunden

Der mittlere SV-Anteil in den Spitzenstunden kann aus den jeweiligen Zählstellendaten entnommen werden. Er wurde in Stufen von 2,5 % ermittelt und liegt für das vorliegende Untersuchungskollektiv zwischen 5 und 22,5 %. Bild 5-8 zeigt die ermittelten Kapazitäten für alle analysierten Arbeitsstellen mit zwei Behelfsfahrstreifen in der betrachteten Fahrtrichtung in Abhängigkeit vom SV-Anteil. Bei SV-Anteilen von bis zu 12,5 % bleibt die Kapazität in etwa auf demselben Niveau. Erst bei höheren SV-Anteilen ist ein deutlicher Rückgang der Kapazitäten zu erkennen.

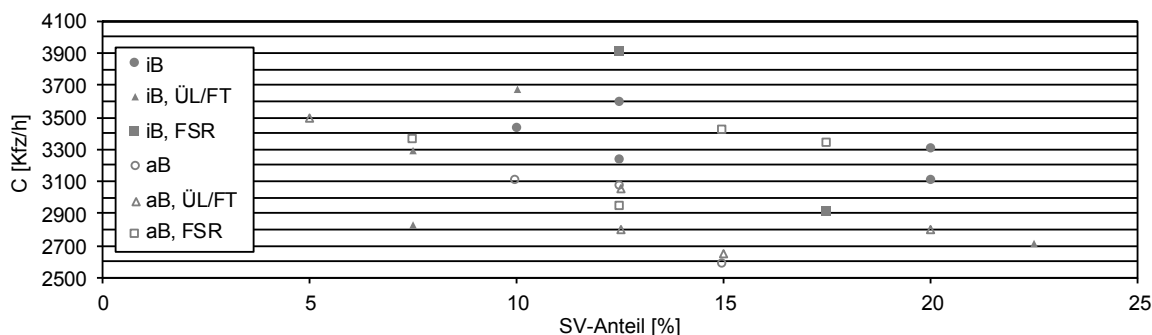


Bild 5-8: Darstellung der ermittelten Kapazitäten in Abhängigkeit vom SV-Anteil unter Berücksichtigung der Lage innerhalb oder außerhalb von Ballungsräumen (iB/aB), des Vorhandenseins einer Überleitung (ÜL) und/oder Fahrbahnteilung (FT) und Fahrstreifenreduktion (FSR) für alle analysierten Arbeitsstellen mit zweistreifiger Richtungsverkehrsführung

Fahrerkollektiv

Der Einfluss des Fahrerkollektivs wird entsprechend dem HBS (FGSV, 2015) anhand der Lage der Strecke innerhalb oder außerhalb von Ballungsräumen berücksichtigt. Die Ballungsraumzuordnung erfolgt nach der Definition, die für das Verkehrsanalysesystem (GEISTEFELDT und HOHMANN, 2014) festgelegt wurde. Bild 5-6 und Bild 5-8 zeigen, dass die Kapazitäten der Arbeitsstellen außerhalb von Ballungsräumen erwartungsgemäß tendenziell unterhalb der Kapazitäten der Arbeitsstellen innerhalb von Ballungsräumen liegen.

Längsneigung

Für die Bewertung des Einflusses der Längsneigung auf die Kapazität von Arbeitsstellen sind genaue Daten zum Gradientenverlauf im Bereich der Arbeitsstelle erforderlich, die jedoch häufig nicht verfügbar sind. Zudem können in Abhängigkeit von der Lage von Steigungsabschnitten relativ zu den einzelnen Bereichen der Arbeitsstelle (z. B. Fahrstreifenreduktion, Überleitung oder Verschwenkung, Innenbereich) verschiedene Engpässe innerhalb der Arbeitsstelle wirksam werden, die nicht in einem einfach handhabbaren Kapazitätsmodell abgebildet werden können. Die Bewertung des Einflusses von Steigungen auf die Kapazität der untersuchten Arbeitsstellen erfolgte daher nur überschlägig anhand einer Einschätzung der maximalen Längsneigung im Arbeitsstellenbereich. Insgesamt wurden 10 Arbeitsstellen mit Steigungen von mehr als 2 % identifiziert.

Bild 5-9 zeigt die ermittelten Kapazitäten in Abhängigkeit von der Längsneigung. Es ist ein Rückgang der Kapazität mit zunehmender Steigung zu erkennen. Allerdings nimmt auch die Anzahl der Einzelwerte mit zunehmender Steigung deutlich ab.

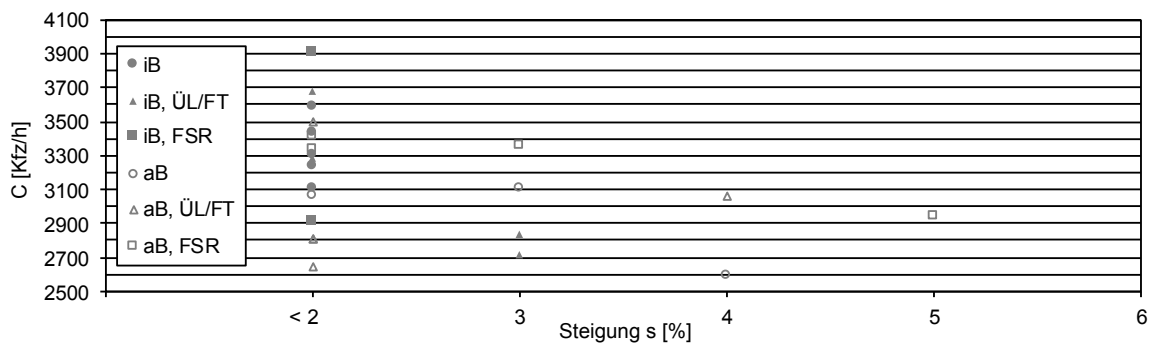


Bild 5-9: Darstellung der ermittelten Kapazitäten in Abhängigkeit von der Steigung unter Berücksichtigung der Lage innerhalb oder außerhalb von Ballungsräumen (iB/aB), des Vorhandenseins einer Überleitung (ÜL) und/oder Fahrbahnteilung (FT) und Fahrstreifenreduktion (FSR) für alle analysierten Arbeitsstellen mit zweistreifiger Richtungsverkehrsführung

Zusammenfassung

Insgesamt werden sieben Größen zur Prüfung ihres Einflusses auf die Kapazität herangezogen. Dabei handelt es sich um die verkehrs- und umfeldspezifischen Parameter

- Lage im Netz (innerhalb oder außerhalb von Ballungsräumen),
- Steigung und
- SV-Anteil

sowie die arbeitsstellenspezifischen Parameter

- Fahrstreifenbreite,
- Überleitung,
- Fahrbahnteilung und
- Fahrstreifenreduktion.

5.1.5 Ableitung von standardisierten Kapazitäten

Zur Ableitung von standardisierten Kapazitätswerten kommen grundsätzlich verschiedene Möglichkeiten in Frage. Zum einen ist eine Darstellung von Kapazitätstabellen, ähnlich wie im HBS (FGSV, 2015), denkbar. Dabei ist jedoch die Anzahl möglicher Einflussgrößen auf die Kapazität von Arbeitsstellen zu berücksichtigen, die deutlich über der Anzahl der Einflussgrößen auf der freien Strecke liegt. Zudem werden trotz des verhältnismäßig großen Untersuchungskollektivs viele Parameterkombinationen nicht oder nicht ausreichend abgedeckt. Aus diesem Grund bietet sich eher ein Verfahren mit Abminderungsfaktoren an, vergleichbar mit dem Kapazitätsmodell der RBAP (BMV, 1996), das mit angepassten Parametern auch im Leitfaden zum Arbeitsstellenmanagement auf Bundesautobahnen (BMVBS, 2011b) vorgegeben wird. Dieses ermöglicht die modellbasierte Ermittlung von Kapazitäten, die mit den empirisch ermittelten Kapazitäten verglichen werden können. Mit Hilfe von Optimierungsverfahren können dann die einzelnen Abminderungsfaktoren so angepasst werden, dass die Abweichung zwischen den empirischen Kapazitäten und den modellbasiert ermittelten Werten möglichst gering wird.

In einem ersten Schritt wurden hierzu die empirischen Kapazitäten mit den nach dem Verfahren aus dem Leitfaden zum Arbeitsstellenmanagement auf Bundesautobahnen (BMVBS, 2011b, nachfolgend vereinfachend als „RBAP-Verfahren“ bezeichnet) ermittelten

Kapazitäten verglichen. Das RBAP-Verfahren berücksichtigt die Fahrstreifenbreite (in zwei Klassen), die Ortskundigkeit der Verkehrsteilnehmer, das Vorhandensein einer Fahrstreifenreduktion und das Vorhandensein einer Überleitung. Die Steigung und der SV-Anteil werden durch eine Anpassung der Verkehrsnachfrage berücksichtigt, sodass die Kapazität in Pkw-E/h angegeben wird. Da die empirisch ermittelten Kapazitäten in Kfz/h vorliegen und auch die Eingangswerte im HBS (FGSV, 2015) und im geplanten Verkehrsanalysesystem des Bundes in Kfz/h angegeben werden, wird im Rahmen der folgenden Betrachtungen die Kapazität stets nach folgender Formel umgerechnet:

$$C = \frac{C_{PE}}{(1 + b_{SV}/100 \cdot (f_G - 1))} \quad (5-1)$$

mit:

C = Kapazität [Kfz/h]

C_{PE} = Kapazität [Pkw-E/h]

b_{SV} = SV-Anteil in der Spitzenstunde [%]

f_G = längsneigungsabhängiger Geländefaktor [-]

Tabelle 5-3 enthält für alle untersuchten Arbeitsstellen die empirisch und die nach dem RBAP-Verfahren ermittelten Kapazitäten in Kfz/h. Zusätzlich ist jeweils die Differenz der empirisch ermittelten Kapazität zur Kapazität nach dem RBAP-Verfahren angegeben. Es wird deutlich, dass die Kapazitäten sowohl in positive als auch in negative Richtung zum Teil stark abweichen. Die mittlere Abweichung beträgt zwar nur 3,5 %, die mittlere absolute Abweichung jedoch 8,6 %. Bild 5-10 zeigt ergänzend für alle Arbeitsstellen mit zwei- und dreistreifigen Richtungsverkehrsführungen eine Gegenüberstellung der empirisch und modellbasiert ermittelten Kapazitäten. Auffällig ist insbesondere der hohe Anteil an Arbeitsstellen, für die das RBAP-Verfahren zu geringe Werte liefert. Eine nähere Betrachtung der verschiedenen Einflussgrößen ergibt, dass bis auf zwei Ausnahmen für alle Arbeitsstellen mit Fahrstreifenreduktion deutlich höhere Kapazitäten ermittelt wurden. Dies zeigt, dass die Fahrstreifenreduktion, die im RBAP-Verfahren mit einem Abminderungsfaktor von 0,95 berücksichtigt wird, tatsächlich keinen oder einen deutlich geringeren Einfluss auf die Kapazität hat. Zudem fällt auf, dass die empirisch ermittelten Kapazitäten insbesondere bei hohen SV-Anteilen und Steigungen über 2 % bei ansonsten weitgehend identischen Randbedingungen besonders stark variieren. Dadurch treten in den Abweichungen zum RBAP-Verfahren erhebliche Bandbreiten von hohen negativen bis hohen positiven Werten auf. Die verschiedenen Ausprägungen der Einflussgrößen Fahrstreifenanzahl, Lage im Netz, Fahrstreifenbreite und Vorhandensein übergeleiteter Fahrstreifen verteilen sich hingegen relativ gleichmäßig über alle Bereiche.

Arbeitsstellen-ID	Lage	Steigung s [%]	SV-Anteil b_{sv} [%]	Verkehrsführung	n_{FS} [-]	$n_{FS,ü}$ [-]	b_{FS} [m]	Fahstreifen- reduktion	C_{RBAP} [Kfz/h]	C_N [Kfz/h]	Differenz [%]
BY 2014_001	aB	3	7,5	2+4s	3	1	3,25/3,00/3,75	nein	5.022	4.057	-19,2
NW 2011_636a	iB	3	7,5	1+4	2	1	3,25/3,25	nein	3.320	2.828	-14,8
NW 2012_634	iB	< 2	17,5	2+2	2	0	3,75/3,75	ja*	3.197	2.909	-9,0
NW 2011_636b	iB	3	22,5	1+4	2	1	3,25/3,25	nein	2.913	2.707	-7,1
RP 2014_001a	aB	4	15,0	4s+0	2	0	3,25/2,50	nein	2.778	2.581	-7,1
NW 2011_641	iB	< 2	20,0	2s+3	2	0	3,50/3,50	nein	3.327	3.103	-6,7
RP 2012_001	aB	< 2	15,0	0+4s	2	2	3,25/2,50	nein	2.823	2.646	-6,3
NW 2010_639	iB	< 2	7,5	1+3s	2	1	3,75/3,25	nein	3.440	3.287	-4,4
NW 2010_291	iB	< 2	12,5	2+4s	3	1	3,25/2,50/3,00	nein	4.879	4.668	-4,3
NW 2012_657	iB	< 2	12,5	2+4s	3	1	3,60/3,00/3,25	nein	5.081	4.875	-4,1
NW 2010_404	iB	< 2	12,5	2s+2s	2	0	3,25/2,50	nein	3.341	3.239	-3,1
HE 2012_401	aB	< 2	15,0	4s+2	3	0	3,25/3,00/2,60	nein	4.210	4.088	-2,9
HE 2001_005	iB	< 2	10,0	6s+0	3	0	3,25/2,50/2,50	nein	5.019	4.879	-2,8
NW 2012_654	iB	< 2	10,0	4s+2	3	0	3,25/3,00/2,75	nein	5.229	5.117	-2,1
RP 2014_001b	aB	< 2	12,5	0+4s	2	2	3,25/2,50	nein	2.857	2.804	-1,9
NW 2011_519	iB	< 2	10,0	4s+0	2	0	3,50/3,25	nein	3.486	3.435	-1,4
NI 2012_003	aB	< 2	20	1+3	2	1	3,75/3,25	ja	2.774	2.800	0,9
NW 2010_296	iB	< 2	10,0	3+3	3	0	3,25/3,00/2,75	nein	5.229	5.301	1,4
NW 2011_517	iB	< 2	10,0	3+3	3	0	3,25/3,00/2,75	nein	5.229	5.318	1,7
RP 2012_002	aB	< 2	12,5	4s+0	2	0	3,25/2,50	nein	3.007	3.063	1,9
NW 2011_632	iB	< 2	20,0	2+3n	2	0	3,25/2,60	nein	3.227	3.308	2,5
HE 2012_387b	iB	< 2	12,5	4+4	4 (3+TSF)	0	3,25/3,25/3,00/3,00	nein	6.889	7.180	4,2
HE 2001_003	iB	< 2	10,0	3+3n	3	0	3,25/2,50/2,50	nein	5.019	5.321	6,0
HE 2009_185	iB	< 2	10,0	4+4	4 (3+TSF)	0	3,25/3,25/2,75/2,75	nein	6.971	7.413	6,3
RP 2014_002	aB	3	10,0	2+2	2	0	3,25/2,50	nein	2.905	3.100	6,7
HE 2012_388	aB	< 2	10,0	2+4s	3	1	3,25/2,75/3,50	nein	4.627	4.943	6,8
HE 2012_387a	iB	< 2	12,5	4+4	4 (3+TSF)	0	3,25/3,25/3,00/3,00	nein	6.889	7.373	7,0
NW 2011_647	iB	< 2	12,5	3s+1	2	0	3,25/2,50	nein	3.341	3.590	7,4
NW 2012_644	iB	< 2	10,0	0+4s	2	2	3,25/2,60	nein	3.212	3.681	14,6
RP 2012_003	aB	5	12,5	4s+0	2	0	3,25/2,50	ja	2.556	2.937	14,9
HE 2013_001	aB	3	7,5	5s+0	2	0	3,25/2,75	ja	2.911	3.354	15,2
NI 2012_001	aB	< 2	15,0	3+1	2	0	3,75/3,50	ja	2.911	3.412	17,2
HE 2001_002	iB	< 2	10,0	0+6s	3	3	3,25/2,50/2,50	nein	4.748	5.593	17,3
NI 2012_002	aB	< 2	5,0	1+3	2	1	3,75/3,50	ja	2.977	3.500	17,6
RP 2013_001	aB	4	12,5	0+4s	2	2	3,25/2,50	ja	2.563	3.054	19,1
NW 2012_805	aB	3	7,5	1+2	1	0	3,75	ja	1.455	1.739	19,5
NW 2010_706	iB	< 2	12,5	2+2	2	0	3,50/3,50	ja	3.272	3.910	19,5
NW 2012_620	aB	< 2	17,5	2s+3n	2	0	3,00/2,60	ja	2.705	3.334	23,3

* modifiziertes Reißverschlussverfahren

Tab. 5-3: Vergleich der empirisch ermittelten Kapazitäten (C_N) mit den Kapazitäten nach dem Verfahren im Leitfaden zum Arbeitsstellenmanagement auf Bundesautobahnen (BMVBS, 2011b) (C_{RBAP})

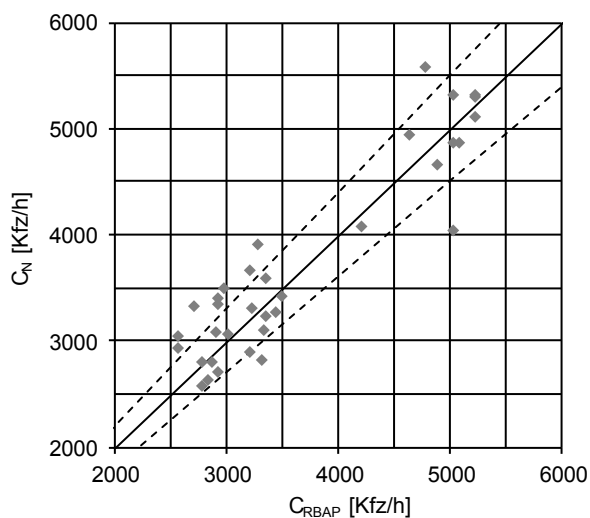


Bild 5-10: Gegenüberstellung der empirisch ermittelten Kapazitäten (C_N) mit den Werten nach dem Verfahren im Leitfaden zum Arbeitsstellenmanagement auf Bundesautobahnen (BMVBS, 2011b) (C_{RBAP}) für alle analysierten Arbeitsstellen mit zwei- und dreistreifigen Richtungsverkehrsführungen (gestrichelte Linien kennzeichnen eine Abweichung von 10 %)

Für die Herleitung von standardisierten Kapazitätswerten wurde das Grundprinzip des RBAP-Verfahrens, mehrere Abminderungsfaktoren multiplikativ zu verknüpfen, beibehalten. Die Kapazitäten wurden für jeden Fahrstreifen einzeln ermittelt und dann aufsummiert. Die Kapazitäten der einzelnen Fahrstreifen unterscheiden sich nur durch die Fahrstreifenbreite. Alle weiteren Faktoren gelten für alle Fahrstreifen. Im Gegensatz zum RBAP-Verfahren existiert allerdings nur eine Grundkapazität. Die Fahrstreifenbreite wurde genauso wie die Einflussgrößen Lage im Netz, Überleitung, Fahrbahntrennung und Fahrstreifenreduktion durch Abminderungsfaktoren berücksichtigt. Die Grundkapazität wurde als weitere Variable festgelegt. Für alle Einflussgrößen mit nur zwei unterschiedlichen Ausprägungen (z. B. iB/aB, ja/nein) wurde jeweils die Ausprägung, die tendenziell die Kapazität verringert, als Variable aufgefasst. Die jeweils andere Ausprägung erhielt pauschal den Faktor 1.

Für die Festlegung des Abminderungsfaktors zur Berücksichtigung einer Fahrbahnteilung wurde zwischen zweistreifigen sowie drei- oder vierstreifigen Richtungsverkehrsführungen unterschieden. Da die strategischen Fahrstreifenwechsel im Zulauf zur Arbeitsstelle zwischen den beiden Fahrstreifen links und rechts der Fahrbahnteilung erfolgen, sind bei zweistreifigen Richtungsverkehrsführungen alle Fahrstreifen, bei drei- oder vierstreifigen Richtungsverkehrsführungen hingegen nur ein Teil der Fahrstreifen von den Fahrstreifenwechseln betroffen, woraus möglicherweise ein unterschiedlicher Einfluss der Fahrbahnteilung auf die Kapazität resultiert. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnten dabei nur Arbeitsstellen mit den Verkehrsführungen 1+3 und 2+4 miteinander verglichen werden, da keine Arbeitsstellen mit 1+5-Verkehrsführung oder vierstreifigen Richtungsverkehrsführungen im Untersuchungskollektiv enthalten waren.

Da die Differenz zwischen der Fahrstreifenbreite der Regelquerschnitte nach den RAA (2008) und der Behelfsfahrstreifenbreite nach den RSA (BMV, 1995) für Hauptfahrstreifen mit 0,25 bis 0,50 m relativ gering ist, wurde nur zwischen zwei Klassen ($b_{FS,Lkw} < 3,25$ m und $b_{FS,Lkw} \geq 3,25$ m) unterschieden. Für Fahrstreifen, die ausschließlich von Pkw genutzt werden, kann die Spanne zwischen den Fahrstreifenbreiten der Regelquerschnitte und der Behelfsfahrstreifenbreite in Arbeitsstellen jedoch bis zu 1,25 m betragen. Aus diesem Grund wurden hier zwei Zwischenklassen eingeführt. Es wurde unterschieden zwischen sehr stark verengten Fahrstreifen mit einer Breite $b_{FS,Pkw} < 2,60$ m, stark verengten Fahr-

streifen mit einer Breite $2,60 \text{ m} \leq b_{\text{FS},\text{Pkw}} < 2,75 \text{ m}$, verengten Fahrstreifen mit einer Breite $2,75 \text{ m} \leq b_{\text{FS},\text{Pkw}} < 3,00 \text{ m}$ sowie gering oder nicht verengten Fahrstreifen mit einer Breite $b_{\text{FS},\text{Pkw}} \geq 3,00 \text{ m}$. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Breitenklassen ausschließlich durch Werte am unteren Ende der jeweiligen Bandbreite (2,50 m, 2,60 m, 2,75 m, 3,00 m) im Untersuchungskollektiv repräsentiert sind, da Zwischenwerte in den Behelfsfahrstreifenbreiten bei den analysierten Arbeitsstellen nicht auftraten. Die Fälle $b_{\text{FS},\text{Lkw}} < 3,25 \text{ m}$ und $b_{\text{FS},\text{Pkw}} < 2,60 \text{ m}$ wurden als vergleichbar hinsichtlich des Ausmaßes der Einengung betrachtet und einer gemeinsamen Klasse zur Ermittlung der Abminderungsfaktoren zugeordnet. Dabei ist allerdings zu beachten, dass nur eine Arbeitsstelle im Untersuchungskollektiv einen von Lkw genutzten Fahrstreifen mit einer Breite unter 3,25 m aufweist, sodass der Einfluss auf die Kapazität nicht valide beurteilt werden konnte. Alle Fahrstreifenbreiten $b_{\text{FS},\text{Lkw}} \geq 3,25 \text{ m}$ und $b_{\text{FS},\text{Pkw}} \geq 3,00 \text{ m}$ erhielten pauschal den Faktor 1.

Zur Berücksichtigung der Einflussgrößen SV-Anteil und Längsneigung im Kapazitätsmodell wurden zwei verschiedene Modellansätze getestet. In beiden Modellen wurden – in Anlehnung an das RBAP-Verfahren – der Einfluss des SV-Anteils kontinuierlich und der Einfluss der Längsneigung anhand einer Unterscheidung von drei Steigungsklassen ($s \leq 2\%$, $2\% < s \leq 4\%$ und $s > 4\%$) berücksichtigt. Der höchsten Steigungsklasse konnte nur eine Arbeitsstelle des Untersuchungskollektivs zugeordnet werden. Da diese Arbeitsstelle eine höhere Kapazität als die Arbeitsstellen in der mittleren Steigungsklasse aufwies und dementsprechend kein sinnvoller Gelände- oder Abminderungsfaktor ermittelbar war, wurde diese Arbeitsstelle aus den weiteren Betrachtungen ausgeschlossen. Somit konnten in beiden Fällen nur Parameter für Steigungen $s \leq 2\%$ und $2\% < s \leq 4\%$ ermittelt werden.

Im ersten Modell wurde die Gleichung (5-1) zur Umrechnung von Pkw-E/h in Kfz/h aus dem RBAP-Verfahren beibehalten. Die Einflussgrößen SV-Anteil und Längsneigung wurden dementsprechend abhängig voneinander betrachtet. Der von der Steigungsklasse abhängige Geländefaktor f_G wird dabei mit dem SV-Anteil multipliziert und entspricht somit einem Pkw-Gleichwert. Im Rahmen der Analysen wurden die Geländefaktoren für beide betrachteten Steigungsklassen unabhängig voneinander als Variablen aufgefasst. Es ergibt sich somit für jeden Fahrstreifen folgendes Kapazitätsmodell:

$$C_{\text{FS},i} = \frac{G \cdot f_{\text{aB}} \cdot f_{\text{ÜL}} \cdot f_{\text{FT}} \cdot f_{\text{FSR}} \cdot f_{\text{b},i}}{1 + b_{\text{SV}}/100 \cdot (f_G - 1)} \quad (5-2)$$

mit:

$C_{\text{FS},i}$ = Kapazität des Fahrstreifens i [Kfz/h/FS]

G = Grundkapazität eines Fahrstreifens [Pkw-E/h/FS]

f_{aB} = Faktor für den Einfluss der Lage im Netz (innerhalb oder außerhalb von Ballungsräumen) [-]

$f_{\text{ÜL}}$ = Faktor für das Vorhandensein einer Überleitung [-]

f_{FT} = Faktor für das Vorhandensein einer Fahrbahnteilung [-]

f_{FSR} = Faktor für das Vorhandensein einer Fahrstreifenreduktion [-]

$f_{\text{b},i}$ = Faktor für den Einfluss der Fahrstreifenbreite (in drei Klassen) für den Fahrstreifen i [-]

b_{SV} = SV-Anteil an der Gesamtverkehrsstärke der Fahrtrichtung [%]

f_G = Längsneigungsabhängiger Geländefaktor (in drei Klassen) [-]

Das erste Modell unterstellt eine direkte Abhängigkeit von SV-Anteil und Steigung in ihrer Wirkung auf die Kapazität. In einem zweiten Modell wurden diese beiden Einflussgrößen dagegen als voneinander unabhängig angenommen. Hierzu wurde der Einfluss der Steigung, genauso wie die Lage im Netz oder die Fahrbahnbreite, über einen Abminderungsfaktor im Zähler der Gleichung berücksichtigt. Der SV-Anteil wurde wie im ersten Modell berücksichtigt, wobei der Pkw-Gleichwert f_{PE} als weitere Variable unabhängig von der Steigung festgelegt wurde. Das zugehörige Kapazitätsmodell lautet:

$$C_{FS,i} = \frac{G \cdot f_{aB} \cdot f_{ÜL} \cdot f_{FT} \cdot f_{FSR} \cdot f_{b,i} \cdot f_s}{1 + b_{SV}/100 \cdot (f_{PE} - 1)} \quad (5-3)$$

mit:

$C_{FS,i}$	= Kapazität des Fahrstreifens i	[Kfz/h/FS]
G	= Grundkapazität eines Fahrstreifens	[Pkw-E/h/FS]
f_{aB}	= Faktor für den Einfluss der Lage im Netz (innerhalb oder außerhalb von Ballungsräumen)	[-]
$f_{ÜL}$	= Faktor für das Vorhandensein einer Überleitung	[-]
f_{FT}	= Faktor für das Vorhandensein einer Fahrbahnteilung	[-]
f_{FSR}	= Faktor für das Vorhandensein einer Fahrstreifenreduktion	[-]
$f_{b,i}$	= Faktor für den Einfluss der Fahrstreifenbreite (in drei Klassen) für den Fahrstreifen i	[-]
f_s	= Faktor für den Einfluss der Längsneigung (in drei Klassen)	[-]
b_{SV}	= SV-Anteil an der Gesamtverkehrsstärke der betrachteten Fahrtrichtung	[%]
f_{PE}	= Pkw-Gleichwert	[-]

Um eine möglichst gute Anpassung aller Kapazitäten zu erreichen und mögliche Parameter ohne maßgebenden Einfluss auf die Kapazität auszuschließen, erfolgte eine Optimierung durch Minimierung der Fehlerquadrate. Hierfür wurden die prozentualen Abweichungen zwischen den empirisch und modellbasiert ermittelten Kapazitäten quadriert, aufsummiert und über die Einflussfaktoren minimiert.

Für beide untersuchten Modelle wurden alle festgelegten Variablen mithilfe der Solver-Funktion in MS Excel gleichzeitig optimiert. Der Lösungsraum wurde dabei nur dadurch eingeschränkt, dass als Obergrenze für die Abminderungsfaktoren jeweils der Wert 1 festgelegt wurde. Erhielt ein Abminderungsfaktor im Optimierungsablauf den Wert 1 zugeordnet, so konnte davon ausgegangen werden, dass durch diese Einflussgröße die Kapazität nicht reduziert wird. Außerdem wurde der Wert der Grundkapazität auf höchstens 2.000 Pkw-E/h begrenzt. Hiermit wurde sichergestellt, dass die Kapazität einer Arbeitsstelle in den meisten Fällen keine höheren Werte annehmen kann als die Kapazität auf der freien Strecke nach dem HBS (FGSV, 2015). Die Annahme einer höheren Arbeitsstellenkapazität wäre vor allem für die Anwendung im Verkehrsanalyzesystem nicht plausibel, da in diesem Fall aus der Einrichtung einer Arbeitsstelle eine erhöhte Kapazität resultieren könnte. Würde die Grundkapazität nicht auf 2.000 Pkw-E/h begrenzt, ergäben sich für die untersuchten Modelle höhere Werte mit entsprechend höheren Pkw-Gleichwerten bzw. Geländefaktoren. Die Auswirkungen auf die Optimierungsgüte werden nachfolgend noch beschrieben. Die Ergebnisse der Optimierung für beide Modelle mit den genannten Randbedingungen sind in Tabelle 5-4 und Tabelle 5-5 dargestellt.

Parameter	Faktor	Ausprägung	variabel/konstant	Wert/Faktor
Grundkapazität	G	-	variabel	2.000
Lage im Netz	f_{aB}	innerhalb von Ballungsräumen (iB)	konstant	1,000
		außerhalb von Ballungsräumen (aB)	variabel	0,941
Überleitung	$f_{ÜL}$	nein	konstant	1,000
		ja	variabel	0,984
Fahrbahnteilung	f_{FT}	nein	konstant	1,000
		ja, Richtungsverkehrsführung mit 2 FS	variabel	0,919
		ja, Richtungsverkehrsführung mit > 2 FS	variabel	0,915
Fahrstreifenreduktion	f_{FSR}	nein	konstant	1,000
		ja	variabel	1,000
Fahrstreifenbreite	$f_{b,i}$	$b_{FS,Pkw} \geq 3,00 \text{ m}$ und $b_{FS,Lkw} \geq 3,25 \text{ m}$	konstant	1,000
		$2,75 \leq b_{FS,Pkw} < 3,00 \text{ m}$	variabel	1,000
		$2,60 \leq b_{FS,Pkw} < 2,75 \text{ m}$	variabel	1,000
		$b_{FS,Pkw} < 2,60 \text{ m}$ und $b_{FS,Lkw} < 3,25 \text{ m}$	variabel	0,936
Steigung/SV-Anteil	f_G	$s \leq 2 \%$	variabel	2,101
		$2 \% < s \leq 4 \%$	variabel	3,015
		$s > 4 \%$	variabel	– 1)
Summe der Fehlerquadrate				0,164
Mittelwert der absoluten Abweichungen [%]				5,66
¹⁾ Da nur eine Arbeitsstelle mit einer Längsneigung von 5 % vorlag und in diesem Einzelfall die empirisch ermittelte Kapazität höher war als die Werte in der Klasse $2 \% < s \leq 4 \%$, war eine plausible Ermittlung eines Geländefaktors nicht möglich. Die Arbeitsstelle wurde aus der Optimierung ausgeschlossen.				

Tab. 5-4: Ergebnisse der Optimierung für das Modell mit Geländefaktoren, die konstanten Werte sind grau hinterlegt

Anhand der Summe der Fehlerquadrate und der Mittelwerte der absoluten Abweichungen für beide untersuchten Modelle wird deutlich, dass die Ergebnisse hinsichtlich der Qualität der Optimierung beinahe identisch sind. Auch die Werte der Abminderungsfaktoren, welche nicht die Steigung betreffen, sind vergleichbar. Die Abweichungen zwischen den modellbasiert und empirisch ermittelten Kapazitäten bei ausschließlicher Betrachtung des Untersuchungskollektivs mit Steigungen $s > 2 \%$ sind im zweiten Modell etwas geringer als im ersten Modell. Die in den RBAP vorausgesetzte Abhängigkeit zwischen dem SV-Anteil und der Steigung ist somit anhand des Untersuchungskollektivs nicht nachweisbar, wird aber auch nicht eindeutig widerlegt. Da die Einflüsse der Steigung und des SV-Anteils auf die Kapazität im HBS (FGSV, 2015) unabhängig voneinander berücksichtigt werden und die Optimierung kein gegensätzliches Ergebnis lieferte, wurde das zweite Modell nach Gleichung (5-2) für die weiteren Analysen ausgewählt.

Anhand der in Tabelle 5-5 dargestellten Ergebnisse für das zweite Modell ist zu erkennen, dass das Vorhandensein einer Fahrstreifenreduktion – über die Reduzierung der Fahrstreifenanzahl hinaus – keinen Einfluss auf die Kapazität hat. Durch eine Überleitung reduziert sich die Kapazität nur um weniger als 2 %. Demgegenüber ist das Vorhandensein einer Fahrbahnteilung eine wesentliche Einflussgröße. Dabei ist ein gewisser Unterschied zwischen Richtungsverkehrsführungen mit zwei Fahrstreifen und mehr als zwei Fahrstreifen erkennbar. Sehr stark verengte Fahrstreifen mit einer Breite von weniger als 2,60 m für Pkw bzw. weniger als 3,25 m für Lkw haben ebenfalls einen deutlichen Einfluss auf die Kapazität, für Fahrstreifen mit Breiten ab 2,60 m für den Pkw-Verkehr ergibt sich für das Untersuchungskollektiv hingegen keine Abminderung der Kapazität über die Grundkapazität hinaus.

Parameter	Faktor	Ausprägung	variabel/konstant	Wert/Faktor
Grundkapazität	G	-	variabel	2.000
Lage im Netz	f_{aB}	innerhalb von Ballungsräumen (iB)	konstant	1,000
		außerhalb von Ballungsräumen (aB)	variabel	0,954
Überleitung	$f_{ÜL}$	nein	konstant	1,000
		ja	variabel	0,983
Fahrbahnteilung	f_{FT}	nein	konstant	1,000
		ja, Richtungsverkehrsführung mit 2 FS	variabel	0,912
		ja, Richtungsverkehrsführung mit > 2 FS	variabel	0,919
Fahrstreifenreduktion	f_{FSR}	nein	konstant	1,000
		ja	variabel	1,000
Fahrstreifenbreite	$f_{b,i}$	$b_{FS,Pkw} \geq 3,00 \text{ m}$ und $b_{FS,Lkw} \geq 3,25 \text{ m}$	konstant	1,000
		$2,75 \leq b_{FS,Pkw} < 3,00 \text{ m}$	variabel	1,000
		$2,60 \leq b_{FS,Pkw} < 2,75 \text{ m}$	variabel	1,000
		$b_{FS,Pkw} < 2,60 \text{ m}$ und $b_{FS,Lkw} < 3,25 \text{ m}$	variabel	0,934
Steigung	f_s	$s \leq 2 \%$	konstant	1,000
		$2 \% < s \leq 4 \%$	variabel	0,905
		$s > 4 \%$	variabel	- 1)
SV-Anteil	f_{PE}	-	variabel	2,135
Summe der Fehlerquadrate				0,161
Mittelwert der absoluten Abweichungen [%]				5,61

¹⁾ Erläuterung siehe Tabelle 5-4

Tab. 5-5: Ergebnisse der Optimierung für das Modell mit einem Abminderungsfaktor für die Steigung, die konstanten Werte sind grau hinterlegt

Insbesondere am Beispiel des Einflusses der Überleitung wird deutlich, dass einzelne Arbeitsstellen des Untersuchungskollektivs das Ergebnis der Optimierung stark beeinflussen können. Tabelle 5-6 zeigt die Differenz zwischen der empirisch ermittelten Kapazität C_N und der Modellkapazität C_{mod} für alle betrachteten Arbeitsstellen mit einer Überleitung aller Fahrstreifen auf die Gegenfahrbahn. Dabei zeigt sich, dass die modellbasiert ermittelten Kapazitäten deutlich sowohl in positive als auch in negative Richtung von den empirisch ermittelten Kapazitäten abweichen. Der ermittelte Abminderungsfaktor von 0,983 für den Einfluss einer Überleitung ergibt sich im Wesentlichen durch die sehr niedrige Kapazität der Arbeitsstelle RP 2012_001. Würde diese aus dem Untersuchungskollektiv entfernt, ergäbe sich ein Faktor von 1,0. Somit wurde für das Kapazitätsmodell der Faktor gleich 1,0 gesetzt und damit angenommen, dass eine Überleitung von Fahrstreifen auf die Gegenfahrbahn keinen Einfluss auf die Kapazität hat.

Arbeitsstellen-ID	Verkehrsführung	n_{FS}	s [%]	Lage	b_{SV} [%]	C_{mod} [Kfz/h]	C_N [Kfz/h]	Differenz [%]
RP 2012_001	0+4s	2	≤ 2	aB	15,0	3.098	2.646	-14,6
RP 2014_001	0+4s	2	≤ 2	aB	12,5	3.174	2.804	-11,7
NW 2012_644	0+4s	2	≤ 2	iB	10,0	3.530	3.681	4,3
RP 2013_001	0+4s	2	4	aB	12,5	2.873	3.054	6,3
HE 2001_002	0+6s	3	≤ 2	iB	10,0	5.061	5.593	10,5

Tab. 5-6: Differenz zwischen der empirisch ermittelten Kapazität C_N und der Modellkapazität C_{mod} für alle Arbeitsstellen mit Überleitung

Wesentlich eindeutiger ist der Einfluss der Fahrbahnteilung. Tabelle 5-7 zeigt analog zu Tabelle 5-6 für alle betrachteten Arbeitsstellen mit einer Fahrbahnteilung die Differenz zwischen der empirisch ermittelten Kapazität C_N und dem Modellwert C_{mod} . Hierbei wird deutlich, dass für die Mehrzahl der Arbeitsstellen eine gute Anpassung der Kapazität an die empirisch ermittelten Kapazitäten gelingt. Einzelne Arbeitsstellen aus dem Untersuchungskollektiv haben hier geringere Auswirkungen auf den Abminderungsfaktor. Dies trifft auch auf die anderen betrachteten Abminderungsfaktoren zu.

Arbeitsstellen-ID	Verkehrsführung	n_{FS}	s [%]	Lage	b_{SV} [%]	C_{mod} [Kfz/h]	C_N [Kfz/h]	Differenz [%]
BY 2014_001	2+4s	3	3	aB	7,5	4.386	4.057	-7,5
NW 2011_636a	1+4	2	3	iB	7,5	3.041	2.828	-7,0
NW 2010_639	1+3s	2	≤ 2	iB	7,5	3.360	3.287	-2,2
NI 2012_003	1+3	2	≤ 2	aB	20	2.834	2.800	-1,2
NW 2012_657	2+4s	3	≤ 2	iB	12,5	4.829	4.875	1,0
NW 2010_291	2+4s	3	≤ 2	iB	12,5	4.616	4.668	1,1
NW 2011_636b	1+4	2	3	iB	22,5	2.629	2.707	3,0
HE 2012_388	2+4s	3	≤ 2	aB	10	4.723	4.943	4,6
NI 2012_002	1+3	2	≤ 2	aB	5	3.291	3.500	6,3

Tab. 5-7: Differenz zwischen der empirisch ermittelten Kapazität C_N und der Modellkapazität C_{mod} für alle Arbeitsstellen mit Fahrbahnteilung

Zur Festlegung der endgültigen Faktoren für das Kapazitätsmodell wurde in mehreren aufeinanderfolgenden Anpassungsschritten eine zunehmende Anzahl von gerundeten Abminderungsfaktoren konstant gehalten, um die Auswirkungen der Festlegungen einzelner Parameter auf die Modellgüte zu prüfen. Die einzelnen Anpassungsschritte sind im Folgenden dargestellt. Im ersten Schritt wurde dabei auch die Grundkapazität als Variable freigegeben, um die Veränderungen der Faktoren vollständig darzustellen.

- Anpassungsschritt 1: Die Grundkapazität und der Pkw-Gleichwert haben keine Beschränkung, alle Abminderungsfaktoren haben eine Obergrenze von 1,0.
- Anpassungsschritt 2: Die Grundkapazität wird auf 2.000 Pkw-E/h festgesetzt.
- Anpassungsschritt 3: Die Abminderungsfaktoren $f_{ÜL}$, f_{FSR} und $f_{b,i}$ für verengte und stark verengte Fahrstreifen ($b_{FS,Pkw} \geq 2,60$ m) werden auf 1,0 festgesetzt und der Pkw-Gleichwert wird zur Vereinfachung des Modells auf 2,0 gerundet.
- Anpassungsschritt 4: Die Abminderungsfaktoren aus dem Anpassungsschritt 3 werden – vor dem Hintergrund der erreichbaren Genauigkeit des Kapazitätsmodells – auf das Vielfache von 0,05 gerundet.
- Anpassungsschritt 5: Für die Faktoren f_{FT} für drei- und vierstreifige Richtungsfahrbahnen und $f_{b,i}$ für stark verengte Fahrstreifen mit $2,60 \leq b_{FS,Pkw} < 2,75$ m wird aus Plausibilitätsgründen jeweils der Wert 0,95 gewählt. Anhand der Ergebnisse in Anpassungsschritt 2 und 3 ist zu erkennen, dass die Kapazität durch eine Fahrbahnteilung bei dreistreifigen Richtungsverkehrsführungen etwas geringer reduziert wird als bei zweistreifigen Richtungsverkehrsführungen. Zudem konnten nur dreistreifige Verkehrsführungen mit einem übergeleiteten Fahrstreifen (Verkehrsführung 2+4) analysiert werden. Daher wird der Abminderungsfaktor Fahrbahnteilung für drei- und vierstreifige Verkehrsführungen aufgerundet. Durch die Anpassung des Faktors $f_{b,i}$ für stark verengte Fahrstreifen ergibt sich eine sinnvolle Zwischenstufe zwischen den Abminderungsfaktoren für sehr stark verengte und verengte Fahrstreifen.

Die Ergebnisse der einzelnen Anpassungsschritte sind in Tabelle 5-8 dargestellt. Die von vornherein auf 1,0 festgesetzten Faktoren werden hier aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht mehr dargestellt. Um die Veränderung der Modellgüte und die Eignung der ermittelten Werte für das Kapazitätsmodell genauer einschätzen zu können, werden verschiedene Kenngrößen angegeben:

- Summe der Fehlerquadrate der quadrierten prozentualen Abweichungen zwischen der empirisch ermittelten Kapazität und der Modellkapazität,
- Mittelwert der absoluten Abweichungen (Betrag der Differenz zwischen der empirisch ermittelten Kapazität und der Modellkapazität) in Prozent,
- Anzahl der Arbeitsstellen im Untersuchungskollektiv mit mehr als 10 % Abweichung zwischen der empirisch ermittelten Kapazität und der Modellkapazität,
- Median der Abweichungen zwischen der empirisch ermittelten Kapazität und der Modellkapazität in Prozent.

Parameter	Faktor	Ausprägung	AS1	AS2	AS3	AS4	AS5
Grundkapazität	G	-	2.103	2.000	2.000	2.000	2.000
Lage im Netz	f _{aB}	außerhalb von Ballungsräumen (aB)	0,950	0,954	0,946	0,95	0,95
Überleitung	f _{ÜL}	ja	0,978	0,983	1,000	1,00	1,00
Fahrbahnteilung	f _{FT}	ja, Richtungsverkehrsführung mit 2 FS	0,907	0,912	0,903	0,90	0,90
		ja, Richtungsverkehrsführung mit > 2 FS	0,911	0,919	0,915	0,90	0,95
Fahrstreifenreduktion	f _{FSR}	ja	1,000	1,000	1,000	1,00	1,00
Fahrstreifenbreite	f _{b,i}	2,75 ≤ b _{FS,pkw} < 3,00 m	1,000	1,000	1,000	1,00	1,00
		2,60 ≤ b _{FS,pkw} < 2,75 m	1,000	1,000	1,000	1,00	0,95
		b _{FS,pkw} < 2,60 m und b _{FS,Lkw} < 3,25 m	0,927	0,934	0,909	0,90	0,90
Steigung	f _s	2 % < s ≤ 4 %	0,901	0,905	0,903	0,90	0,90
SV-Anteil	f _{PE}	-	2,529	2,135	2,000	2,00	2,00
Summe der Fehlerquadrate [-]			0,155	0,161	0,165	0,167	0,176
Mittelwert der absoluten Abweichungen [%]			5,61	5,61	5,57	5,67	5,77
Anzahl Arbeitsstellen mit mehr als 10 % Abweichung			4	5	3	3	5
Median der Abweichungen [%]			1,6	1,1	-0,1	1,0	-1,3

Tab. 5-8: Ergebnisse für alle durchgeführten Anpassungsschritte (AS), die konstant gehaltenen oder gesetzten Werte sind grau hinterlegt

Für die einzelnen Anpassungsschritte ist zu erkennen, dass die Änderungen der verschiedenen Bewertungskenngrößen gering sind. In einzelnen Fällen ergibt sich zudem eine gegenläufige Entwicklung der Kenngrößen. Die größten Änderungen ergeben sich in den Anpassungsschritten, die mit dem Ziel der Konformität mit dem HBS (FGSV, 2015), der Modellvereinfachung oder einer Rundung der Abminderungsfaktoren durchgeführt wurden. Die Ergebnisse des letzten Anpassungsschrittes werden in das folgende Modell für die Ermittlung der Kapazität von Arbeitsstellen längerer Dauer übernommen:

$$C = \frac{G}{1 + b_{SV}/100} \cdot f_{aB} \cdot f_{FT} \cdot f_s \cdot \sum_{i=1}^n f_{b,i} \quad (5-4)$$

mit:

$$C = \text{Kapazität für die betrachtete Fahrtrichtung} \quad [\text{Kfz/h}]$$

G	= Grundkapazität für einen Fahrstreifen	[Pkw-E/h]
	= 2.000	
b_{SV}	= SV-Anteil an der Gesamtverkehrsstärke der betrachteten Fahrtrichtung	[%]
f_{aB}	= Faktor für den Einfluss der Lage im Netz	[-]
	= $\begin{cases} 1,00 & \text{für Arbeitsstellen innerhalb von Ballungsräumen (iB)} \\ 0,95 & \text{für Arbeitsstellen außerhalb von Ballungsräumen (aB)} \end{cases}$	
f_{FT}	= Faktor für den Einfluss einer Fahrbahnteilung (FT)	[-]
	= $\begin{cases} 1,00 & \text{für Arbeitsstellen ohne Fahrbahnteilung} \\ 0,95 & \text{für Arbeitsstellen mit Fahrbahnteilung und einer} \\ & \text{Richtungsverkehrsführung mit > 2 FS} \\ 0,90 & \text{für Arbeitsstellen mit Fahrbahnteilung und einer} \\ & \text{Richtungsverkehrsführung mit 2 FS} \end{cases}$	
f_s	= Faktor für den Einfluss der Längsneigung s	[-]
	= $\begin{cases} 1,00 & \text{für } s \leq 2 \% \\ 0,90 & \text{für } 2 \% < s \leq 4 \% \\ 0,80 & \text{für } s > 4 \% \end{cases}$	
n	= Anzahl der Behelfsfahrstreifen	[-]
$f_{b,i}$	= Faktor für den Einfluss der Fahrstreifenbreite für den Fahrstreifen i	[-]
	= $\begin{cases} 1,00 & \text{für } b_{FS,pkw,i} \geq 2,75 \text{ m und } b_{FS,Lkw,i} \geq 3,25 \text{ m} \\ 0,95 & \text{für } 2,60 \text{ m} \leq b_{FS,pkw,i} < 2,75 \text{ m} \\ 0,90 & \text{für } b_{FS,pkw,i} < 2,60 \text{ m und } b_{FS,Lkw,i} < 3,25 \text{ m} \end{cases}$	

Daraus resultieren z. B. für zweistreifige Richtungsverkehrsführungen bei einem SV-Anteil von 10 % und einer Längsneigung $s \leq 2 \%$ Kapazitäten zwischen 3.109 und 3.636 Kfz/h. Der Abminderungsfaktor für den Einfluss von Längsneigungen von mehr als 4 % beruht ausschließlich auf Plausibilitätsüberlegungen, da dieser, wie zuvor bereits beschrieben, nicht aus dem Untersuchungskollektiv abgeleitet werden konnte. Tabelle 5-9 enthält für alle untersuchten Arbeitsstellen die empirisch und die modellbasiert ermittelte Kapazität. Zusätzlich ist jeweils die prozentuale Differenz der empirisch ermittelten Kapazität zur Modellkapazität angegeben. Bild 5-11 zeigt ergänzend für alle Arbeitsstellen mit zwei- und dreistreifigen Richtungsverkehrsführungen eine Gegenüberstellung der empirisch und modellbasiert ermittelten Kapazitäten.

Durch die unterschiedlichen Verfahren zur Berücksichtigung des Schwerverkehrs in den Kapazitätstabellen im HBS (FGSV, 2015) und in dem hier entwickelten Modell für Arbeitsstellenkapazitäten kann es bei sehr niedrigen SV-Anteilen und breiten Fahrstreifen in Arbeitsstellen ohne Fahrbahnteilung vorkommen, dass die Kapazität einer Arbeitsstelle größer ist als die Kapazität der Strecke nach HBS (FGSV, 2015) im Zustand ohne Arbeitsstelle. Dies ist im Hinblick auf eine mögliche Homogenisierung des Verkehrsflusses durch die reduzierte Geschwindigkeit in der Arbeitsstelle nicht unrealistisch und konnte bereits für einzelne Arbeitsstellen empirisch ermittelt werden (vgl. BRILON et al., 2006). Bei einer Anwendung in der Baubetriebsplanung haben Arbeitsstellenkapazitäten, die größer als die zugehörigen HBS-Kapazitäten im Zustand ohne Arbeitsstelle sind, jedoch zur Folge, dass aus der Einrichtung einer Arbeitsstelle Vorteile für den Verkehrsablauf und somit ggf. verringerte volkswirtschaftliche Kosten resultieren. Um dies zu vermeiden, kann es sinnvoll sein, die Arbeitsstellenkapazität auf die HBS-Kapazität der betrachteten Strecke zu begrenzen.

Arbeitsstellen-ID	Lage	Steigung s [%]	SV-Anteil b_{sv} [%]	Verkehrsführung	n_{FS} [-]	$n_{FS,ü}$ [-]	b_{FS} [m]	Fahrstreifen- reduktion	C_{mod} [Kfz/h]	C_N [Kfz/h]	Differenz [%]
RP 2012_001	aB	< 2	15	0+4s	2	2	3,25/2,50	nein	3.139	2.646	-15,7
NW 2012_634	iB	< 2	17,5	2+2	2	0	3,75/3,75	ja**	3.404	2.909	-14,5
RP 2014_001b	aB	< 2	12,5	0+4s	2	2	3,25/2,50	nein	3.209	2.804	-12,6
BY 2014_001	aB	3	7,5	2+4s	3	1	3,25/3,00/3,75	nein	4.533	4.057	-10,5
RP 2014_001a	aB	4	15	4s+0	2	0	3,25/2,50	nein	2.825	2.581	-8,6
NW 2011_641	iB	< 2	20	2s+3	2	0	3,50/3,50	nein	3.333	3.103	-6,9
HE 2012_401	aB	3	15	4s+2	3	0	3,25/3,00/2,60	nein	4.387	4.088	-6,8
NW 2012_654	iB	< 2	10	4s+2	3	0	3,25/3,00/2,75	nein	5.455	5.117	-6,2
NW 2011_636a	iB	3	7,5	1+4	2	1	3,25/3,25	nein	3.014	2.828	-6,2
NW 2011_519	iB	< 2	10	4s+0	2	0	3,50/3,25	nein	3.636	3.435	-5,5
RP 2012_002	aB	< 2	12,5	4s+0	2	0	3,25/2,50	nein	3.209	3.063	-4,6
HE 2001_005	iB	< 2	10	6s+0	3	0	3,25/2,50/2,50	nein	5.091	4.879	-4,2
NW 2010_404	iB	< 2	12,5	2s+2s	2	0	3,25/2,50	nein	3.378	3.239	-4,1
NW 2012_657	iB	< 2	12,5	2+4s	3	1	3,60/3,00/3,25	nein	5.067	4.875	-3,8
NW 2010_296	iB	< 2	10	3+3	3	0	3,25/3,00/2,75	nein	5.455	5.301	-2,8
NW 2011_517	iB	< 2	10	3+3	3	0	3,25/3,00/2,75	nein	5.455	5.318	-2,5
NW 2010_639	iB	< 2	7,5	1+3s	2	1	3,75/3,25	nein	3.349	3.287	-1,9
NI 2012_003	aB	< 2	20	1+3	2	1	3,75/3,25	ja	2.850	2.800	-1,8
NW 2010_291	iB	< 2	12,5	2+4s	3	1	3,25/2,50/3,00	nein	4.729	4.668	-1,3
HE 2012_388	aB	< 2	10	2+4s	3	1	3,25/2,75/3,50	nein	4.923	4.943	0,4
HE 2012_387b	iB	< 2	12,5	4+4	4*	0	3,25/3,25/3,00/3,00	nein	7.111	7.180	1,0
NW 2011_632	iB	< 2	20	2+3n	2	0	3,25/2,60	nein	3.250	3.308	1,8
HE 2009_185	iB	< 2	10	4+4	4*	0	3,25/3,25/2,75/2,75	nein	7.273	7.413	1,9
NW 2011_636b	iB	3	22,5	1+4	2	1	3,25/3,25	nein	2.645	2.707	2,4
NI 2012_001	aB	< 2	15	3+1	2	0	3,75/3,50	ja	3.304	3.412	3,3
HE 2012_387a	iB	< 2	12,5	4+4	4*	0	3,25/3,25/3,00/3,00	nein	7.111	7.373	3,7
NW 2012_644	iB	< 2	10	0+4s	2	2	3,25/2,60	nein	3.545	3.681	3,8
HE 2001_003	iB	< 2	10	3+3n	3	0	3,25/2,50/2,50	nein	5.091	5.321	4,5
RP 2014_002	aB	3	10	2+2	2	0	3,25/2,50	nein	2.954	3.100	4,9
HE 2013_001	aB	3	7,5	5s+0	2	0	3,25/2,75	ja	3.181	3.354	5,4
RP 2013_001	aB	4	12,5	0+4s	2	2	3,25/2,50	ja	2.888	3.054	5,7
NW 2011_647	iB	< 2	12,5	3s+1	2	0	3,25/2,50	nein	3.378	3.590	6,3
NI 2012_002	aB	< 2	5	1+3	2	1	3,75/3,50	ja	3.257	3.500	7,5
NW 2012_805	aB	3	7,5	1+2	1	0	3,75	ja	1.591	1.739	9,3
HE 2001_002	iB	< 2	10	0+6s	3	3	3,25/2,50/2,50	nein	5.091	5.593	9,9
NW 2010_706	iB	< 2	12,5	2+2	2	0	3,50/3,50	ja	3.556	3.910	10,0
NW 2012_620	aB	< 2	17,5	2s+3n	2	0	3,00/2,60	ja	2.991	3.334	11,4

* 3+TSF
** modifiziertes Reißverschlussverfahren

Tab. 5-9: Vergleich der empirisch ermittelten Kapazitäten (C_N) mit den nach dem neuen Modell ermittelten Kapazitäten (C_{mod})

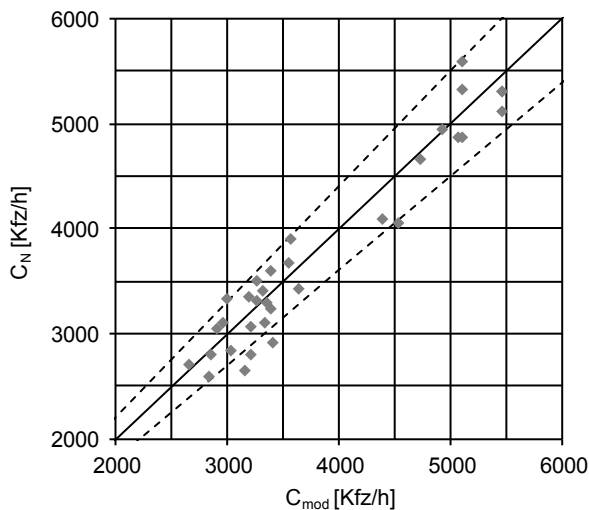


Bild 5-11: Gegenüberstellung der empirisch ermittelten Kapazitäten (C_N) mit den nach dem neuen Modell ermittelten Kapazitäten (C_{mod}) für alle analysierten Arbeitsstellen mit zwei- und dreistreifigen Richtungsverkehrsführungen (gestrichelte Linien kennzeichnen eine Abweichung von 10 %)

5.1.6 Vergleich des entwickelten Kapazitätsmodells mit dem RBAP-Modell und Literaturangaben

Zum Vergleich des entwickelten Kapazitätsmodells mit Modellen bzw. Kapazitäten aus früheren Untersuchungen (vgl. Kapitel 3.4) werden nachfolgend zum einen die berücksichtigten oder als maßgeblich festgelegten Einflussgrößen auf die Kapazität und zum anderen die Höhe der Kapazität in Abhängigkeit von den berücksichtigten Einflussgrößen verglichen.

Grundlage des neu entwickelten Kapazitätsmodells bildet das RBAP-Verfahren. Anhand des zu Grunde liegenden Untersuchungskollektivs wurden die maßgebenden Einflussgrößen neu ermittelt. Die Lage der Autobahnen innerhalb oder außerhalb von Ballungsräumen wurde als Einflussgröße bestätigt. Mit einem Faktor von 0,95 für Arbeitsstellen außerhalb von Ballungsräumen ist der Einfluss jedoch geringer als im RBAP-Verfahren. Ebenso konnte ein Einfluss der Fahrbahnbreite festgestellt werden. Die Einflüsse einer Fahrstreifenreduktion im Zulauf und der Überleitung von Fahrstreifen auf die Kapazität konnten hingegen nicht bestätigt werden. Dies und der ermittelte Einfluss einer Fahrbahnteilung sind die wesentlichen Unterschiede des neu entwickelten Modells zum RBAP-Modell. Im RBAP-Modell wird eine Fahrbahnteilung indirekt dadurch berücksichtigt, dass der Abminderungsfaktor für Überleitungen nur für übergeleitete Fahrstreifen und nicht für die gesamte Richtungs-fahrbahn gilt. Daraus folgt jedoch, dass eine Fahrbahnteilung einen geringeren Einfluss auf die Kapazität hat als eine Überleitung sämtlicher Fahrstreifen. Dies steht im deutlichen Gegensatz zu den empirischen Ergebnissen aus der vorliegenden Untersuchung.

Das Vorhandensein einer Fahrbahnteilung wurde bisher in keiner Untersuchung explizit untersucht, auch wenn Arbeitsstellen mit Fahrbahnteilung im Untersuchungskollektiv enthalten waren. Stattdessen wurde stets nur der Einfluss einer Überleitung berücksichtigt. Dies ist insbesondere in der Hinsicht auffällig, dass bereits in den ersten Untersuchungen zur Kapazität von Arbeitsstellen längerer Dauer (HOFFMANN et al., 1981; SCHMUCK und BECKER, 1984 und auch RESSEL, 1994) für 1+3-Verkehrsführungen geringere Kapazitäten ermittelt wurden als für 0+4- und auch 3+1- und 4+0-Verkehrsführungen. Dieser Effekt wurde, wenn er überhaupt interpretiert wurde, nie auf die Fahrbahnteilung, sondern auf die Überleitung zurückgeführt. Neuere Untersuchungen von BECKMANN und ZACKOR (2001) und BRILON et al. (2006) enthielten im Untersuchungskollektiv keine Arbeitsstellen

mit Fahrbahnteilungen, sodass auch kein entsprechender Einfluss ermittelt werden konnte. SÜMMERMANN (2012) liefert die einzige Untersuchung zur Kapazität von Arbeitsstellen auf deutschen Autobahnen, die für 1+3-Verkehrsführungen höhere Kapazitäten angibt als für 0+4-Verkehrsführungen. Begründet wird dies vom Autor mit den größeren Fahrstreifenbreiten. Das zu Grunde liegende Arbeitsstellenkollektiv ist jedoch relativ klein und die Rückschlüsse beruhen nicht auf einem umfassenden Kapazitätsmodell, sondern auf dem Vergleich einzelner Arbeitsstellenkapazitäten.

Die Höhe der Kapazitäten des neu entwickelten Modells lässt sich nur mit Kapazitäten aus früheren Untersuchungen, in denen ebenfalls ein Kapazitätsmodell angegeben wurde, sinnvoll vergleichen. Vergleichbare Kapazitätsmodelle sind im RBAP-Verfahren sowie in der Untersuchung von BECKMANN und ZACKOR (2001) enthalten. Die Grundkapazität im neu entwickelten Modell liegt bei 2.000 Pkw-E/h pro Fahrstreifen. Sie ist somit deutlich höher als die Grundkapazität im RBAP-Modell und im Modell von BECKMANN und ZACKOR (2001) mit jeweils 1.830 Pkw-E/h pro Fahrstreifen. Im neu entwickelten Modell und im RBAP-Modell entspricht die Grundkapazität gleichzeitig der größtmöglichen Kapazität, im Modell von BECKMANN und ZACKOR (2001) liegt die höchste Kapazität bei 2.013 Pkw-E/h pro Fahrstreifen, da auf hochbelasteten Stadtautobahnen ein Faktor von 1,1 angesetzt wird. Die Höchstkapazität liegt somit in etwa in der gleichen Größenordnung wie bei dem neu entwickelten Modell. Untergrenzen der Kapazitäten sind in der Regel wenig aussagekräftig, da diese bei sehr hohen SV-Anteilen und sehr hohen Steigungen auftreten. Für Arbeitsstellen mit 0 % Schwerverkehr und Steigung liegen die niedrigsten Kapazitäten für das entwickelte Modell, das RBAP-Modell und das Modell von BECKMANN und ZACKOR bei 1.539, 1.486 bzw. 1.137 Kfz/h je Fahrstreifen. Diese unterschiedlichen Untergrenzen ergeben sich dabei auch durch die unterschiedliche Anzahl der im Modell enthaltenen, multiplikativ verknüpften Abminderungsfaktoren.

Zusammenfassend unterscheidet sich das neu entwickelte Modell in erster Linie durch die zum ersten Mal berücksichtigte Einflussgröße „Fahrbahnteilung“ von den früheren Modellen. Das Modell liefert realistische Ober- und Untergrenzen der Kapazitäten für Arbeitsstellen längerer Dauer. Durch die Obergrenze von 2.000 Pkw-E/h wird verhindert, dass die ermittelten Arbeitsstellenkapazitäten bei durchschnittlichen SV-Anteilen von 10 % über den Kapazitäten des HBS (FGSV, 2015) und somit über den Kapazitäten der freien Strecke liegen.

5.2 q-v-Diagramme in Arbeitsstellen längerer Dauer

5.2.1 Datengrundlage und Untersuchungskollektiv

Zusammenbrüche des Verkehrsflusses infolge der Engpasswirkung von Arbeitsstellen treten in der Regel am Beginn der Arbeitsstelle oder unmittelbar vor der Arbeitsstelle auf. Für die Ermittlung der Kapazität von Arbeitsstellen wurden daher Dauerzählstellendaten verwendet, die im Zulauf zur Arbeitsstelle erfasst werden.

Im Gegensatz dazu ist der Zusammenhang zwischen Verkehrsstärke und Geschwindigkeit im fließenden Verkehr insbesondere für den Innenbereich der Arbeitsstelle von Interesse, um z. B. durch die Arbeitsstelle bedingte Fahrtzeitverluste infolge der Reduktion der zulässigen Höchstgeschwindigkeit und des spezifischen Geschwindigkeitsverhaltens im Bereich der Arbeitsstelle zu erfassen. Aufgrund von Fahrstreifenverschwenkungen und -überleitungen liefern Daten von Dauerzählstellen im Arbeitsstelleninnenbereich – sofern sie nicht ohnehin außer Betrieb genommen wurden – häufig keine zuverlässigen Verkehrsstärke- und Geschwindigkeitsdaten, weil z. B. durch die Verschwenkung von Fahrstreifen Doppel-

erfassungen auftreten können. Daher ist eine sorgfältige Plausibilitätsprüfung der erfassten Daten erforderlich. Bei geringen Abweichungen der Lage der Behelfsfahrbahnen von den regulären Fahrbahnen werden häufig noch realistische Daten erfasst. Bei einer Verkehrsführung mit Überleitung von Fahrbahnen auf die Gegenfahrbahn können dagegen in der Regel gar keine Daten erfasst werden.

Auf der Grundlage dieser Randbedingungen wurden anhand der bereits in Kapitel 5.1.1 beschriebenen Datengrundlagen Zählstellen innerhalb von Arbeitsstellen ermittelt, die während des Bauzeitraums plausible Verkehrsstärke- und Geschwindigkeitsdaten erfasst haben. Auf diese Weise konnten insgesamt 28 Zählstellen in Arbeitsstellen identifiziert werden. Dabei handelt es sich überwiegend um Verkehrsführungen ohne übergeleitete Fahrbahnen in der betrachteten Fahrtrichtung, wie 2+2-, 4+0- 3+3- oder 4+2-Verkehrsführungen. Für eine 2+4-Verkehrsführung konnten die Daten für die beiden nicht übergeleiteten Fahrbahnen ebenfalls erfasst werden. Da hierbei innerhalb der Arbeitsstelle eine vergleichbare Situation vorliegt wie bei einer zweistreifigen Richtungsverkehrsführung, wurde diese Verkehrsführung als zweistreifige Strecke in die Analysen einbezogen. Die einzelnen Arbeitsstellen des Untersuchungskollektivs sind gemeinsam mit den Ergebnissen der Analyse in Kapitel 5.2.2 dargestellt.

5.2.2 Methodik und Ergebnisse der Analyse der q-v-Diagramme

Ziel der Analyse des Zusammenhangs zwischen Verkehrsstärke und Geschwindigkeit im Arbeitsstelleninnenbereich war die Ermittlung von standardisierten q-v-Diagrammen für den Zustand des fließenden Verkehrs. Zur Nachbildung der Verkehrsstärke- und Geschwindigkeitsdaten auf Autobahnen eignet sich das auf einem einfachen Warteschlangenmodell basierende Verkehrsflussmodell von BRILON und PONZLET (1995), welches auch im HBS (FGSV, 2015) zur Darstellung der q-v-Diagramme verwendet wird (vgl. Kapitel 3.1.2).

In der Untersuchung von BRILON und GEISTEFELDT (2010) wurden die Geschwindigkeit im freien Verkehr $v(q=0)$ und die Neigung der q-v-Beziehung im freien Verkehr $v'(q=0)$ für die empirische Ermittlung der Modellparameter V_0 , L_0 und C_0 der standardisierten q-v-Diagramme des HBS (FGSV, 2015) zugrunde gelegt. Die Neigung der Anpassungskurve hat dabei die Einheit $[(\text{km/h})/(\text{Kfz/h})]$. Bild 5-12 zeigt für ein Beispiel aus dem Untersuchungs-

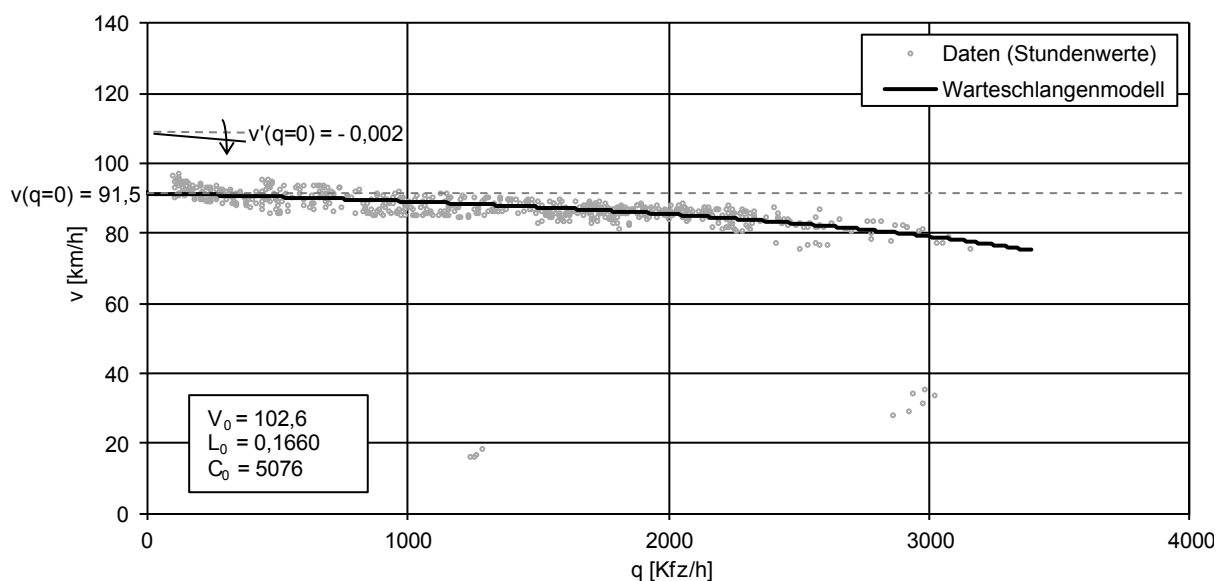


Bild 5-12: Anpassung des Warteschlangenmodells nach BRILON und PONZLET (1995) an Verkehrsdaten aus dem Arbeitsstelleninnenbereich am Beispiel der Arbeitsstelle NW 2010_024_qv

kollektiv das angepasste Warteschlangenmodell und die daraus resultierenden Werte für $v(q=0)$ und $v'(q=0)$. Anhand des hier dargestellten Beispiels für eine zweistreifige Verkehrsführung mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h ist deutlich zu erkennen, dass die mittleren gefahrenen Geschwindigkeiten in der Regel über der zulässigen Geschwindigkeit liegen. Diese Überschreitung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit ist, wie bereits in früheren Untersuchungen (z. B. SÜMMERMANN, 2012) dokumentiert, bei zulässigen Höchstgeschwindigkeiten von 60 km/h noch deutlich höher als bei zulässigen Höchstgeschwindigkeiten von 80 km/h. Aufgrund des eher niedrigen Geschwindigkeitsniveaus im Arbeitsstelleninnenbereich im Vergleich zur freien Strecke ist die Neigung der Kurve verhältnismäßig klein.

Grundsätzlich ist anhand der in Tabelle 5-10 dargestellten Ergebnisse zu erkennen, dass sowohl die Geschwindigkeiten als auch die Kurvenneigungen auch bei vergleichbaren Randbedingungen der einzelnen Arbeitsstellen sehr stark variieren. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das Geschwindigkeitsverhalten in Arbeitsstellen von vielen Randbedingungen, die nicht anhand der dokumentierten Parameter der Verkehrsführung nachvollziehbar

Arbeitsstellen-ID	Lage	b_{SV} [%]	Verkehrsführung	n_{FS} [-]	v_{zul} [km/h]	V_0 [km/h]	L_0 [-]	C_0 [Kfz/h]	$v(q=0)$ [km/h]	$v'(q=0)$ [(km/h)/(Kfz/h)]
NW_2010_022_qv	iB	5	1+3n	1	80	426,8	0,0080	12.673	80,0	0,0051
NW_2010_023_qv	iB	5	1+3n	1	80	270,7	0,0265	4.956	88,5	0,0120
NW_2010_010_qv	iB	5	2+3n	2	60	189,8	0,0124	12.749	86,2	0,0037
NW_2010_014b_qv	aB	7,5	4+0	2	60	413,6	0,0068	16.132	86,6	0,0042
NW_2010_019_qv	aB	10	4+0	2	60	116,2	0,0460	5.576	80,1	0,0045
NW_2010_003a_qv	iB	10	2s+2s	2	60	82,6	0,0805	5.637	69,9	0,0019
NW_2010_001_qv	iB	15	2s+2s	2	60	77,4	0,1821	4.885	71,2	0,0012
NW_2010_003b_qv	iB	15	2s+2s	2	60	124,3	0,0202	11.070	79,9	0,0026
NW_2010_002_qv	iB	15	4+0	2	60	69,1	3,4670	3.177	68,7	0,00013
NW_2012_741_qv	aB	15	4+0	2	60	105,6	0,0524	5.000	75,2	0,0043
NW_2012_770_qv	aB	15	4+0	2	60	102,8	0,2665	5.024	95,5	0,0014
NW_2010_263_qv	aB	15	4+0	2	60	115,3	0,0277	10.065	81,6	0,0024
NW_2010_024_qv	iB	5	2+3n	2	80	102,6	0,1660	5.076	91,5	0,0020
NW_2010_025_qv	iB	5	2+3n	2	80	97,9	0,3570	3.479	90,7	0,0019
NW_2010_004_qv	iB	10	2+2	2	80	122,0	0,0447	9.280	94,3	0,0023
NW_2010_012_qv	iB	10	2+2n	2	80	114,7	0,0276	13.273	87,3	0,0016
NW_2010_021_qv	iB	10	2+3	2	80	113,7	0,0380	10.427	88,5	0,0019
NW_2010_011_qv	iB	10	2+3n	2	80	92,1	0,2990	5.212	87,0	0,00093
NW_2010_008_qv	iB	10	2s+2n	2	80	107,3	0,1021	6.100	91,5	0,0022
NW_2010_015_qv	iB	15	2+3	2	80	78,3	1,9890	5.620	77,7	0,000096
NW_2010_017b_qv	iB	15	2+4	(2)	80	110,9	0,0610	6.927	88,0	0,0026
NW_2010_020_qv	aB	20	2+2	2	80	92,2	0,8700	3.618	89,6	0,0007
NW_2010_706_qv	iB	12,5	2+2	2	80	103,7	0,1133	7.224	92,1	0,0014
NW_2010_018_qv	iB	20	3+3	3	60	89,8	0,1840	8.284	84,9	0,00057
NW_2010_017a_qv	iB	2,5	4+2	3	80	129,5	0,0360	11.742	99,1	0,0020
NW_2010_016_qv	iB	15	3+2	3	80	83,9	0,7420	10.778	83,0	0,00008
BY_2011_227_qv	aB	5	3+3	3	80	443,4	0,0078	15.735	96,1	0,0048
HE_2009_182_qv	aB	12,5	4+2	3	80	97,6	0,2269	5.461,3	90,5	0,0012

Tab. 5-10: Parameter der Untersuchungsstellen und Ergebnisse der Analysen der q-v-Diagramme

sind (z. B. ablenkende Bautätigkeiten, regelmäßige Geschwindigkeitsüberwachung in der Arbeitsstelle), beeinflusst werden kann.

Für die Lage der Arbeitsstelle innerhalb oder außerhalb von Ballungsräumen, die Verkehrsführung und den SV-Anteil konnte anhand des Untersuchungskollektivs kein systematischer Einfluss auf die Höhe der Geschwindigkeit oder die Neigung der q-v-Modellfunktion festgestellt werden. Aus diesem Grund wurde zur Bestimmung der mittleren Geschwindigkeit und der mittleren Kurvenneigung im freien Verkehr nur zwischen der Fahrstreifenanzahl und der zulässigen Höchstgeschwindigkeit unterschieden. Insgesamt konnten somit fünf verschiedene Typen von Arbeitsstellen betrachtet werden:

- 2 Behelfsfahrstreifen, $v_{zul} = 60$ km/h
- 3 Behelfsfahrstreifen, $v_{zul} = 60$ km/h
- 1 Behelfsfahrstreifen, $v_{zul} = 80$ km/h
- 2 Behelfsfahrstreifen, $v_{zul} = 80$ km/h
- 3 Behelfsfahrstreifen, $v_{zul} = 80$ km/h

Bild 5-13 zeigt die Mittelwerte sowie die Spannweiten der Geschwindigkeiten im freien Verkehr (links) und der Neigung der q-v-Modellfunktion für $q = 0$ (rechts) für alle fünf definierten Typen. Hierbei ist zu beachten, dass die Kollektive der zweistreifigen Verkehrsführungen (10 und 11 Arbeitsstellen) deutlich größer sind als die Kollektive der ein- und dreistreifigen Verkehrsführungen (2 bzw. 1 und 4 Arbeitsstellen).

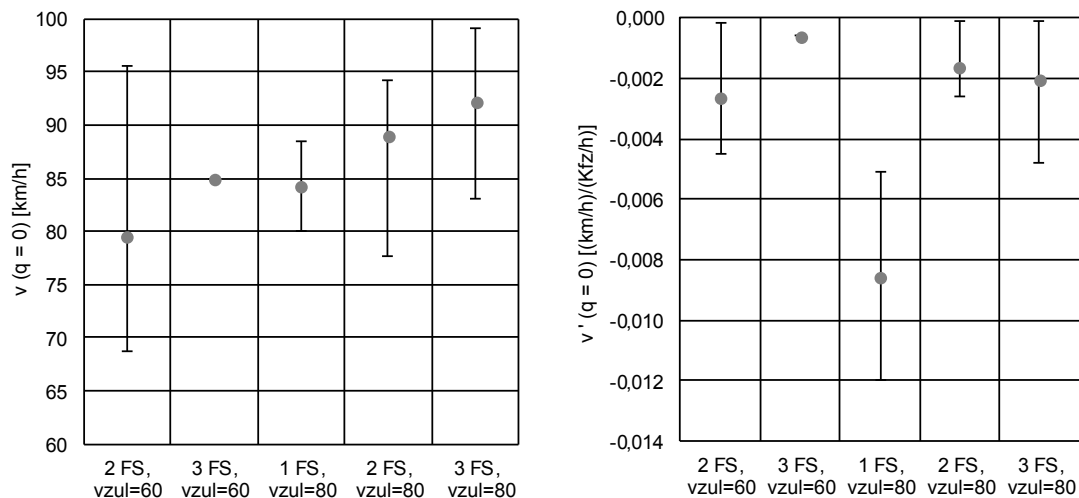


Bild 5-13: Mittelwerte und Spannweiten der Geschwindigkeiten (links) und Neigungen der q-v-Beziehung im freien Verkehr (rechts) für alle fünf für das Untersuchungskollektiv definierten Typen

Sowohl für die zulässigen Höchstgeschwindigkeiten als auch für die Anzahl der Behelfsfahrstreifen sind trotz der zum Teil großen Schwankungen eindeutige Tendenzen der Geschwindigkeiten im freien Verkehr erkennbar. Bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h liegt die Geschwindigkeit etwa 7 - 10 km/h über der Geschwindigkeit bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 60 km/h. Mit jedem weiteren Fahrstreifen nimmt die Geschwindigkeit um jeweils 3 - 5 km/h zu. Diese Tendenz stimmt mit den Annahmen im HBS (FGSV, 2015) überein und lässt sich mit dem abnehmenden Einfluss langsamer Fahrzeuge auf dem Hauptfahrstreifen erklären.

Die Auswirkungen der Einflussgrößen auf die Neigung des q-v-Diagramms sind nicht so eindeutig ermittelbar. Am ehesten ist eine Tendenz für die zweistreifigen Verkehrsführungen mit relativ großen Untersuchungskollektiven erkennbar. Mit zunehmender zulässiger und

somit auch gefahrener Geschwindigkeit nimmt die Neigung des q-v-Diagramms ab. Das gleiche gilt eingeschränkt auch bei zunehmender Anzahl der Fahrstreifen. Bei einstreifigen Verkehrsführungen ist die Neigung des q-v-Diagramms deutlich höher, da einzelne langsame Fahrzeuge die Geschwindigkeit aller folgenden Fahrzeuge beeinflussen. Es ergibt sich dadurch eine fast linear abfallende Geschwindigkeit mit zunehmender Verkehrsstärke. Bei zwei- und insbesondere bei dreistreifigen Verkehrsführungen ist dieser Effekt deutlich geringer.

5.2.3 Ableitung von standardisierten q-v-Diagrammen

Für die Ableitung von standardisierten q-v-Diagrammen wurde weitestgehend das gleiche Verfahren angewandt, das auch zur Ermittlung der q-v-Diagramme im HBS (FGSV, 2015) zur Anwendung kam (BRILON und GEISTEFELDT, 2010). Die abgeleiteten q-v-Diagramme beruhen auf einer Festlegung der Geschwindigkeit im freien Verkehr ($v(q = 0)$), der Neigung der q-v-Modellfunktion im freien Verkehr ($v'(q = 0)$), der kritischen Geschwindigkeit bei Erreichen der Kapazität v_{krit} und der Kapazität C. Auf der Grundlage dieser vorher anhand der empirischen Daten und Plausibilitätsüberlegungen festgelegten Randbedingungen erfolgte über die Minimierung der Fehlerquadrate eine Optimierung der Modellparameter V_0 , L_0 und C_0 , sodass diese die festgelegten Randbedingungen möglichst genau nachbilden. Eine direkte Übernahme der Modellparameter aus den empirischen Daten war hingegen nicht sinnvoll, da diese Parameter in der Regel nicht ausreichend gut mit den festgelegten Werten für v_{krit} und C übereinstimmen. Insbesondere der Parameter V_0 reagiert sehr sensibel auf nicht zueinander passende Neigungen der q-v-Modellfunktion und Kapazitätswerte. So kann der Wert V_0 sehr hohe Werte annehmen, welche für eine Festlegung von standardisierten q-v-Diagrammen nicht handhabbar sind.

Im Gegensatz zu den q-v-Diagrammen des HBS (FGSV, 2015), die für eine feste Anzahl an Kapazitätswerten für alle Kombinationen der maßgebenden Streckenparameter angegeben werden, ergibt sich durch die Berücksichtigung des SV-Anteils als Eingangsgröße in dem entwickelten Kapazitätsmodell für Arbeitsstellen eine unbegrenzte Zahl möglicher Kapazitätswerte. Aus diesem Grund wird der Parameter C_0 in Abhängigkeit von der Kapazität C nach dem Kapazitätsmodell angegeben und nicht im Rahmen des Optimierungsprozesses unabhängig angepasst. Hierfür wurde die in Kapitel 3.1.2 dargestellte Erweiterung des Warteschlangenmodells nach BRILON und PONZLET (1995) übernommen (Gleichung (3-6)). Dies ermöglichte eine Begrenzung der Werte für die Modellparameter V_0 und L_0 , da nicht für jede mögliche Kapazität C eine eigene Anpassung der Modellparameter erfolgen musste.

Zur Festlegung der Eingangsgrößen für die Ermittlung standardisierter q-v-Beziehungen wurden folgende Annahmen getroffen:

- Übernahme der empirisch ermittelten Geschwindigkeiten im freien Verkehr für alle betrachteten Fahrstreifen- und Geschwindigkeitskombinationen,
- Ableitung plausibler Geschwindigkeiten für alle nicht beobachteten Kombinationen,
- identische Werte für $v(q = 0)$ und v_{krit} für alle Schwerverkehrsanteile,
- identische Werte für $v(q = 0)$ für drei- und vierstreifige Verkehrsführungen, da davon ausgegangen wird, dass die Geschwindigkeit durch einen weiteren Fahrstreifen nicht weiter ansteigt,
- Festlegung von v_{krit} anhand des Untersuchungskollektivs, der Erkenntnisse aus der Kapazitätsanalyse und der Werte für Strecken von Autobahnen mit Tempolimit 80 km/h im HBS (FGSV, 2015),

- Abminderung der Geschwindigkeiten $v(q = 0)$ und v_{krit} für die Steigungsklassen mit Längsneigungen $s > 2\%$ anhand von Plausibilitätsüberlegungen,
- Übernahme der empirisch ermittelten Neigungen der q - v -Modellfunktion $v'(q = 0)$, soweit sinnvoll,
- Ableitung der Neigungen der q - v -Modellfunktion für alle nicht empirisch beobachteten Situationen anhand von Plausibilitätsüberlegungen,
- Optimierung der Parameter V_0 und L_0 unter der Annahme von Kapazitätswerten innerhalb von Ballungsräumen, bei breiten Fahrstreifen und ohne Fahrbahnteilung, sodass eine Abminderung der Kapazität ausschließlich durch den Einfluss des SV-Anteils und der Steigung erfolgt.

Durch die Stauchung der Kurve bei Reduzierung der Kapazität und Beibehaltung der Werte für V_0 und L_0 ergibt sich aufgrund des Modellzusammenhangs eine leichte Verringerung der Geschwindigkeit im freien Verkehr.

Für die Ermittlung der q - v -Diagramme innerhalb von Arbeitsstellen längerer Dauer anhand des Modells nach BRILON und PONZLET (1995) ergeben sich somit Werte für V_0 , L_0 und v_{krit} in Abhängigkeit von der Fahrstreifenanzahl, der zulässigen Höchstgeschwindigkeit, dem SV-Anteil und der Steigung. Die Tabelle mit den Modellparametern ist in der zusammenfassenden Darstellung der Eingangsgrößen als Vorschlag für das Verkehrsanalysesystem in Kapitel 9 (Tabelle 9-3) enthalten. Der Parameter C_0 wird anhand der Gleichung (3-6) ermittelt. Die angegebenen Parameter V_0 , L_0 und v_{krit} gelten ebenso für alle Randbedingungen, die in der Tabelle nicht weiter spezifiziert werden, aber die Kapazität negativ beeinflussen.

Für Arbeitsstellen mit einstreifiger Verkehrsführung und Geschwindigkeitsbeschränkung auf 100 km/h werden keine Parameter angegeben, da für diesen Fall keine empirischen Daten vorlagen und durch den Einfluss des Schwerverkehrs und die fehlende Überholmöglichkeit ein konkaver Verlauf der q - v -Beziehung – analog zum Verkehrsablauf auf einbahnig zweistreifigen Landstraßen – möglich ist, der mit der Modellfunktion nach BRILON und PONZLET (1995) nicht nachgebildet werden kann. Sofern ein solcher Fall in der Realität auftritt, können näherungsweise die Modellfunktionen für einstreifige Verkehrsführungen mit einer Geschwindigkeitsbeschränkung auf 80 km/h verwendet werden.

Bild 5-14 zeigt am Beispiel einer Arbeitsstelle mit zwei Behelfsfahrstreifen innerhalb von Ballungsräumen mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h, breiten Fahrstreifen und ohne Fahrbahnteilung die resultierenden q - v -Diagramme für verschiedene Schwerverkehrsanteile.

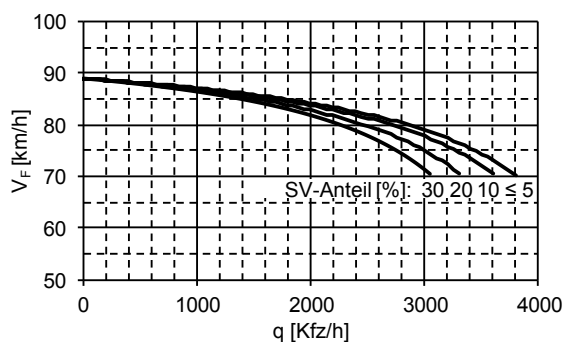


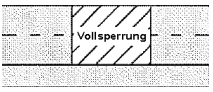
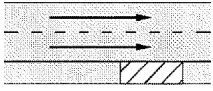

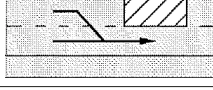

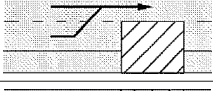
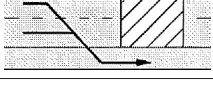
Bild 5-14: q - v -Beziehungen innerhalb von Arbeitsstellen am Beispiel einer Arbeitsstelle mit zweistreifiger Richtungsverkehrsführung innerhalb von Ballungsräumen mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h mit breiten Fahrstreifen und ohne Fahrbahnteilung

5.3 Kapazität von Arbeitsstellen kürzerer Dauer

5.3.1 Datengrundlage und Untersuchungskollektiv

Die Analyse des Verkehrsablaufs an Arbeitsstellen kürzerer Dauer beruht analog zum Vorgehen bei Arbeitsstellen längerer Dauer auf der Auswertung von Zählstellendaten und Arbeitsstellenmeldungen. Anders als bei den Baubetriebsmeldungen für Arbeitsstellen längerer Dauer, die in einer vorgegebenen Form von allen Bundesländern an den Bund geliefert werden müssen, existiert eine solche Vorgabe für Arbeitsstellen kürzerer Dauer nicht. Dementsprechend unterscheiden sich der Planungsprozess und der Umfang der Datenarchivierung von Bundesland zu Bundesland. Die Straßenbauverwaltungen der Länder Nordrhein-Westfalen, Hessen und Bayern führen Datenbanken, die alle relevanten Angaben zu Arbeitsstellen kürzerer Dauer, wie z. B. die BAB-Nr., die Fahrtrichtung, die Betriebs-km von Arbeitsstellenbeginn und -ende, den Einrichtungszeitraum, die Art der Arbeit sowie die Verkehrsführung, enthalten. Die Daten aus Nordrhein-Westfalen enthalten zusätzlich noch die Angabe der prognostizierten mittleren Verlustzeit infolge der Arbeitsstelle in fünf Klassen (keine Verlustzeit sowie Verlustzeit < 10, < 20, < 30 und > 30 Minuten). Anhand dieser Verlustzeitklassen konnten aus den pro Jahr etwa 13.000 durchgeführten Arbeitsstellen kürzerer Dauer in Nordrhein-Westfalen diejenigen mit hoher Überlastungswahrscheinlichkeit direkt herausgefiltert werden. Die von der Verkehrszentrale Hessen zur Verfügung gestellten Daten von Arbeitsstellen kürzerer Dauer wurden dagegen nicht verwendet, da aufgrund des Slotmanagementsystems in Hessen Arbeitsstellen kürzerer Dauer in der Regel nur dann durchgeführt werden, wenn aufgrund der Verkehrsnachfrage kein Stau zu erwarten ist. Somit sind diese Daten für Kapazitätsanalysen nicht geeignet. Da aus Bayern keine flächendeckenden Dauerzählstellendaten vorlagen, wurden Arbeitsstellen kürzerer Dauer in Bayern ebenfalls nicht berücksichtigt.

Zur Auswahl des Untersuchungskollektivs wurden Meldungen von Arbeitsstellen kürzerer Dauer aus Nordrhein-Westfalen für die Jahre 2010 bis 2012 herangezogen, da für diesen Zeitraum Dauerzählstellendaten für das gesamte Autobahnnetz zur Verfügung standen. Zusätzlich zu den Bezeichnungen von Verkehrsführungen in Arbeitsstellen kürzerer Dauer nach den RSA (BMV, 1995) hat das Land Nordrhein-Westfalen eigene Bezeichnungen eingeführt, die alle hier verwendeten Verkehrsführungen eindeutig identifizieren. Diese sind, unterteilt nach zweistreifigen und dreistreifigen Richtungsfahrbahnen, in Tabelle 5-11 und Tabelle 5-12 dargestellt. Neben der Bezeichnung und einer Skizze der Verkehrsführungen werden jeweils die im weiteren Verlauf der Untersuchungen verwendete Kurzbezeichnung, die äquivalente Bezeichnung nach RSA (sofern vorhanden) und eine Kurzbeschreibung angegeben.

Bezeichnung	Kurzbezeichnung	Bezeichnung nach RSA	Kurzbeschreibung	Skizze
2-VFV-2n+0	VFV		Vollsperrung	
2-VF0-2n+2n	VF0	DIII/7	Seitenstreifenarbeiten ohne Fahrstreifeneinengung	
2-VF1-2n+2	VF1		Fahrstreifeneinengung (gilt analog für dreistreifige Richtungsfahrbahnen)	
2-VF2-2n+1	VF2	DIII/3a/b	Sperrung Überholfahrstreifen	
2-VF3-2n+2s	VF3	DIII/4	Sperrung Überholfahrstreifen mit Seitenstreifenmitbenutzung	
2-VF4-2n+1	VF4	DIII/2a/b	Sperrung Hauptfahrstreifen (und Seitenstreifen)	
2-VF10-2n+1s	VF10		Sperrung aller Fahrstreifen Verkehr über Seitenstreifen	

Tab. 5-11: Verkehrsführungen für Arbeitsstellen kürzerer Dauer an zweistreifigen Richtungsfahrbahnen

Bezeichnung	Kurzbezeichnung	Bezeichnung nach RSA	Kurzbeschreibung	Skizze
3-VFV-3n+0	VFV		Vollsperrung	
3-VF0-3n+3n	VF0	DIII/7	Seitenstreifenarbeiten ohne Fahrstreifeneinengung	
3-VF5-3n+2	VF5	DIII/3a/b	Sperrung 2. Überholfahrstreifen	
3-VF6-3n+1	VF6	DIII/6	Sperrung 1. und 2. Überholfahrstreifen	
3-VF7-3n+2s	VF7	DIII/4	Sperrung 1. und 2. Überholfahrstreifen mit Seitenstreifenmitbenutzung	
3-VF8-3n+2	VF8	DIII/2a/b	Sperrung Hauptfahrstreifen (und Seitenstreifen)	
3-VF9-3n+1	VF9	DIII/5	Sperrung Haupt- und 1. Überholfahrstreifen (und Seitenstreifen)	
3-VF11-3n+1s	VF11		Sperrung aller Fahrstreifen Verkehr über Seitenstreifen	

Tab. 5-12: Verkehrsführungen für Arbeitsstellen kürzerer Dauer an dreistreifigen Richtungsfahrbahnen

Die insgesamt 15 dargestellten Verkehrsführungen kommen in unterschiedlicher Häufigkeit zur Anwendung. Eine Übersicht für die Jahre 2010 bis 2012 ist in Bild 5-15 dargestellt. Mit Abstand am häufigsten kommen die Verkehrsführungen VF2 und VF4 auf zweistreifigen Richtungsfahrbahnen und die Verkehrsführungen VF5 und VF8 auf dreistreifigen Richtungsfahrbahnen vor. Hierbei handelt es sich jeweils um Verkehrsführungen mit einer Reduktion des Querschnitts um einen Fahrstreifen. Dabei wird häufiger der linke als der rechte Fahrstreifen gesperrt. Mit einigem Abstand folgen Verkehrsführungen, die keine Fahrstreifensperrungen zur Folge haben. Vollsperrungen und Verkehrsführungen unter Nutzung des Seitenstreifens sind in Nordrhein-Westfalen sehr selten. Etwas häufiger hingegen findet bei dreistreifigen Richtungsfahrbahnen eine Reduktion auf einen Fahrstreifen statt (VF6 und VF9).

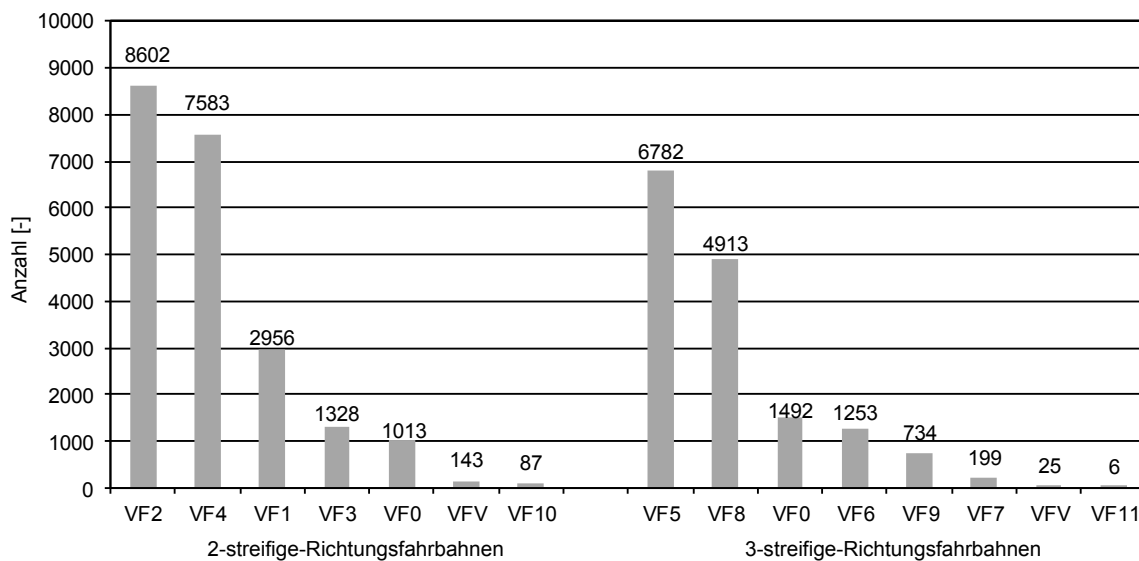


Bild 5-15: Anzahl der Arbeitsstellen kürzerer Dauer in den Jahren 2010 bis 2012 in Nordrhein-Westfalen differenziert nach Verkehrsführungen gemäß Tabelle 5-11 und Tabelle 5-12

Die Auswahl des Untersuchungskollektivs orientierte sich sowohl an der Häufigkeit der auftretenden Verkehrsführungen als auch an dem zu erwartenden Eingriff in den Verkehrsablauf. Da im Rahmen der Untersuchungen Kapazitäten des an der Arbeitsstelle verbleibenden Querschnitts ermittelt werden sollten, war es nicht sinnvoll, Verkehrsführungen zu betrachten, die keinen oder nur sehr geringen Einfluss auf den Verkehrsablauf haben (z. B. Seitenstreifenarbeiten ohne Fahrstreifeneinengung, VF0) oder mit einer Vollsperrung verbunden sind (VFV). Die Verkehrsführung VF1 mit verengten Fahrstreifen tritt zwar relativ häufig auf, ist aber hinsichtlich der tatsächlichen Führung des Verkehrs nur eingeschränkt nachvollziehbar. So wird z. B. nicht zwischen Einengung nur eines oder beider Fahrstreifen oder zwischen unterschiedlichen Breiten des verbleibenden Fahrbahnquerschnitts unterschieden. Auf die Auswertung dieser Verkehrsführung wurde deshalb verzichtet. Verkehrsführungen unter Mitbenutzung des Seitenstreifens kamen in Nordrhein-Westfalen in den Jahren 2010 bis 2012 nur in Einzelfällen zur Anwendung. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass die Art der Beschilderung der Überleitung auf den Seitenstreifen (Nutzung von Anlagen für die temporäre Seitenstreifenfreigabe, temporäre LED-Anzeige, Blechschild) einen erheblichen Einfluss auf die Nutzung des Seitenstreifens und somit auf die Kapazität hat. Da die Ausführungsart im Nachhinein nicht mehr nachvollzogen werden kann, wird auch diese Art der Verkehrsführung nicht weiter betrachtet.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden somit die Verkehrsführungen VF2 und VF4 für zweistreifige Richtungsfahrbahnen sowie die Verkehrsführungen VF5, VF8, VF6 und VF9 für dreistreifige Richtungsfahrbahnen betrachtet, da sie sowohl am häufigsten vorkommen als auch aufgrund der Fahrstreifenreduktion einen erheblichen Einfluss auf den Verkehrsablauf haben. Die für diese sechs Verkehrsführungen ermittelten Ergebnisse wurden anschließend auf die übrigen Verkehrsführungen übertragen.

Für alle Arbeitsstellen der ausgewählten Verkehrsführungen mit einem prognostizierten Zeitverlust von mehr als 20 Minuten wurde in einem ersten Schritt die Lage der jeweiligen Arbeitsstelle, analog zu dem Vorgehen bei Arbeitsstellen längerer Dauer, mit der Lage von geeigneten Dauerzählstellen abgeglichen. Hierbei wurden insgesamt etwa 500 Arbeitsstellen betrachtet. Bei potenziell zur Analyse geeigneten Zählstellen wurde dann für den gemeldeten Zeitraum der Arbeitsstelle geprüft, ob der gemeldete Einrichtungszeitraum der Arbeitsstelle anhand von Veränderungen in der Verkehrsstärke- oder Geschwindigkeits-

ganglinie nachvollzogen werden konnte (Methodik siehe auch im folgenden Kapitel 5.3.2). Waren entsprechende Einbrüche der Geschwindigkeit und Verkehrsstärke zu erkennen, wurde die Arbeitsstelle als analysierbar angesehen und ins Untersuchungskollektiv aufgenommen. Bei dieser Auswahl wurden bereits Arbeitsstellen mit unplausiblen Verkehrsstärken im Auswertzeitraum herausgefiltert. Dies betrifft vor allem als zweistreifig gemeldete Verkehrsführungen mit Verkehrsstärken im Stau unter 2.000 Kfz/h, die eindeutig auf eine einstreifige Verkehrsführung hinweisen, aber auch einstreifige Verkehrsführungen mit Verkehrsstärken von deutlich über 2.000 Kfz/h. Nach diesem ersten Schritt wurden gezielt weitere Arbeitsstellen mit Verkehrsführungen geprüft, für die bis dahin nur ein geringes Untersuchungskollektiv vorlag (hauptsächlich VF5, VF6, VF8 und VF9). Hierfür wurden die Arbeitsstellen mit prognostizierten Zeitverlusten unter 20 Minuten auf hoch belasteten Routen zur Analyse herangezogen, um das Kollektiv entsprechend zu erweitern. Mit abnehmendem prognostiziertem Zeitverlust reduzierte sich jedoch der Anteil geeigneter Untersuchungsstellen erheblich, sodass hier nur noch vergleichsweise wenig geeignete Arbeitsstellen analysiert werden konnten. In Bild 5-16 ist die Gesamtanzahl der geprüften und als analysierbar befundenen Arbeitsstellen für die einzelnen Verkehrsführungen dargestellt.

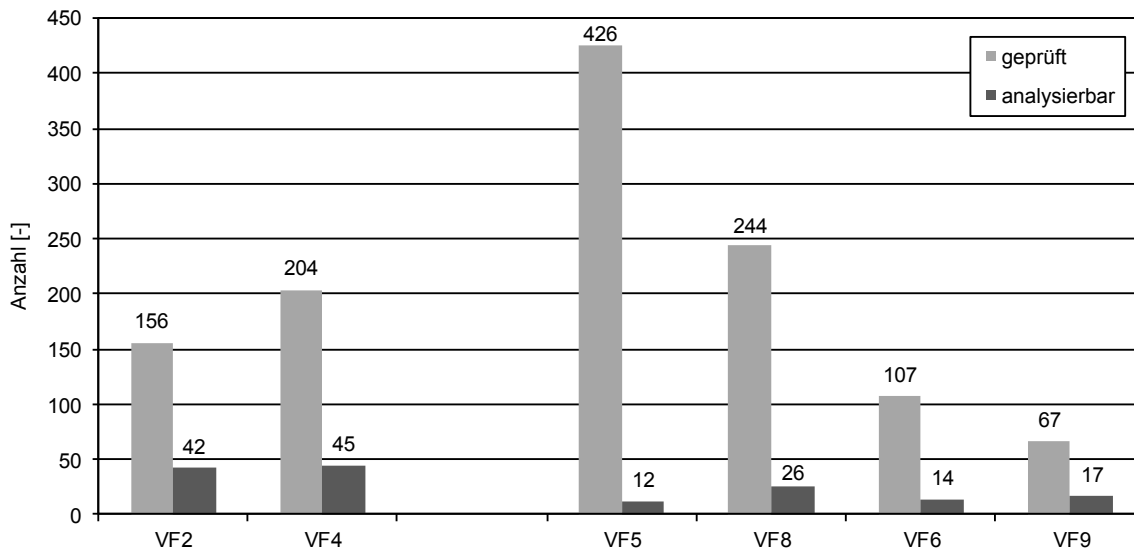


Bild 5-16: Anzahl der geprüften und hinsichtlich der Kapazität analysierbaren Arbeitsstellen differenziert nach Verkehrsführungen

Das Untersuchungskollektiv enthält somit insgesamt 87 Arbeitsstellen auf zweistreifigen und 69 Arbeitsstellen auf dreistreifigen Richtungsfahrbahnen. Das Grundkollektiv aller Arbeitsstellen kürzerer Dauer in Nordrhein-Westfalen aus den Jahren 2010 bis 2012 wurde hiermit weitestgehend ausgeschöpft. Es wird deutlich, dass die Quote der analysierbaren Arbeitsstellen für die verschiedenen Verkehrsführungen sehr unterschiedlich ist. Für die Verkehrsführungen VF2, VF4, VF6 und VF9 ist etwa ein Viertel der geprüften Arbeitsstellen für eine Analyse der Kapazität geeignet. Die Verkehrsführungen VF8 und insbesondere VF5 haben deutlich geringere Quoten. Dies liegt daran, dass die Reduktion von drei auf zwei Fahrstreifen einen deutlich geringeren Eingriff in den Verkehrsablauf darstellt als die Reduktion von zwei oder drei auf einen Fahrstreifen. Durch das geringere Stauaufkommen sind somit weniger Arbeitsstellen mit zweistreifiger Verkehrsführung zur Analyse der Kapazität geeignet.

5.3.2 Methodik und Ergebnisse der Kapazitätsermittlung

Die Ermittlung der Kapazität an Arbeitsstellen kürzerer Dauer kann nicht in derselben Form erfolgen wie bei Arbeitsstellen längerer Dauer. Für die in Kapitel 3.3 erläuterten Methoden ist eine möglichst hohe Anzahl an Verkehrszusammenbrüchen im Zulauf zur Arbeitsstelle erforderlich, um belastbare Ergebnisse zu erhalten. Bei Arbeitsstellen längerer Dauer treten diese Zusammenbrüche aufgrund von Schwankungen der Verkehrsnachfrage bei entsprechenden Verkehrsbelastungen regelmäßig über den gesamten Zeitraum der Arbeitsstelle auf. Im Gegensatz dazu ruft eine Arbeitsstelle kürzerer Dauer in der Regel höchstens einen Verkehrszusammenbruch bei der Einrichtung der Arbeitsstelle hervor. Allerdings ist auch aus diesem Zusammenbruch keine Kapazität im fließenden Verkehr ableitbar. Dies liegt daran, dass der Verkehrszusammenbruch in der Regel durch die Sperrung eines oder mehrerer Fahrstreifen, d. h. durch die abrupte Verringerung der Kapazität und nicht durch die zunehmende Verkehrsnachfrage, verursacht wird. Die Verkehrsstärke vor dem Zusammenbruch entspricht dann nicht der Kapazität der Arbeitsstelle, sondern der Verkehrsnachfrage unmittelbar vor der Einrichtung der Arbeitsstelle. Gemessen werden kann hingegen der Stauabfluss bzw. die Kapazität im Stau. Die Kapazität im fließenden Verkehr kann nur ermittelt werden, wenn der Stau durch die zunehmende Verkehrsnachfrage bei bereits eingerichteter Arbeitsstelle entsteht.

Ermittlung des mittleren Stauabflusses

Zur Ermittlung des mittleren Stauabflusses an einer Arbeitsstelle kürzerer Dauer wird der Verkehrsablauf zum Zeitpunkt einer eingerichteten Arbeitsstelle anhand von Zählstellen-daten im Zulauf oder innerhalb der Arbeitsstelle analysiert. In der Regel ist eine Arbeitsstelle kürzerer Dauer eindeutig anhand der Geschwindigkeits- und Verkehrsstärkeganglinie am gemeldeten Einrichtungsdatum zu identifizieren. Die Ausführung einer Arbeitsstelle kürzerer Dauer liegt in der Regel innerhalb eines genehmigten Zeitrahmens, der in den entsprechenden Arbeitsstellenmeldungen angegeben ist. Die Arbeitsstelle bleibt jedoch in den meisten Fällen nicht über den gesamten gemeldeten Zeitraum eingerichtet. Mit Hilfe der Verkehrsstärke- und Geschwindigkeitsdaten der Dauerzählstellen sind Beginn und Ende aber genau nachvollziehbar. Durch die zusätzliche Auswertung der Ganglinie eines Vergleichstags, z. B. aus der Vorwoche, wurde sichergestellt, dass der beobachtete Stau auf die Arbeitsstelle und nicht auf regelmäßige Überlastungen der Strecke zurückzuführen war.

Der Stauabfluss und somit die Verkehrsstärke im Stau kann während der gesamten Dauer der Überlastung gemessen werden. Als maßgebendes Kriterium für die Überlastung wurde ähnlich wie bei Arbeitsstellen längerer Dauer die Reduktion der Geschwindigkeit unter einen bestimmten Grenzwert verwendet. Für Arbeitsstellen kürzerer Dauer hat sich dabei ein Wert von 60 km/h als geeignet erwiesen. In der Regel ist die genaue Festlegung des Grenzwertes aber von geringer Bedeutung, da der Eingriff in den Verkehrsablauf meist so gravierend ist, dass die Geschwindigkeit sehr deutlich, häufig auf bis zu 20 km/h während des gesamten Einrichtungszeitraums, einbricht. Der mittlere Stauabfluss q_{Stau} wird durch die arithmetische Mittelung aller Verkehrsstärkewerte im Stau in 5-Minuten-Intervallen berechnet. Analog dazu kann auch der mittlere SV-Anteil für den Betrachtungszeitraum ermittelt werden. Das Vorgehen zur Ermittlung des mittleren Stauabflusses q_{Stau} ist in Bild 5-17 dargestellt.

Eine Übersicht über die Randbedingungen und die Stauabflüsse für alle 156 Arbeitsstellen des Untersuchungskollektivs ist im Anhang B dargestellt.

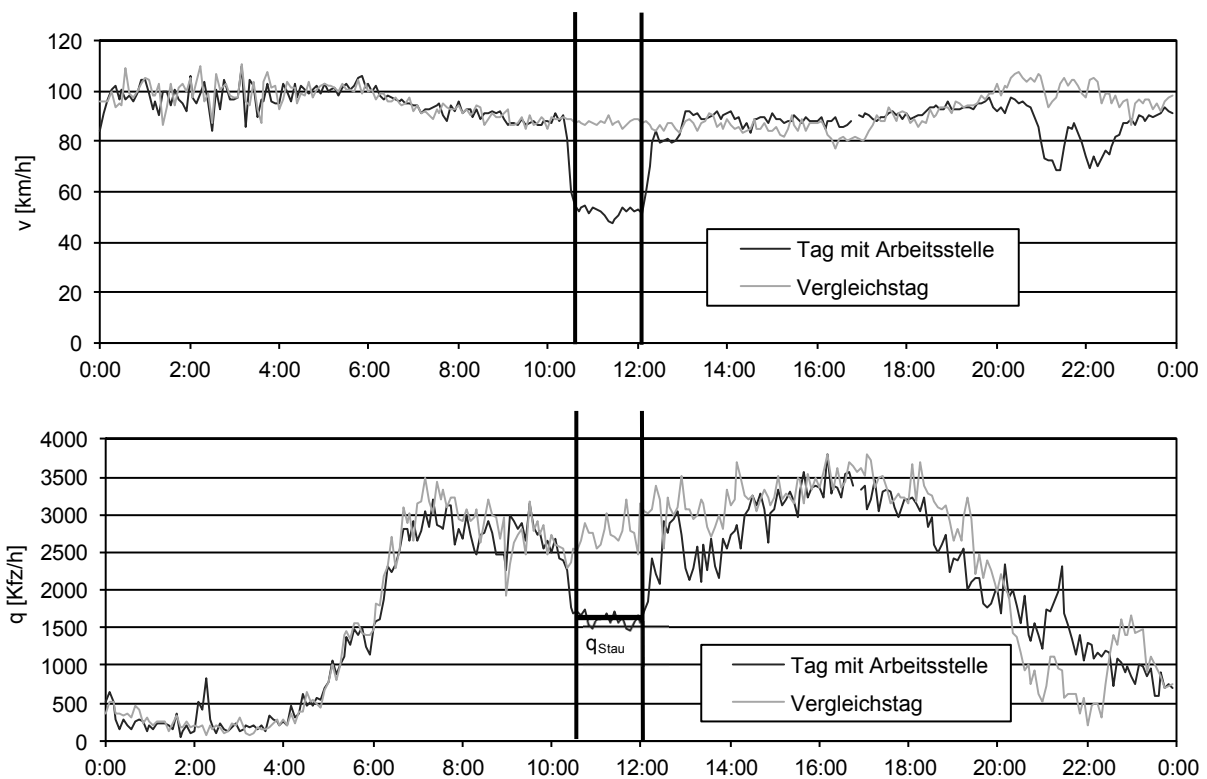


Bild 5-17: Beispiel für die Ermittlung des mittleren Stauabflusses q_{Stau} an einer Arbeitsstelle kürzerer Dauer anhand von Zählstellendaten

Ableitung von Kapazitätswerten im fließenden Verkehr

Aufgrund des Capacity Drop (vgl. Kapitel 3.2.2) ist die Kapazität im Stau üblicherweise geringer ist als die Kapazität im fließenden Verkehr. Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, kann die Kapazität im fließenden Verkehr bei Arbeitsstellen kürzerer Dauer nur dann ermittelt werden, wenn der Stau durch die zunehmende Verkehrsnachfrage bei bereits eingerichteter Arbeitsstelle entsteht. Dies kann z. B. eintreten, wenn eine Arbeitsstelle kürzerer Dauer bis in die Nachmittagsspitze hinein besteht. Dieser Fall kommt jedoch verhältnismäßig selten vor. Bei fast allen analysierten Arbeitsstellen ist der Verkehr gleichzeitig mit Einrichtung der Arbeitsstelle zusammengebrochen. In diesem Fall ist eine Ermittlung der Kapazität im fließenden Verkehr nicht möglich.

Aus diesem Grund wurde zunächst für alle Arbeitsstellen des Untersuchungskollektivs die Kapazität im Stau ermittelt. Zusätzlich wurden einzelne Arbeitsstellen identifiziert, bei denen der Verkehrszusammenbruch auf eine Zunahme der Verkehrsnachfrage während der Baustelleneinrichtung zurückzuführen war. Für diese Fälle wurde neben dem Stauabfluss auch die Verkehrsstärke im Intervall vor dem Zusammenbruch erhoben. Dieser Wert wurde näherungsweise als Kapazität im fließenden Verkehr angenommen. Anhand eines Vergleichs zwischen der Kapazität im fließenden und gestauten Verkehr sollte so der Capacity Drop an Arbeitsstellen kürzerer Dauer geschätzt werden.

5.3.3 Einflussgrößen auf den Verkehrsablauf

Ziel der Untersuchung ist die Ermittlung der Kapazität von Arbeitsstellen kürzerer Dauer in Abhängigkeit von verschiedenen Einflussgrößen. Die möglichen analysierbaren Einflussgrößen ergeben sich dabei, analog zu Arbeitsstellen längerer Dauer, zum einen aus den Angaben in den Arbeitsstellenmeldungen und zum anderen aus den Zählstellendaten. Hinzu kommen Daten aus anderen Quellen, die weitere Untersuchungen ermöglichen.

Die folgenden Einflussgrößen werden nachfolgend näher hinsichtlich ihrer Eignung zur Analyse untersucht:

- Verkehrsführung (Sperrung von Fahrstreifen, Seite der Sperrung, Mitnutzung des Seitenstreifens),
- Tageszeit (Tag/Nacht),
- Wochentag (Werktag/Wochenende),
- SV-Anteil,
- Witterungsbedingungen,
- Fahrerkollektiv, repräsentiert durch die Lage im Netz (innerhalb oder außerhalb von Ballungsräumen), und
- Steigung.

Witterungsbedingungen

Die Witterungsbedingungen am Tag der Arbeitsstelle wurden aus Daten des Deutschen Wetterdienstes ermittelt. Der Einfluss der Witterung wurde analog zur Analyse von Arbeitsstellen längerer Dauer im Folgenden insofern berücksichtigt, als nur Arbeitsstellen an Tagen mit weitgehend trockenen Bedingungen (Tagesniederschlag < 1 mm) und Tageshöchsttemperaturen über 0 °C für die Untersuchungen berücksichtigt wurden, da Regenereignisse und Glätte einen erheblichen Einfluss auf die Kapazität haben können. Nach diesem Kriterium wurden 45 Arbeitsstellen aus den weiteren Auswertungen ausgeschlossen, sodass insgesamt noch 111 Arbeitsstellen analysiert wurden. Da die Witterungsbedingungen anhand von Tageswerten der Niederschlagshöhe und der Höchsttemperatur ermittelt wurden und anhand dieser Daten nicht auf Tageszeiten mit nasser bzw. glatter Fahrbahn geschlossen werden kann, war eine Ermittlung der Kapazität von Arbeitsstellen bei Nässe oder Glätte nicht möglich.

Verkehrsführung

Die Verkehrsführung kann für jede Arbeitsstelle aus den Arbeitsstellenmeldungen entnommen werden. Sie gibt Auskunft über die Anzahl der im Normalfall vorhandenen und der reduzierten Fahrstreifen sowie über die Seite des Fahrstreifeneinzugs. Insgesamt wurden sechs Verkehrsführungen unterschieden. Die Anzahl der einzelnen Stichprobenumfänge ist in Tabelle 5-13 dargestellt.

Verkehrsführung	VF2	VF4	VF6	VF9	VF5	VF8
Anzahl	27	30	12	13	10	19

Tab. 5-13: Umfang des Untersuchungskollektivs von Arbeitsstellen kürzerer Dauer unterteilt nach der Verkehrsführung (Codierung gemäß Tabelle 5-11 und Tabelle 5-12)

Zusätzlich existieren auch Verkehrsführungen in Arbeitsstellen kürzerer Dauer mit einer Reduktion der Fahrstreifenbreite oder mit Verschwenkungen der Fahrstreifen unter Ausnutzung des Seitenstreifens. Diese Fälle konnten im Rahmen der Untersuchungen nicht empirisch analysiert werden. Einflüsse auf die Kapazität wurden deshalb abschließend über Analogieschlüsse ermittelt.

Tageszeit

Bei der Betrachtung der Tageszeit wurde zwischen Tagesbaustellen (t) und Nachtbaustellen (n), d. h. zwischen Arbeitsstellen bei Helligkeit und Dunkelheit, unterschieden. Die Anga-

ben zu der Einrichtungszeit können sowohl aus den Arbeitsstellenmeldungen als auch aus den Verkehrsdaten entnommen werden. Erwartungsgemäß enthält das Untersuchungskollektiv deutlich weniger Nacht- als Tagesbaustellen. Zudem verteilen sich diese sehr ungleichmäßig auf die verschiedenen Verkehrsführungen (vgl. Tabelle 5-14).

Verkehrsführung	VF2		VF4		VF6		VF9		VF5		VF8	
	t	n	t	n	t	n	t	n	t	n	t	n
Tageszeit												
Anzahl	27	0	29	1	7	5	9	4	10	0	19	0

Tab. 5-14: Umfang des Untersuchungskollektivs von Arbeitsstellen kürzerer Dauer unterteilt nach Verkehrsführung (Codierung gemäß Tabelle 5-11 und Tabelle 5-12) und Tageszeit (t = Tag, n = Nacht)

Wochentag

Bei der Analyse des Wochentags wird zwischen den Werktagen Montag bis Freitag (WT) und Wochenenden (WE) unterschieden. Im Untersuchungskollektiv sind deutlich weniger Wochenend- als Werktagsbaustellen vorhanden, die sich darüber hinaus ungleichmäßig auf die einzelnen Verkehrsführungen verteilen (vgl. Tabelle 5-15).

Verkehrsführung	VF2		VF4		VF6		VF9		VF5		VF8	
	WT	WE	WT	WE	WT	WE	WT	WE	WT	WE	WT	WE
Wochentag												
Anzahl	27	0	28	2	10	2	7	6	8	2	18	1

Tab. 5-15: Umfang des Untersuchungskollektivs von Arbeitsstellen kürzerer Dauer unterteilt nach Verkehrsführung (Codierung gemäß Tabelle 5-11 und Tabelle 5-12) und Wochentag (WT = Werktag, WE = Wochenende)

Bei der Analyse des Einflusses des Wochentags auf den Verkehrsablauf müssen mehrere Faktoren berücksichtigt werden, die indirekt die Eigenschaften von Werktagen und Wochenenden charakterisieren. So sind typischerweise am Wochenende weniger Schwerverkehrsfahrzeuge unterwegs. Zudem können Strecken, die in der Woche überwiegend Pendlerverkehr aufweisen und innerhalb von Ballungsräumen liegen, am Wochenende aufgrund eines anderen Fahrerkollektivs und eines möglicherweise veränderten Fahrverhaltens der ortskundigen Verkehrsteilnehmer auch Eigenschaften von Strecken außerhalb von Ballungsräumen aufweisen.

SV-Anteil

Der SV-Anteil kann aus den Dauerzählstellendaten für jede Arbeitsstelle des Untersuchungskollektivs entnommen werden. Da Arbeitsstellen kürzerer Dauer in der Regel in verkehrsrärmeren Zeiten (am späten Vormittag, in der Mittagszeit oder nachts) mit entsprechend höherem SV-Anteil durchgeführt werden, ist der mittlere SV-Anteil über alle Untersuchungsstellen mit etwa 20 % vergleichsweise hoch. Insgesamt schwankt der SV-Anteil zwischen 2 und 43 %, wobei die sehr geringen Werte am Wochenende auftreten. Eine Einteilung in SV-Kategorien, beispielsweise in 10 %-Schritten, war nicht sinnvoll, da die Einzelstichproben dadurch sehr klein geworden wären.

Fahrerkollektiv

Der Einfluss des Fahrerkollektivs wird wie im HBS (FGSV, 2015) und bei der Analyse der Arbeitsstellen längerer Dauer anhand der Lage der Strecke im Autobahnnetz bewertet. Im Untersuchungskollektiv lagen deutlich mehr Arbeitsstellen innerhalb von Ballungsräumen vor. Die Aufteilung auf die verschiedenen Verkehrsführungen ist in Tabelle 5-16 dargestellt.

Verkehrsführung	VF2		VF4		VF6		VF9		VF5		VF8	
	iB	aB	iB	aB	iB	aB	iB	aB	iB	aB	iB	aB
Lage im Netz												
Anzahl	20	7	12	18	10	2	8	5	10	0	19	0

Tab. 5-16: Umfang des Untersuchungskollektivs von Arbeitsstellen kürzerer Dauer unterteilt nach Verkehrsführung (Codierung gemäß Tabelle 5-11 und Tabelle 5-12) und Lage innerhalb oder außerhalb von Ballungsräumen (iB bzw. aB)

Längsneigung

Analog zu den bereits in Kapitel 5.1.4 beschriebenen Problemen bei der Ermittlung der maßgebenden Längsneigung bei Arbeitsstellen längerer Dauer ist auch bei Arbeitsstellen kürzerer Dauer nur eine überschlägige Einschätzung des Einflusses von Steigungen möglich, weil insbesondere die genaue Lage der Arbeitsstelle relativ zum Gradientenverlauf (soweit überhaupt bekannt) oft nicht genau ermittelt werden kann. Zudem sind im Untersuchungskollektiv nur 8 Arbeitsstellen im Bereich von Steigungstrecken enthalten. Im Rahmen der Untersuchung wurde aus diesem Grund auf die Analyse des Einflusses von Steigungen verzichtet. Stattdessen wurden Zusammenhänge aus der Analyse des Verkehrsablaufs an Arbeitsstellen längerer Dauer (vgl. Kapitel 5.1.5) übernommen.

Zusammenfassung

Insgesamt wurden fünf mögliche Einflussgrößen auf die Kapazität von Arbeitsstellen kürzerer Dauer betrachtet. Dabei stellen die Lage im Netz, die Tageszeit, der Wochentag und die Verkehrsführung nominale Größen und der SV-Anteil eine intervallskalierte Größe dar. Während die nominalen Größen in Kategorien angegeben werden (iB/aB, t/n, WT/WE, VF2/VF4/VF6/...), werden intervallskalierte Daten auf einer gleichabständigen Skala gemessen. Unter Berücksichtigung der nominal darstellbaren Einflussgrößen ergeben sich insgesamt 22 analysierbare Parameterkombinationen mit Stichprobenumfängen zwischen 1 und 20 Arbeitsstellen (vgl. Tabelle 5-17).

Verkehrsführung	t				n			
	WT		WE		WT		WE	
	iB	aB	iB	aB	iB	aB	iB	aB
VF2	20	7	0	0	0	0	0	0
VF4	11	16	1	1	0	1	0	0
VF6	4	1	1	1	5	0	0	0
VF9	2	1	3	3	3	1	0	0
VF5	8	0	2	0	0	0	0	0
VF8	18	0	1	0	0	0	0	0

Tab. 5-17: Umfang des Untersuchungskollektivs für die möglichen Parameterkombinationen

5.3.4 Statistische Bewertung der Einflussgrößen

Aufgrund der Größe des Untersuchungskollektivs bei Arbeitsstellen kürzerer Dauer war es möglich, statistische Bewertungen der Einflussgrößen auf die Kapazität durchzuführen. Insofern unterscheidet sich das nachfolgend beschriebene Vorgehen von der Analyse der Kapazität von Arbeitsstellen längerer Dauer.

Deskriptive Analyse

Die deskriptive Statistik dient dazu, die erhobenen Daten zu beschreiben und in geeigneten Abbildungen darzustellen. Anhand der Lage, Streuung und/oder Verteilung der Daten können so mögliche Zusammenhänge erkannt werden. Gleichzeitig können Ausreißer und Messfehler ermittelt werden. Dazu bieten sich verschiedene Darstellungen an. Im vorliegenden Fall wurde zunächst der Einfluss der ausgewählten Parameter auf die Kapazität ermittelt. Für die intervallskalierte Einflussgröße SV-Anteil wurde ein Streudiagramm erstellt, in dem für jede Untersuchungsstelle der SV-Anteil und die Kapazität gegeneinander aufgetragen sind. Durch unterschiedliche Darstellungen der einzelnen Punkte im Diagramm können ergänzend alle Einflussgrößen mit nur zwei Ausprägungen (iB/aB, WT/WE, t/n) dargestellt werden, sodass auch weitere Abhängigkeiten sichtbar gemacht werden.

Bild 5-18 zeigt den Einfluss des SV-Anteils auf die Kapazität unter Berücksichtigung der Lage im Netz, der Tageszeit und des Wochentags im Mittel über alle ein- und zweistreifigen Verkehrsführungen. Hierbei ist keine eindeutige Abhängigkeit der Kapazität vom SV-Anteil zu erkennen. Der leichte Rückgang der Kapazität mit zunehmendem SV-Anteil bei den einstreifigen Verkehrsführungen ergibt sich hauptsächlich durch den höheren SV-Anteil bei Arbeitsstellen außerhalb von Ballungsräumen.

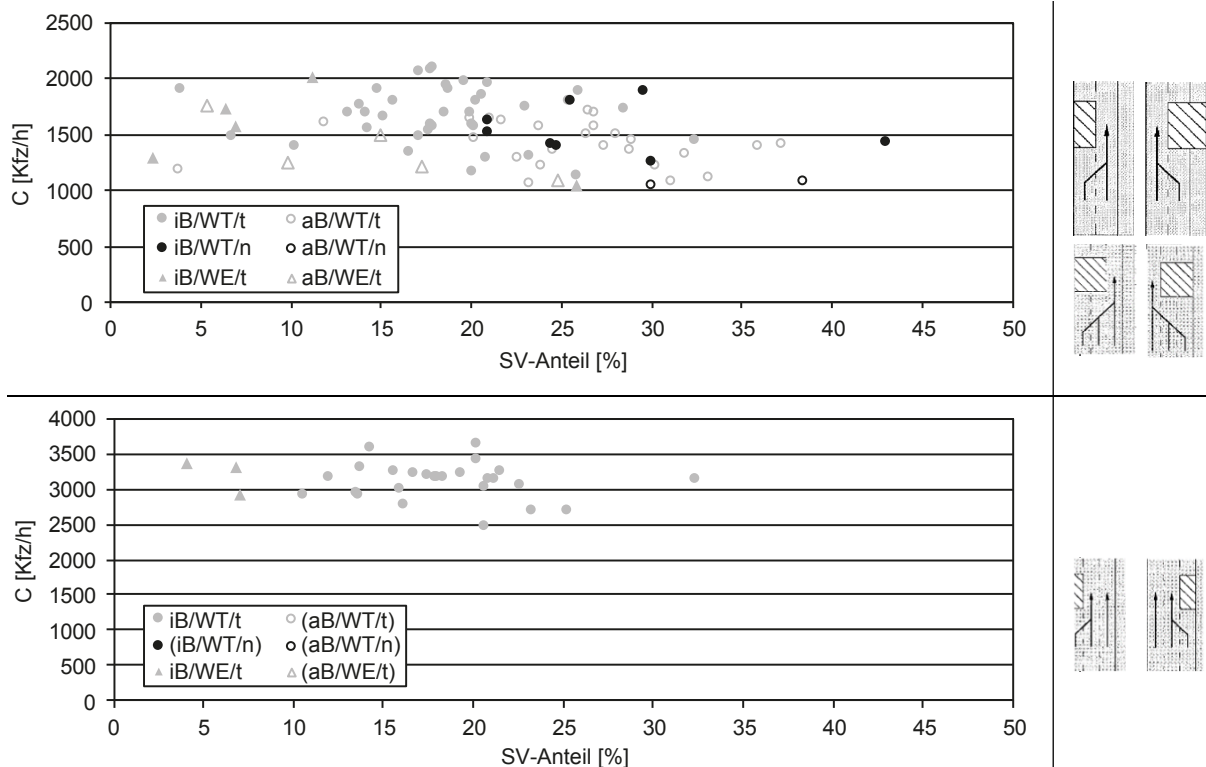


Bild 5-18: Einfluss des Schwerververkehrs auf die Kapazität unter Berücksichtigung der Lage im Netz, der Tageszeit und des Wochentags im Mittel über alle einstreifigen (oben) bzw. zweistreifigen (unten) Verkehrsführungen an Arbeitsstellen kürzerer Dauer

Es ist deutlich zu erkennen, dass vor allem die Lage im Netz einen Einfluss auf die Kapazität hat. Die Kapazitäten von Arbeitsstellen kürzerer Dauer innerhalb von Ballungsräumen liegen erkennbar höher als die Werte außerhalb von Ballungsräumen. Sowohl für die Arbeitsstellen am Wochenende als auch für die Arbeitsstellen in der Nacht ist hingegen kein auffälliger Einfluss auf die Kapazität zu erkennen, die Punkte verteilen sich relativ gleichmäßig über das Streudiagramm. Für die Arbeitsstellen mit zweistreifigen Verkehrsführungen

gen liegen deutlich weniger Kapazitätswerte, ausschließlich von Autobahnen innerhalb von Ballungsräumen, vor. Auch hier ist sehr deutlich zu erkennen, dass der SV-Anteil keinen Einfluss auf die Kapazität hat.

Die einzige Einflussgröße, die in Bild 5-18 nicht berücksichtigt werden kann, ist die Verkehrsführung. Aus diesem Grund sind in Bild 5-19 und Bild 5-20 für jede Verkehrsführung noch einmal getrennte Diagramme dargestellt. Auch bei dieser Betrachtung kann in keiner der Darstellungen eine Abhängigkeit der Kapazität vom Schwerververkehrsanteil beobachtet werden. Grundsätzlich wird deutlich, dass die einzelnen Kapazitäten auch bei vollkommen identischen Randbedingungen teilweise sehr stark streuen. Genaue Aussagen zu Lageunterschieden zwischen den verschiedenen Stichproben sind anhand der Streudiagramme allerdings nicht möglich.

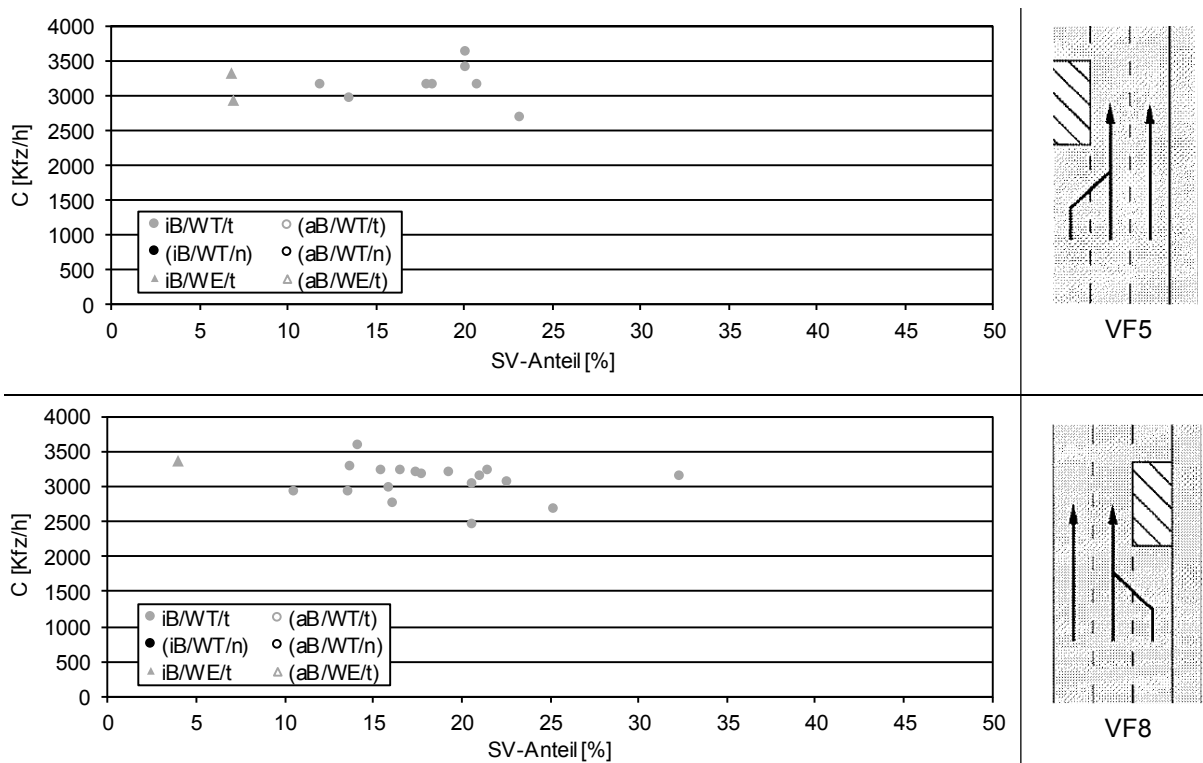


Bild 5-19: Einfluss des Schwerververkehrs auf die Kapazität unter Berücksichtigung der Lage im Netz, der Tageszeit und des Wochentags für verschiedene zweistreifige Verkehrsführungen an Arbeitsstellen kürzerer Dauer

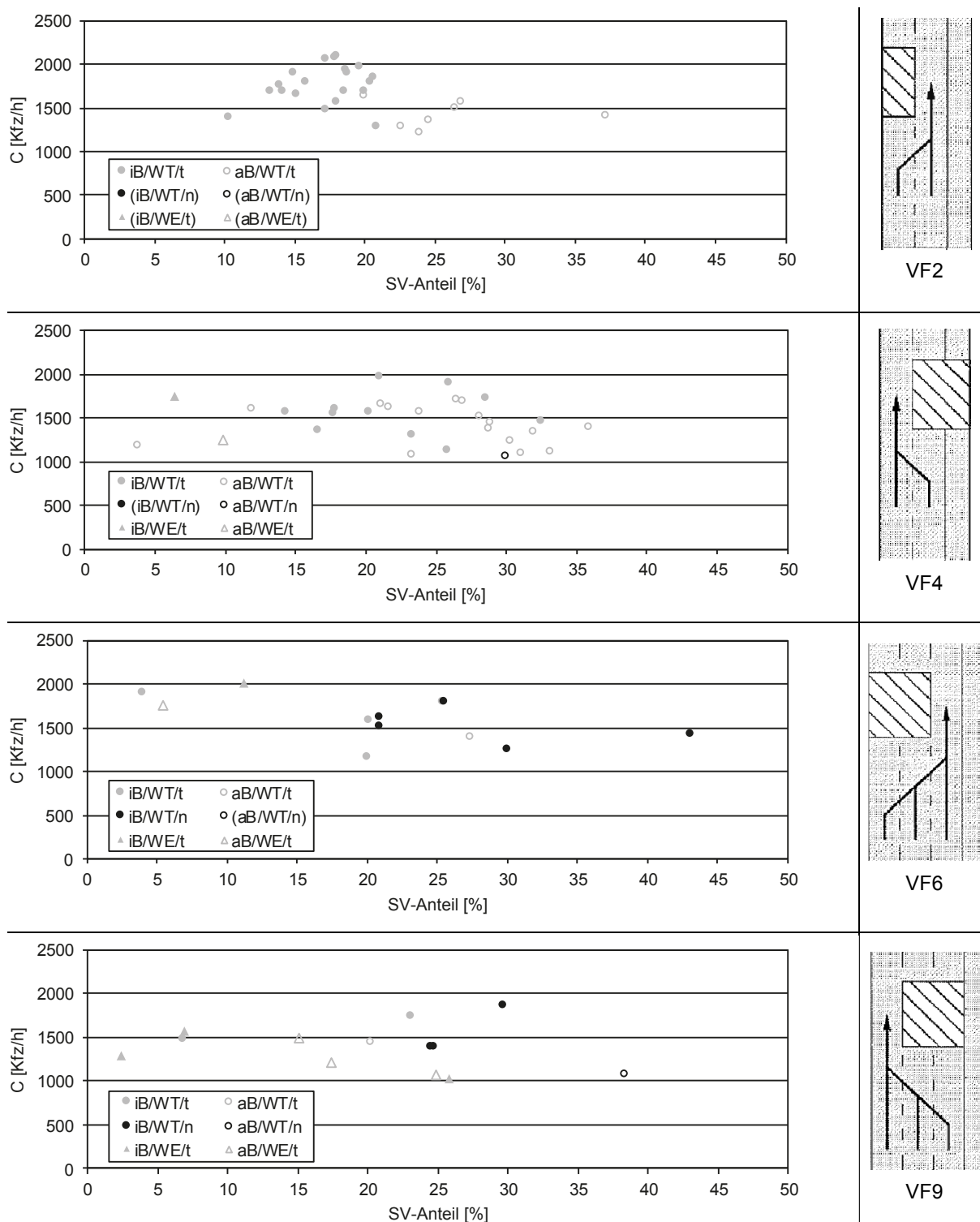


Bild 5-20: Einfluss des Schwerververkehrs auf die Kapazität unter Berücksichtigung der Lage im Netz, der Tageszeit und des Wochentags für verschiedene einstreifige Verkehrsführungen an Arbeitsstellen kürzerer Dauer

Zur Untersuchung, ob zwei Stichproben signifikant voneinander abweichen, eignet sich am besten die Boxplotdarstellung. Diese zeigt die Lage und Streuung der Werte der einzelnen Stichproben, sodass Unterschiede zwischen zwei Gruppen direkt erkennbar sind. Insgesamt werden im Boxplot fünf Werte angegeben: Maximum, oberes Quartil, Median, unteres Quartil und Minimum (vgl. Bild 5-21).

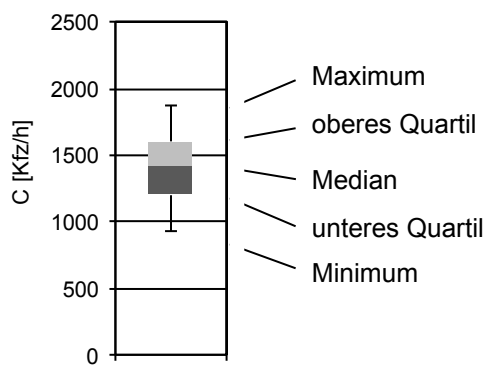


Bild 5-21: Beispiel einer Boxplotdarstellung

Für alle Kombinationen der betrachteten nominalen Merkmalsausprägungen (siehe Tabelle 5-17) werden Boxplots der Kapazitätswerte in Abhängigkeit von der Verkehrsführung dargestellt. Dies ist allerdings nur dann sinnvoll, wenn die Stichprobe ausreichend groß ist. Um die Güte der Boxplotdarstellung einschätzen zu können, wird für jede Gruppe zusätzlich die Größe der zugrundeliegenden Stichprobe angegeben. Liegt nur ein Messwert vor, wird statt des Boxplots der Einzelwert dargestellt. Bild 5-22 zeigt die Boxplots aller Parameterkombinationen für einstreifige Verkehrsführungen. Unabhängig von den übrigen Einflussgrößen liegt der Median der Kapazität hier bei Arbeitsstellen innerhalb von Ballungsräumen immer über dem Median bei Arbeitsstellen außerhalb von Ballungsräumen. Bei der Bewertung des Einflusses von Wochentag und Tageszeit auf die Kapazität zeigt sich hingegen kein eindeutiges Bild. Während bei den Verkehrsführungen VF4 und VF6 die Kapazität von Arbeitsstellen am Wochenende tendenziell sogar über der Kapazität von Arbeitsstellen an Werktagen liegt, zeigt sich bei der Verkehrsführung VF9 genau die gegenteilige Tendenz. Bei den zweistreifigen Verkehrsführungen (vgl. Bild 5-23) ist kein Unterschied zwischen Arbeitsstellen an Werktagen und am Wochenende erkennbar. Das gleiche gilt auch für den Vergleich von Tag- und Nachtbaustellen. Aufgrund der geringen Stichprobenumfänge von 1 bis 5 Arbeitsstellen je Parameterkombination sind Aussagen zum Einfluss des Wochentags und der Tageszeit auf die Kapazität allerdings mit Unsicherheiten behaftet. Es zeichnet sich jedoch ab, dass kein wesentlicher Einfluss besteht.

Bild 5-24 zeigt den Einfluss der drei Parameter Lage im Netz, Tageszeit und Wochentag im Mittel über alle ein- und zweistreifigen Verkehrsführungen. Auch hier sind deutliche Unterschiede zwischen den Kapazitäten von Arbeitsstellen innerhalb und außerhalb von Ballungsräumen zu erkennen. Einflüsse von Tageszeit und Wochentag sind nicht vorhanden. Auch ein möglicher Unterschied der Kapazität pro Fahrstreifen für die ein- und zweistreifigen Verkehrsführungen ist nicht erkennbar. Die Kapazität der zweistreifigen Verkehrsführungen ist in etwa doppelt so hoch wie die Kapazität der einstreifigen Verkehrsführungen.

Im nächsten Schritt wird der Einfluss der Verkehrsführung auf die Kapazität betrachtet. Hierbei können zwei unabhängige Faktoren einen Einfluss auf die Kapazität haben: Die Anzahl der Fahrstreifen im Normalzustand und im Zustand mit Arbeitsstelle (2/1, 3/1, 3/2) sowie die Seite des Fahrstreifeneinzugs (rechts oder links). In Bild 5-25 sind Boxplots für alle einstreifigen Verkehrsführungen in Abhängigkeit von der Lage im Netz dargestellt. Da im Schritt zuvor bereits der geringe Einfluss der Tageszeit und des Wochentags festgestellt wurde, sind alle Parameterkombinationen zusammengefasst, um die Stichprobengrößen zu erhöhen. Der Einfluss der Seite des Fahrstreifeneinzugs kann durch einen Vergleich der Verkehrsführungen VF2 und VF4 sowie VF6 und VF9 und der Einfluss der Fahrstreifenreduktion durch einen Vergleich der Verkehrsführungen VF2 und VF6 sowie VF4 und VF9 erfolgen.

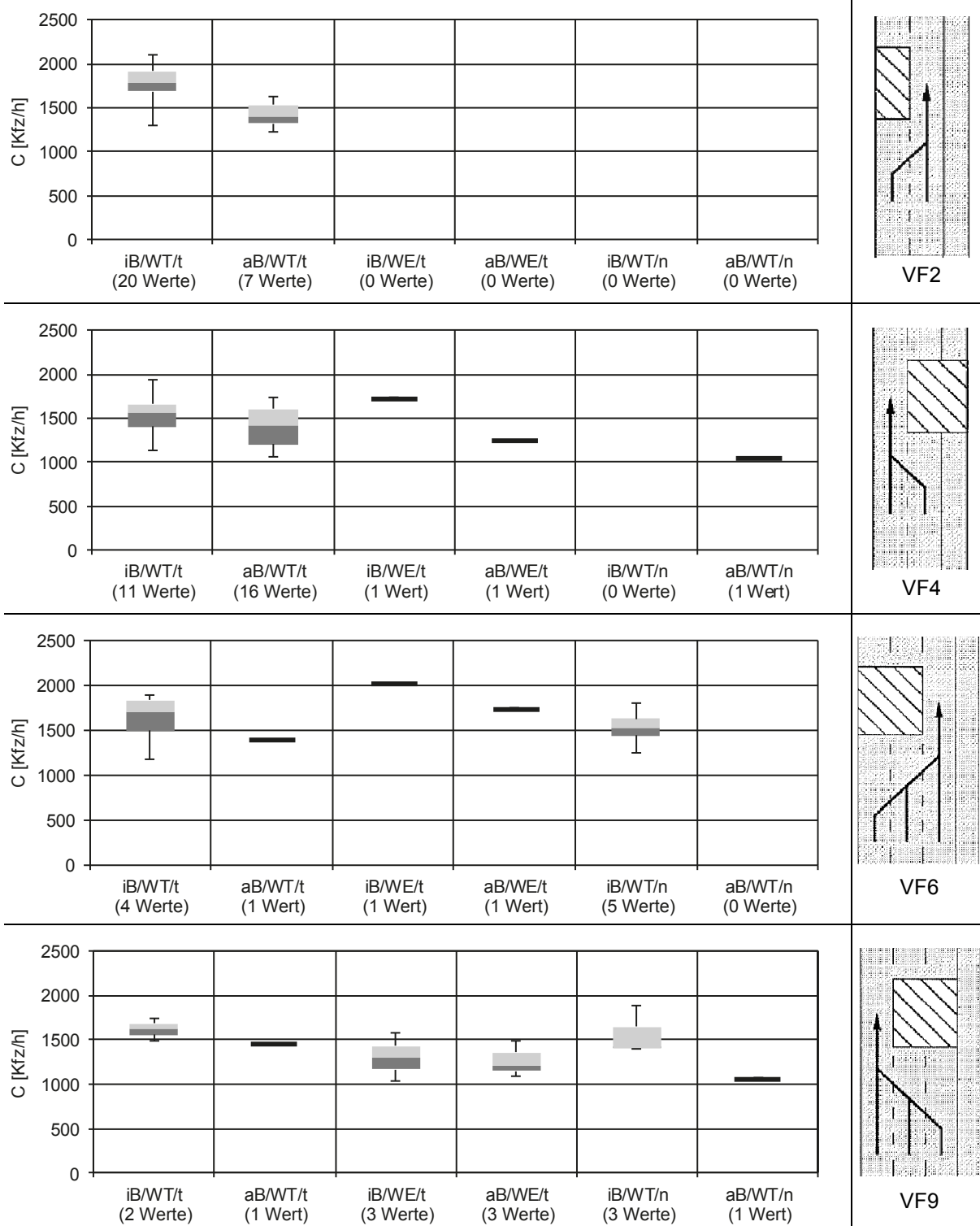


Bild 5-22: Streuung der Kapazitäten in Arbeitsstellen kürzerer Dauer für verschiedene Kombinationen von Einflussparametern bei verschiedenen einstreifigen Verkehrsführungen

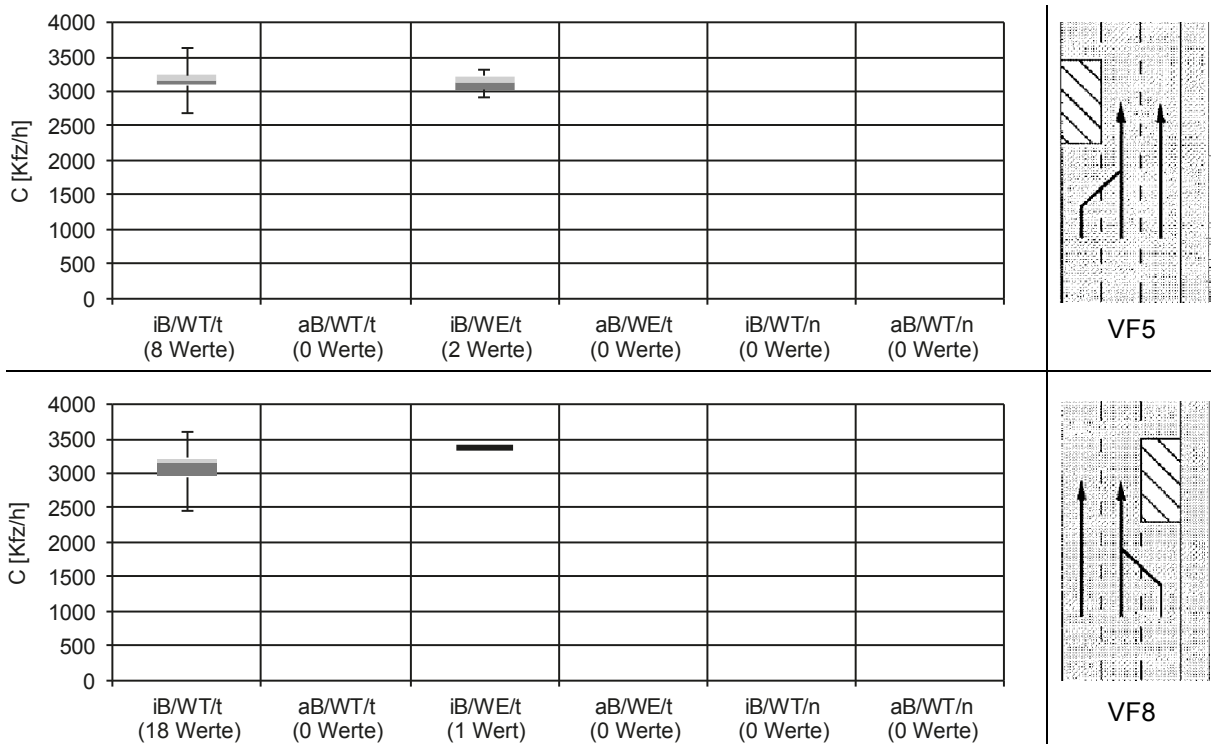


Bild 5-23: Streuung der Kapazitäten in Arbeitsstellen kürzerer Dauer für verschiedene Kombinationen von Einflussparametern bei verschiedenen zweistreifigen Verkehrsführungen

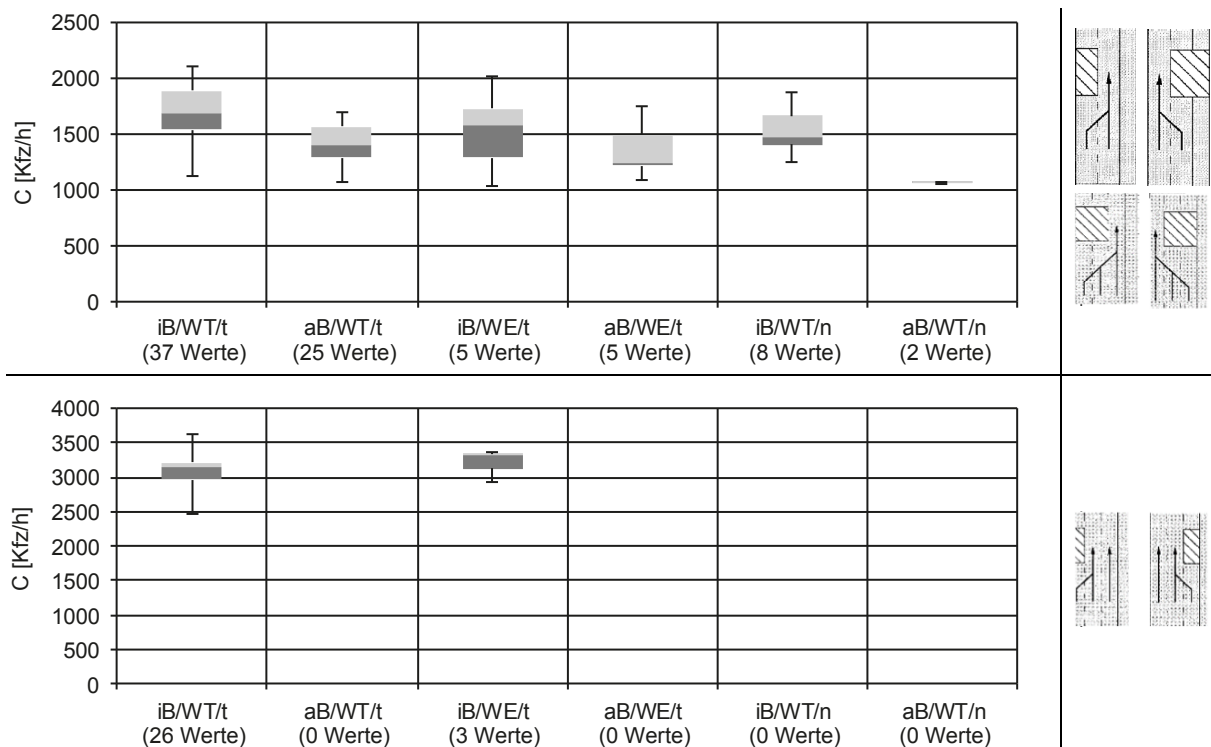


Bild 5-24: Streuung der Kapazitäten in Arbeitsstellen kürzerer Dauer für verschiedene Kombinationen von Einflussparametern im Mittel über alle einstreifigen (oben) bzw. zweistreifigen (unten) Verkehrsführungen

In drei von vier Fällen liegt die Kapazität bei einem Linkseinzug etwas höher als bei einem Rechtseinzug. Eine Ausnahme bilden die Verkehrsführungen VF2 und VF4 außerhalb von Ballungsräumen. Hier ist kein Unterschied zu erkennen. Erfolgt eine Reduktion von zwei auf einen Fahrstreifen, ist die Kapazität etwas höher als bei der Reduktion von drei auf einen Fahrstreifen. Die Unterschiede sind aber nicht so eindeutig wie bei dem Vergleich der Seite des Fahrstreifeneinzugs.

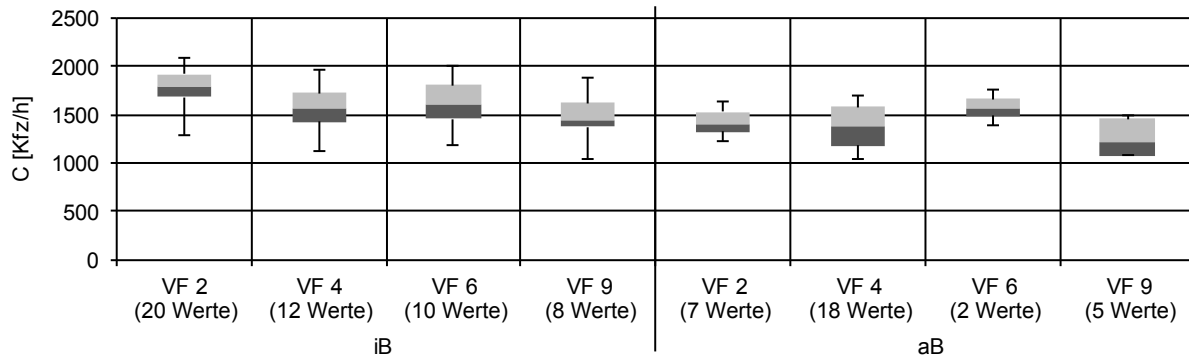


Bild 5-25: Streuung der Kapazitäten in Arbeitsstellen kürzerer Dauer für alle einstreifigen Verkehrsführungen in Abhängigkeit von der Lage im Netz

Für die beiden zweistreifigen Verkehrsführungen VF5 und VF8 lagen nur Kapazitätswerte von Arbeitsstellen innerhalb von Ballungsräumen vor. Auch hier kann zwischen Rechts- und Linkseinzug unterschieden werden. Die Kapazität bei Linkseinzug ist hier minimal höher als bei Rechtseinzug (Bild 5-26).

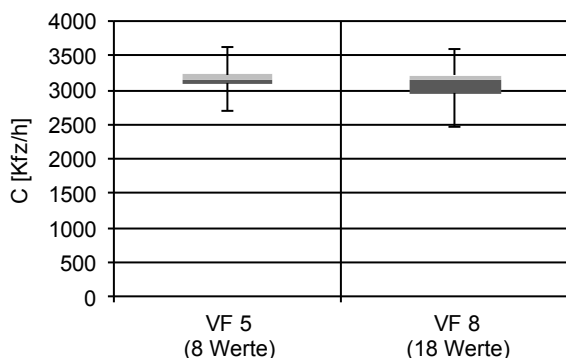


Bild 5-26: Streuung der Kapazitäten in Arbeitsstellen kürzerer Dauer für alle zweistreifigen Verkehrsführungen für die Parameterkombination iB/WT/t

Nachdem zunächst mit deskriptiven Methoden wahrscheinliche Einflussgrößen auf die Kapazität ermittelt wurden, wurden diese in einem nächsten Schritt mithilfe von Regressionsanalysen und Signifikanztests überprüft.

Multiple lineare Regression

Eine Regressionsanalyse dient dazu, eine abhängige Variable durch eine oder mehrere unabhängige Variablen zu erklären. Bei der linearen Regression wird ein linearer Zusammenhang zwischen der abhängigen und den unabhängigen Variablen angenommen. Liegt nur eine unabhängige Variable vor, so handelt es sich um eine einfache Regression. In diesem zweidimensionalen Fall ist es möglich, eine Regressionsgerade an die Variablen anzupassen. Liegen mehrere unabhängige Variablen vor, handelt es sich um eine multiple Regression mit entsprechend höherdimensionalen Anpassungen. Je höher die Anzahl unabhängiger Variablen ist, umso komplexer wird die Regressionsanalyse. Im vorliegenden Fall stellt

die Kapazität die abhängige Größe dar, die durch bis zu sechs unabhängige Einflussgrößen bzw. Attribute erklärt wird. Somit ergibt sich die folgende Regressionsgleichung mit insgesamt sieben Regressionskoeffizienten:

$$C = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4 + b_5 \cdot x_5 + b_6 \cdot x_6 \quad (5-5)$$

mit:

C = Kapazität [Kfz/h]

b_0, b_1, b_2, \dots = Regressionskoeffizienten [-]

x_1, x_2, \dots = Attribute [-]

Zur Aufstellung des Regressionsmodells müssen die Attribute mit nominalen Größen in Zahlenwerte transformiert werden (vgl. Tabelle 5-18). Für alle Attribute mit genau zwei Merkmalsausprägungen wird eine binäre Transformation gewählt. Dabei wird immer die Ausprägung mit einer 1 bezeichnet, die tendenziell die Kapazität abmindert (Fahrstreifeneinzug rechts, aB, nachts, Wochenende). Den verschiedenen Formen von Fahrstreifenreduktionen (von 2 auf 1, von 3 auf 1 und von 3 auf 2) werden ebenfalls unterschiedliche positive Zahlenwerte zugeordnet. Dabei werden die Kapazitäten der zweistreifigen Verkehrsführungen in Kapazitäten pro Fahrstreifen umgerechnet. Der SV-Anteil wird als Wert übernommen und in Prozent angegeben. Der Regressionskoeffizient b_0 gibt somit die theoretisch maximale Kapazität pro Fahrstreifen an. Durch die verschiedenen Einflussgrößen wird die Kapazität dann entsprechend abgemindert.

Attribut k	Ausprägung	x_k
Fahrstreifenreduktion (von/nach)	2/1	2
	3/1	3
	3/2	1,5
Seite Fahrstreifeneinzug	links	0
	rechts	1
Lage im Netz	iB	0
	aB	1
SV-Anteil	SV-Anteil in %	0-100
Tageszeit	tags	0
	nachts	1
Wochentag	WT	0
	WE	1

Tab. 5-18: Eingangsgrößen für das multiple lineare Regressionsmodell

Zur Ermittlung der Regressionskoeffizienten wurde die Methode der kleinsten Fehlerquadrate verwendet. Hierbei wurde die Differenz zwischen der empirischen und der modellbasiert ermittelten Kapazität für jede Untersuchungsstelle quadriert und die Summe über alle Untersuchungsstellen gebildet. Über die Minimierung dieses Wertes konnten die Regressionskoeffizienten bestimmt werden.

In Tabelle 5-19 sind die Koeffizienten für das Regressionsmodell dargestellt. Wie erwartet handelt es sich überwiegend um negative Werte, da die Kapazität ausgehend von b_0 abgemindert wird. Bevor eine Bewertung der Güte des Modells erfolgt, ist es sinnvoll, zunächst mithilfe statistischer Tests zu überprüfen, welche der sechs Attribute die Kapazität signifikant beeinflussen. Damit können Attribute, die keinen Einfluss auf die Kapazität haben, vorher aus dem Modell entfernt werden.

Bezeichnung	Koeffizienten	t-Statistik	p-Wert	untere Konfidenzgrenze (95 %)	obere Konfidenzgrenze (95 %)
b ₀	1.743,79	15,399	0,000	1.519,23	1.968,36
b ₁ : Fahrstreifenreduktion	31,21	0,658	0,512	-62,85	125,27
b ₂ : Seite Fahrstreifeneinzug	-122,22	-2,931	0,004	-204,91	-39,53
b ₃ : Lage im Netz	-173,28	-3,419	0,001	-273,79	-72,77
b ₄ : SV-Anteil	-6,03	-1,770	0,080	-12,78	0,72
b ₅ : Tageszeit	-120,77	-1,373	0,173	-295,22	53,69
b ₆ : Wochentag	-124,49	-1,620	0,108	-276,85	27,88

Tab. 5-19: Ergebnisse der multiplen linearen Regression bei Berücksichtigung von sechs unabhängigen Variablen (Attribute mit signifikantem Einfluss auf die Kapazität sind grau hinterlegt) und einem Konfidenzniveau von 95 %

Der Einfluss eines Attributs auf das Ergebnis der Regressionsanalyse kann mithilfe des Konfidenzintervalls bewertet werden. Liegt der Wert Null zwischen der oberen und unteren Konfidenzgrenze, dann kann die Hypothese, dass der Regressionskoeffizient gleich Null ist, nicht verworfen werden, d. h. das Attribut hat keinen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis. Eine zusätzliche Bewertung kann mithilfe der t-Statistik und dem dazugehörigen p-Wert erfolgen. Ist der Betrag des t-Wertes kleiner als der kritische t-Wert ($t_{\text{krit}} = 2,447$ für $\alpha = 0,05$) bzw. der p-Wert größer als das Signifikanzniveau α , so wird die Nullhypothese abgelehnt, d. h. das Attribut hat keinen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis.

Die Ergebnisse der Regressionsanalyse in Tabelle 5-19 bestätigen die bereits im Rahmen der deskriptiven Statistik vermuteten Zusammenhänge. Hiernach haben nur die Verkehrsführung (genauer: die Seite des Fahrstreifeneinzugs) und die Lage im Netz einen signifikanten Einfluss auf die Kapazität (in Tabelle 5-19 grau hinterlegt). Die Attribute Wochentag, Tageszeit, SV-Anteil und Fahrstreifenreduktion und somit auch die Anzahl der Fahrstreifen haben hingegen keinen signifikanten Einfluss.

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wird ein weiteres Regressionsmodell mit nur noch zwei unabhängigen Variablen erstellt (vgl. Tabelle 5-20). Die statistischen Tests zeigen hier erneut, dass die Parameter „Seite des Fahrstreifeneinzugs“ und „Lage im Netz“ einen signifikanten Einfluss auf die Kapazität haben.

Bezeichnung	Koeffizienten	t-Statistik	p-Wert	untere Konfidenzgrenze (95 %)	obere Konfidenzgrenze (95 %)
b ₀	1.678,35	53,379	0,000	1.616,03	1.740,67
b ₁ : Seite Fahrstreifeneinzug	-135,36	-3,266	0,001	-217,51	-53,21
b ₂ : Lage im Netz	-202,46	-4,456	0,000	-292,52	-112,41

Tab. 5-20: Ergebnisse der multiplen linearen Regression bei Berücksichtigung der zwei unabhängigen Variablen mit signifikantem Einfluss auf die Kapazität und einem Konfidenzniveau von 95 %

Da es sich bei beiden Einflussfaktoren um nominale Variablen mit den Ausprägungen 0 und 1 handelt, ergeben sich für das Modell insgesamt nur vier verschiedene Kapazitäten mit den Randbedingungen 0/0, 0/1, 1/0 und 1/1. Die Gegenüberstellung der empirisch und modellbasiert ermittelten Kapazitäten in Bild 5-27 zeigt, dass die mittleren Kapazitäten der vier Teilkollektive durch das Modell gut repräsentiert werden. Die erhebliche, aber für empirische Kapazitätsanalysen typische Streuung der ermittelten Kapazitäten auch bei identischen Randbedingungen kann in einem deterministischen Modell allerdings nicht abgebildet werden.

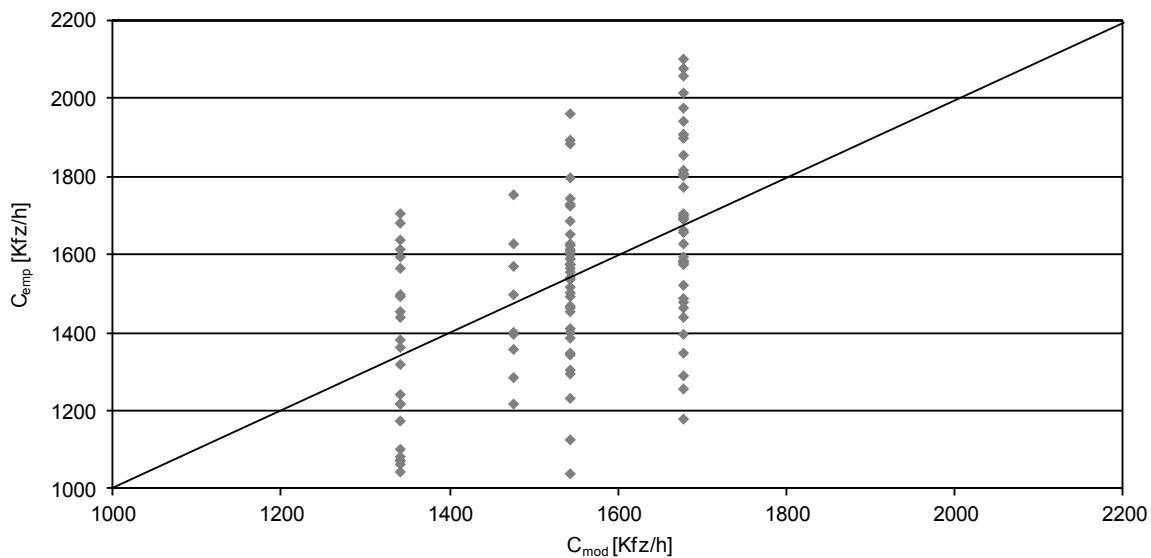


Bild 5-27: Gegenüberstellung der empirisch ermittelten Kapazitäten (C_{emp}) und der mit dem Regressionsmodell mit zwei unabhängigen Variablen berechneten Kapazitäten (C_{mod})

Prüfung der statistischen Unabhängigkeit zweier Gruppen von Merkmalsausprägungen

Nachdem mithilfe der linearen Regression die maßgebenden Einflussgrößen „Verkehrsführung“ und „Seite des Fahrstreifeneinzugs“ ermittelt wurden, kann ergänzend überprüft werden, ob der Unterschied zwischen zwei Gruppen von Parameterkombinationen signifikant ist, ob also z. B. die Kapazitäten innerhalb und außerhalb von Ballungsräumen signifikant gleich oder verschieden sind.

Sind die vorliegenden Daten normalverteilt, so dürfen parametrische Tests als Signifikanztest verwendet werden. Da allerdings im vorliegenden Fall nicht von einer Normalverteilung der Daten ausgegangen werden kann, müssen nichtparametrische Tests zur Anwendung kommen. Hier bietet sich der Mann-Whitney-U-Test (MANN und WHITNEY, 1947) an. Dieser dient zur Überprüfung der Signifikanz der Übereinstimmung zweier Verteilungen anhand des Medians. Die zu prüfende Null-Hypothese sagt dabei aus, dass sich die Verteilungen bzw. Mediane statistisch nicht signifikant voneinander unterscheiden.

Nachfolgend sind die Ergebnisse von insgesamt vier verschiedenen Mann-Whitney-U-Tests dargestellt. Tabelle 5-21 und Tabelle 5-22 zeigen den Zusammenhang zwischen den Verkehrsführungen VF2 und VF4 sowie VF2 und VF6. Beim Vergleich der Verkehrsführungen VF2 und VF4 wird der Einfluss der Seite der Fahrstreifenreduktion geprüft. Die beiden Stichproben der Verkehrsführungen VF2 und VF4 in der Parameterkombination iB/WT/t unterscheiden sich signifikant, d. h. es ist sinnvoll, für Rechts- und Linkseinzug unterschiedliche Kapazitäten anzunehmen. Im zweiten Test wird der Unterschied zwischen einer Reduktion von einem (VF2) und einer Reduktion von zwei (VF6) Fahrstreifen geprüft. Hier kann kein signifikanter Unterschied festgestellt werden.

Tabelle 5-23 und Tabelle 5-24 zeigen den Vergleich der Kapazität von Arbeitsstellen kürzerer Dauer innerhalb und außerhalb von Ballungsräumen für die Verkehrsführung VF2 und tagsüber und nachts für die Verkehrsführung VF6. Der Unterschied zwischen den Kapazitäten von Arbeitsstellen innerhalb und außerhalb von Ballungsräumen ist signifikant, der Unterschied zwischen Arbeitsstellen am Tag und bei Nacht nicht.

Weitere Tests, insbesondere zur Bewertung der Kapazität an Werktagen und Wochenenden, sind aufgrund der geringen Stichprobengrößen nicht sinnvoll.

Mann-Whitney-U-Test iB/WT/t			
	VF2	VF4	Gesamt
Rangsumme:	375	121	496
N	20	11	31
U	165	55	220
Verbundränge	1		
Statistiken	121		
U-Statistiken	$55,0 < U_{krit} = 62$		
p-Wert	$0,023 < \alpha = 0,05$		

Tab. 5-21: Mann-Whitney-U-Tests zur Prüfung der Übereinstimmung der Verteilungen der Kapazitäten bei Verkehrsführung 2 und 4 am Beispiel der Parameterkombination iB/WT/t

Mann-Whitney-U-Test iB/WT/t			
	VF2	VF6	Gesamt
Rangsumme:	261,5	38,5	300
N	20	4	24
U	51,5	28,5	80
Verbundränge	2		
Statistiken	38,5		
U-Statistiken	$28,5 > U_{krit} = 14$		
p-Wert	$0,373 > \alpha = 0,05$		

Tab. 5-22: Mann-Whitney-U-Tests zur Prüfung der Übereinstimmung der Verteilungen der Kapazitäten bei Verkehrsführung 2 und 6 am Beispiel der Parameterkombination iB/WT/t

Mann-Whitney-U-Test VF2			
	iB	aB	Gesamt
Rangsumme:	337	41	378
N	20	7	27
U	127	13	140
Verbundränge	1		
Statistiken	41		
U-Statistiken	$13,0 < U_{krit} = 34$		
p-Wert	$0,002 < \alpha = 0,05$		

Tab. 5-23: Mann-Whitney-U-Tests zur Prüfung der Übereinstimmung der Verteilungen der Kapazitäten innerhalb und außerhalb von Ballungsräumen am Beispiel von Verkehrsführung 2

Mann-Whitney-U-Test VF6			
	iB/WT/t	iB/WT/n	Gesamt
Rangsumme:	23	22	45
N	4	5	9
U	13	7	20
Verbundränge	0		
Statistiken	22		
U-Statistiken	$7,0 > U_{krit} = 1$		
p-Wert	$0,462 > \alpha = 0,05$		

Tab. 5-24: Mann-Whitney-U-Tests zur Prüfung der Übereinstimmung der Verteilungen der Kapazitäten tagsüber und nachts am Beispiel von Verkehrsführung 6

5.3.5 Ableitung von standardisierten Kapazitäten

Als maßgebende Einflussgrößen auf die Kapazität an Arbeitsstellen kürzerer Dauer wurden in den vorangegangenen Abschnitten die Lage im Netz (innerhalb oder außerhalb von Ballungsräumen) und die Verkehrsführung bzw. die Seite des Fahrstreifeneinzugs identifiziert. Die Anzahl der Fahrstreifen, der SV-Anteil, die Tageszeit und der Wochentag haben hingegen keinen signifikanten Einfluss.

Zur Ermittlung von standardisierten Kapazitätswerten in Abhängigkeit von den maßgebenden Einflussgrößen bieten sich als Folge der durchgeführten Analysen zwei Verfahren an. Zum einen kann das entwickelte Regressionsmodell zur Bestimmung der Kapazitätswerte herangezogen werden. Es ergibt sich folgende Regressionsformel, deren Ergebnisse in Tabelle 5-25 dargestellt sind:

$$C_{FS} = -1.678 - 135 \cdot x_1 - 202 \cdot x_2 \quad (5-6)$$

mit:

$$C_{FS} = \text{Kapazität pro Fahrstreifen} \quad [\text{Kfz/h}]$$

$$x_1 = \text{Seite des Fahrstreifeneinzugs (rechts: } x_1 = 1, \text{ links: } x_1 = 0) \quad [-]$$

$$x_2 = \text{Lage im Netz (aB: } x_2 = 1, \text{ iB: } x_2 = 0) \quad [-]$$

Zum anderen können die Mediane oder alternativ Perzentilwerte der Kapazitäten der vier maßgebenden Parameterkombinationen verwendet werden. Die zugehörigen Boxplotdarstellungen sind in Bild 5-28 abgebildet.

Verkehrsführung	Fahrstreifeneinzug links		Fahrstreifeneinzug rechts	
Lage im Netz	iB	aB	iB	aB
$C_{\text{Regression}}$ [Kfz/h/FS]	1.678	1.476	1.543	1.340
C_{Median} [Kfz/h/FS]	1.692	1.401	1.565	1.360
$C_{25.\text{Perzentil}}$ [Kfz/h/FS]	1.561	1.358	1.432	1.100
$C_{\text{gewählt}}$ [Kfz/h/FS]	1.650	1.386	1.518	1.275

Tab. 5-25: Kapazitäten pro Fahrstreifen für Verkehrsführungen mit Links- und Rechtseinzug innerhalb und außerhalb von Ballungsräumen auf der Grundlage verschiedener Erhebungsmethoden

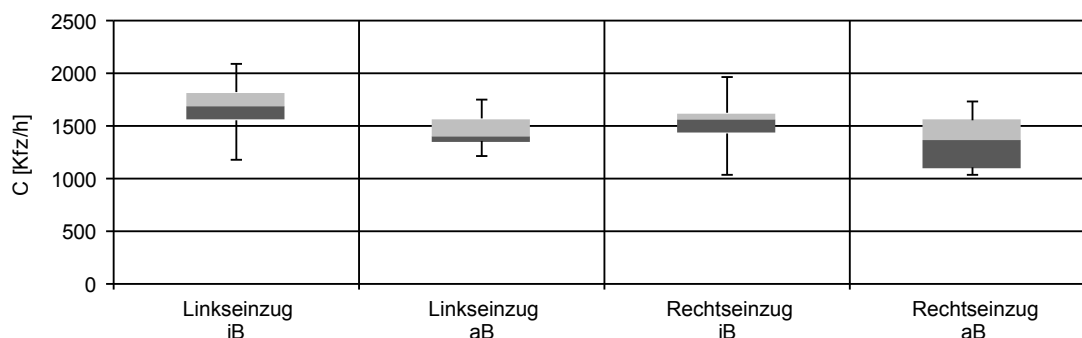


Bild 5-28: Darstellung der Streuung der Kapazitäten für die vier maßgebenden Parameterkombinationen

Für die Entwicklung eines Kapazitätsmodells wurden analog zu Arbeitsstellen längerer Dauer eine Grundkapazität und Abminderungsfaktoren festgelegt. Aufgrund der Bandbreite der empirisch ermittelten Kapazitäten wurden die Grundkapazität und die Abminderungsfaktoren so angepasst, dass die resultierenden Kapazitätswerte zwischen dem Median und dem 25. Perzentil nach Tabelle 5-25 liegen. Die Grundkapazität bezieht sich auf Arbeitsstellen innerhalb von Ballungsräumen mit Fahrstreifeneinzug links, d. h. auf die Verkehrsfüh-

rung mit der höchsten Kapazität, und wird mit 1.650 Kfz/h/FS angesetzt. Der Einfluss der Lage außerhalb von Ballungsräumen wird mit einem Abminderungsfaktor $f_{ab} = 0,84$ und der Einfluss eines Fahrstreifeneinzugs auf der rechten Seite mit einem Abminderungsfaktor $f_{FSE} = 0,92$ berücksichtigt. Mit diesen Parametern ergeben sich die in der letzten Zeile von Tabelle 5-25 dargestellten Kapazitäten. Der Abminderungsfaktor für linkseingezogene Fahrstreifen gilt allerdings nur, wenn auch am linken Fahrbahnrand gearbeitet werden soll. Wird der Fahrstreifen links eingezogen und die Fahrbahn danach wieder auf den linken Fahrstreifen verschwenkt, wird die Kapazität möglicherweise durch die freie Verschwenkung (ohne Markierung etc.) negativ beeinflusst. Die hier dargestellten Werte können daher nicht als Begründung für die Anordnung eines Fahrstreifeneinzugs auf der linken Fahrbahnseite bei Arbeiten auf dem rechten Fahrstreifen herangezogen werden.

Ergänzend zu den auf der Grundlage der empirischen Daten ermittelten Kapazitäten für die Verkehrsführungen VF2, VF4, VF6, VF9, VF5 und VF8 können anhand von Analogieschlüssen auch Abminderungsfaktoren für alle anderen Verkehrsführungen an Arbeitsstellen kürzerer Dauer abgeleitet werden. Die in Tabelle 5-25 angegebenen Kapazitäten pro Fahrstreifen gelten auch für einstreifige oder mehrstreifige Verkehrsführungen, an denen der linke oder rechte Fahrstreifen reduziert wird. Da das Vorhandensein einer Fahrstreifenreduktion sowohl bei Arbeitsstellen längerer als auch bei Arbeitsstellen kürzerer Dauer nach den Ergebnissen der empirischen Analysen keinen Einfluss auf die Kapazität hat, kann die Grundkapazität für linkseingezogene Fahrstreifen auch für Arbeitsstellen ohne Fahrstreifenreduktion (z. B. VF1) übernommen werden. Dies gilt nicht für ausschließliche Arbeiten auf dem Seitenstreifen (VF0). Hier kann davon ausgegangen werden, dass die Kapazität nicht beeinflusst wird.

Insgesamt werden über Analogieschlüsse drei weitere Einflussfaktoren berücksichtigt: die Verengung von Fahrstreifen (VF1) und die Verschwenkung von Fahrstreifen unter Ausnutzung des Seitenstreifens (VF3, VF7, VF10, VF11) als Varianten der Verkehrsführung sowie die Längsneigung.

Werden Fahrstreifen innerhalb der Arbeitsstelle kürzerer Dauer verengt, wird analog zu dem Vorgehen für Arbeitsstellen längerer Dauer ein Abminderungsfaktor von 0,90 gewählt. Der Faktor wird nur für den in der Breite reduzierten Fahrstreifen angenommen.

Einen weiteren Einfluss auf die Kapazität kann die Verschwenkung der Fahrstreifen unter Ausnutzung des Seitenstreifens haben. Bisher gibt es zwei Untersuchungen, in denen Kapazitäten bzw. Abminderungsfaktoren für diesen Fall bestimmt wurden. STÖCKERT und KLOTZ (1999) geben einen Faktor von 0,50 an. Dieser ist extrem gering und wird mit der mangelnden Akzeptanz der Nutzung des Seitenstreifens begründet, da die Seitenstreifenutzung zum Zeitpunkt der Analyse noch nicht sehr weit verbreitet war. OBER-SUNDERMEIER (2003) wählt als Abminderungsfaktor den Wert 0,90. Dieser wird für die vorliegenden Untersuchungen übernommen. Eine Ausnahme bilden Arbeitsstellen kürzerer Dauer, die auf Strecken mit temporärer Seitenstreifenfreigabe durchgeführt werden. Da hier die entsprechenden Anlagen zur Überleitung des Verkehrs auf den Seitenstreifen mitbenutzt werden können, wird hier keine Abminderung der Kapazität über die Grundkapazität hinaus vorgenommen. Bei der Berücksichtigung der Längsneigung wird ebenfalls auf die Ergebnisse der Analysen an Arbeitsstellen längerer Dauer zurückgegriffen. Die Abminderungsfaktoren von 0,90 für Steigungen zwischen 2 und 4 % sowie von 0,80 für Steigungen über 4 % werden für Arbeitsstellen kürzerer Dauer übernommen.

Die Kapazität für die betrachtete Fahrtrichtung im Bereich der Arbeitsstelle kürzerer Dauer berechnet sich dann nach folgendem Modell:

$$C = G \cdot f_{aB} \cdot f_{FSE} \cdot f_V \cdot f_s \cdot \sum_{i=1}^n f_{b,i} \quad (5-7)$$

mit:

C = Kapazität für die betrachtete Fahrtrichtung [Kfz/h]

G = Grundkapazität für einen Fahrstreifen [Kfz/h]
= 1.650

f_{aB} = Faktor für den Einfluss der Lage im Netz [-]
= $\begin{cases} 1,00 & \text{für Arbeitsstellen innerhalb von Ballungsräumen (iB)} \\ 0,84 & \text{für Arbeitsstellen außerhalb von Ballungsräumen (aB)} \end{cases}$

f_{FSE} = Faktor für den Einfluss der Seite des Fahrstreifeneinzugs (FSE) [-]
= $\begin{cases} 1,00 & \text{für Fahrstreifeneinzug links} \\ 0,92 & \text{für Fahrstreifeneinzug rechts} \end{cases}$

f_V = Faktor für den Einfluss einer Verschwenkung der Fahrstreifen auf den Seitenstreifen [-]
= $\begin{cases} 1,00 & \text{ohne Verschwenkung} \\ 1,00 & \text{für Verschwenkung unter Nutzung von Anlagen für die temp.} \\ & \text{Seitenstreifenfreigabe} \\ 0,90 & \text{für Verschwenkung mit herkömmlicher Beschilderung} \end{cases}$

f_s = Faktor für den Einfluss der Längsneigung s [-]
= $\begin{cases} 1,00 & \text{für } s \leq 2 \% \\ 0,90 & \text{für } 2 \% < s \leq 4 \% \\ 0,80 & \text{für } s > 4 \% \end{cases}$

n = Anzahl der Behelfsfahrstreifen [-]

$f_{b,i}$ = Faktor für den Einfluss der Fahrstreifenbreite für den Fahrstreifen i [-]
= $\begin{cases} 1,00 & \text{für unveränderte Fahrstreifenbreite} \\ 0,90 & \text{für verringerte Fahrstreifenbreite} \end{cases}$

Die in Tabelle 5-25 dargestellten bzw. mit der Formel 5-7 ermittelten Kapazitätswerte für Arbeitsstellen kürzerer Dauer stellen, wie bereits in Kapitel 5.3.2 beschrieben, die Kapazität im Stau dar. Um hieraus auf die Kapazität im fließenden Verkehr schließen zu können, wird ein Umrechnungsfaktor ermittelt, der die Beziehung zwischen den beiden Kapazitätswerten, den sogenannten Capacity Drop (CD), berücksichtigt. Zur Bestimmung dieses Umrechnungsfaktors werden Arbeitsstellen benötigt, für die sowohl die Kapazität im fließenden als auch im gestauten Verkehr ermittelt werden kann (vgl. Kapitel 5.3.2). Dies trifft innerhalb des 111 Arbeitsstellen umfassenden Untersuchungskollektivs nur auf 5 Arbeitsstellen zu.

Die ermittelten Werte für die einzelnen Kapazitäten und den jeweils zugehörigen Capacity Drop sind in Tabelle 5-26 dargestellt. Es wird deutlich, dass die ermittelten Werte für den

Arbeitsstellen-ID	$C_{\text{fließend}}$ [Kfz/h]	C_{Stau} [Kfz/h]	CD [%]
AkD 11	2.784	2.924	-5,0
AkD 23	2.772	2.932	-5,8
AkD 22	2.184	2.012	7,9
AkD 61	1.332	1.540	-15,6
AkD 53	2.100	1.694	19,3

Tab. 5-26: Kapazitäten im fließenden Verkehr $C_{\text{fließend}}$ und im Stau C_{Stau} für fünf ausgewählte Arbeitsstellen

Capacity Drop stark streuen. Zumindest mit dem zur Verfügung stehenden Untersuchungskollektiv war es dementsprechend nicht möglich, einen Umrechnungsfaktor für die standardisierten Kapazitätswerte zu ermitteln. Da die Kapazität im Stau im Mittel nahezu gleich der Kapazität im fließenden Verkehr ist, wurden die ermittelten standardisierten Kapazitäten als Kapazitäten sowohl im fließenden als auch im gestauten Verkehr festgelegt.

5.3.6 Vergleich des entwickelten Kapazitätsmodells mit dem RBAP-Modell und Literaturangaben

Die Kapazität von Arbeitsstellen kürzerer Dauer auf deutschen Autobahnen wurde bisher im Wesentlichen in den Untersuchungen von STÖCKERT und KLOTZ (1999), BECKMANN und ZACKOR (2001) und NORKAUER (2004) analysiert. Weiterhin ist auch das RBAP-Verfahren (BMV, 1996) nicht explizit nur auf Arbeitsstellen längerer Dauer ausgelegt (auch wenn es hierfür in der Regel verwendet wird), sodass dieses Modell ebenfalls mit dem hier entwickelten Kapazitätsmodell für Arbeitsstellen kürzerer Dauer verglichen werden kann.

Tabelle 5-27 bietet eine Übersicht über die maßgebenden Einflussgrößen für die Kapazitätsmodelle (soweit bekannt) sowie Ober- und Untergrenzen für die Modellkapazitäten für einstreifige Richtungsverkehrsführungen der einzelnen Untersuchungen. Für Modelle, in denen der SV-Anteil berücksichtigt wird, werden Anteile zwischen 0 und 30 % angenommen. Ein Vergleich der Modelle und der Modellkapazitäten ist dabei aufgrund der unterschiedlichen Methoden der Kapazitätsermittlung sowie der unterschiedlichen berücksichtigten Einflussgrößen und der unterschiedlichen Modellansätze mit und ohne Berücksichtigung von SV-Anteil und Steigung nur eingeschränkt möglich. Verglichen werden vor allem die als maßgebend betrachteten Einflussgrößen sowie Tendenzen in der Höhe der Abminderungsfaktoren und der resultierenden Kapazitäten.

Untersuchung	Maßgebende Einflussgrößen	(Modell-)Kapazitäten für einstreifige Richtungsverkehrsführungen (von/bis)
vorliegende Untersuchung	<ul style="list-style-type: none"> • Lage im Netz • Seite Fahrstreifeneinzug • Verschwenkung von Fahrstreifen auf den Seitenstreifen • Fahrstreifenbreite • Längsneigung 	826 – 1.650 Kfz/h
BMV (1996)	<ul style="list-style-type: none"> • Fahrstreifeneinzug • Lage im Netz • Fahrstreifenbreite 	1.470 – 1.738 Pkw-E/h
STÖCKERT und KLOTZ (1999)	<ul style="list-style-type: none"> • Seite Fahrstreifeneinzug • Verschwenkung von Fahrstreifen • Verschwenkung von Fahrstreifen auf den Seitenstreifen 	870 – 1.738 Pkw-E/h
BECKMANN und ZACKOR (2001)	<ul style="list-style-type: none"> • Lage im Netz • Fahrstreifeneinzug • Verschwenkung von Fahrstreifen • Umfeldbedingungen • SV-Anteil 	1.041 – 1.912 Kfz/h
NORKAUER (2004)	keine Angaben, da keine Modellentwicklung	1.500 – 1.820 Kfz/h

Tab. 5-27: Vergleich der Kapazitäten des entwickelten Modells mit (Modell-)Kapazitäten aus früheren Untersuchungen

Für Arbeitsstellen kürzerer Dauer relevante Einflussgrößen aus dem RBAP-Verfahren sind die Lage im Netz, das Vorhandensein einer Fahrstreifenreduktion und die Fahrstreifenbreite. Alle drei Einflussgrößen werden auch im neu entwickelten Modell berücksichtigt. Gemäß den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung hat die Lage außerhalb von Ballungsräumen jedoch einen deutlich stärkeren Einfluss auf die Kapazität als im RBAP-Verfahren. Auch für den Fahrstreifeneinzug und die Fahrstreifenbreite wurden in der vorliegenden Untersuchung etwas höhere Einflüsse ermittelt. Allerdings führt hier auch nur die Fahrstreifenreduktion des rechten Fahrstreifens zu einer Kapazitätsabminderung. Zusätzlich ist die Grundkapazität im RBAP-Verfahren höher als im vorliegenden Modell. Ein Vergleich der Kapazitätswerte ist allerdings nur bedingt möglich, da der Schwerverkehrsanteil und die Steigung im RBAP-Verfahren durch Anpassung der Verkehrsnachfrage und nicht durch Anpassung der Kapazität berücksichtigt werden und die Kapazitäten somit unterschiedliche Einheiten haben. Zudem konnte in der vorliegenden Untersuchung kein Einfluss des SV-Anteils nachgewiesen werden. Bei durchschnittlichen SV-Anteilen liegen die im entwickelten Modell angesetzten Kapazitäten in derselben Größenordnung wie die Kapazitäten nach dem RBAP-Verfahren.

STÖCKERT und KLOTZ (1999) identifizierten die Seite des Fahrstreifeneinzugs sowie eine Verschwenkung der Fahrstreifen und eine Verschwenkung auf den Seitenstreifen als maßgebende Einflussgrößen für die Kapazität. Diese gehen mit Abminderungsfaktoren in das von ihnen entwickelte Kapazitätsmodell ein. Genau wie im neu entwickelten Modell in der vorliegenden Untersuchung hat der Fahrstreifeneinzug rechts eine höhere Kapazitätsabminderung zu Folge als der Fahrstreifeneinzug links. Der im Vergleich deutlich geringere Abminderungsfaktor von 0,5 für eine Verschwenkung auf den Seitenstreifen im Modell von STÖCKERT und KLOTZ (1999) ist, wie in Kapitel 3.4.1 bereits ausgeführt, heute nicht mehr als realistisch anzusehen. Der Wert für die Grundkapazität von 1.830 Pkw E/h wurde aus dem RBAP-Verfahren übernommen und ist somit höher als in der vorliegenden Untersuchung. Allerdings existiert für eine Fahrstreifenreduktion auf der linken Seite ebenfalls ein Abminderungsfaktor, während dieser im neu entwickelten Modell einen Wert von 1,0 hat. Der höchste Kapazitätswert bei Reduktion eines Fahrstreifens liegt im Modell von STÖCKERT und KLOTZ (1999) dementsprechend bei 1.738 Pkw-E/h. Die Kapazität hat zudem, ebenso wie im RBAP-Verfahren und im Gegensatz zum neu entwickelten Modell, die Einheit Pkw-E/h, da der SV-Anteil nur in der Verkehrsnachfrage berücksichtigt wird. Die Kapazitäten der beiden Modelle haben somit ebenfalls vergleichbare Größenordnungen.

Das von BECKMANN und ZACKOR (2001) entwickelte Kapazitätsmodell beruht auf Daten sowohl von Arbeitsstellen längerer als auch kürzerer Dauer und ist auch für beide Arbeitsstellenformen anwendbar. Das Modell ähnelt somit vom Anwendungsbereich her dem RBAP-Verfahren und hat dieses auch als Vorbild. Die Grundkapazität von 1.830 Pkw-E/h wurde aus dem RBAP-Verfahren übernommen. Die berücksichtigten Einflussgrößen wurden allerdings um einige Parameter erweitert. So wird die Lage im Netz detaillierter differenziert, zudem werden widrige Umfeldbedingungen und Verschwenkungen von Fahrstreifen zusätzlich berücksichtigt. Das Modell von BECKMANN und ZACKOR (2001) liefert tendenziell etwas höhere Kapazitäten als das in der vorliegenden Untersuchung entwickelte Modell, da die Grundkapazität höher ist und die Abminderungsfaktoren in der Regel geringer sind.

Von NORKAUER (2004) sind keine genaueren Angaben zu den maßgebenden Einflussgrößen vorhanden, da kein Kapazitätsmodell entwickelt wurde. In der Untersuchung wurden Arbeitsstellen mit verschiedenen Fahrstreifeneinzügen sowie mit unterschiedlichen SV-Anteilen und Steigungen berücksichtigt. Genauso wie in der vorliegenden Untersuchung

konnte kein Einfluss des SV-Anteils festgestellt werden, da vergleichbare Kapazitäten bei hohen und niedrigen SV-Anteilen gemessen wurden. Die ermittelten Kapazitäten sind in Kfz/h angegeben und liegen tendenziell etwas höher als die Kapazitäten im neu entwickelten Modell.

Grundsätzlich ist festzustellen, dass sich die berücksichtigten Einflussgrößen in den analysierten Untersuchungen deutlich voneinander unterscheiden. Die Kapazitäten aus den verglichenen Modellen haben in der Regel entweder die gleiche Größenordnung wie das neu entwickelte Modell oder sind tendenziell etwas höher. Dadurch, dass nur teilweise der Einfluss des SV-Anteils berücksichtigt wird, ist ein direkter Vergleich jedoch nur eingeschränkt möglich.

6 Analyse des Verkehrsablaufs – Verkehrsmessungen

6.1 Methodik und Untersuchungskollektiv

Um Kenngrößen des Verkehrsablaufs, wie z. B. Fahrstreifenaufteilungen und Geschwindigkeitsverteilungen, im Arbeitsstelleninnenbereich erfassen und analysieren zu können, wurden Verkehrsmessungen durchgeführt. Die bei den Messungen erhobenen Daten dienten dabei insbesondere der Kalibrierung der Simulationsmodelle für die mikroskopische Verkehrsflusssimulation in Kapitel 7.

Im Rahmen der Untersuchung kamen für die Messungen drei verschiedene Formen der Datenerfassung zum Einsatz:

- (Seiten-)Radargeräte zur Erfassung von Verkehrsstärken, Geschwindigkeiten und Zeitlücken,
- Videokameras (Übersichtskameras) zur Überprüfung der Radardaten und
- Kennzeichenerfassungssysteme (ANPR) zur Ermittlung von Fahrtzeiten und mittleren Geschwindigkeiten.

Wesentliches Ziel der Messungen innerhalb der Arbeitsstellen war die Ermittlung typischer q-v-Beziehungen und Fahrstreifenaufteilungen für den jeweiligen Arbeitsstellentyp. Hierfür sollte nach Möglichkeit die gesamte Bandbreite möglicher Verkehrszustände bis zur Überlastung erfasst werden. Da die maßgebende Engstelle im Bereich von Arbeitsstellen normalerweise am Beginn der Arbeitsstelle – am Fahrstreifeneinzug oder im Bereich der Verschwenkung – vorliegt, treten innerhalb von Arbeitsstellen allerdings in der Regel keine weiteren Zusammenbrüche auf. Ausnahmen können sich bei stark frequentierten Anschlussstellen innerhalb der Arbeitsstelle oder wechselnden Streckenparametern (z. B. Behelfsfahrstreifenbreiten) ergeben. Darüber hinaus erfolgte eine Analyse der Zeitlücken- und Geschwindigkeitsverteilungen innerhalb der Arbeitsstelle. Anhand der Fahrtzeitmessungen mittels Kennzeichenverfolgung war zusätzlich die Beurteilung der mittleren Geschwindigkeit über einen längeren Abschnitt innerhalb der Arbeitsstelle möglich. Die so gemessenen Geschwindigkeiten konnten zudem mit den lokal erfassten Geschwindigkeiten der Radargeräte verglichen werden.

Bei der Auswahl der zu untersuchenden Arbeitsstellen sind neben den verkehrlichen Randbedingungen in erster Linie die örtlichen Begebenheiten von Bedeutung. Günstig für Messungen des Verkehrsablaufs sind ein oder mehrere Brückenbauwerke innerhalb der Arbeitsstelle. Radargeräte liefern bei mehrstreifigen Fahrbahnen nur bei Anordnung oberhalb der Fahrbahn verlässliche Daten. Für Fahrtzeitmessungen mit ANPR-Systemen müssen innerhalb der Arbeitsstelle mindestens zwei Brücken vorhanden sein. Auch für Videoaufnahmen ist ein Kamerastandort auf einem Brückenbauwerk oberhalb der Fahrbahn vorteilhaft. Darüber hinaus sind funktionierende Dauerzählstellen im Zulauf zur Arbeitsstelle wünschenswert, damit die Untersuchungen im Inneren der Arbeitsstelle mit den Kapazitäts- und Verkehrsablaufuntersuchungen im Zulauf kombiniert werden können.

Im Rahmen des Untersuchungsprogramms wurden Messungen von ca. vier Stunden Dauer durchgeführt. Diese Kurzzeitmessungen wurden immer während der Morgen- oder Nachmittagsspitze durchgeführt, sodass ein möglichst breites Spektrum an Verkehrsstärken er-

fasst werden konnte. Eine Übersicht der durchgeführten Messungen in Arbeitsstellen längerer Dauer enthält Tabelle 6-1.

Nr.	BAB	Lage	FR	Datum	Auswertez Zeitraum	Verkehrsführung*	V _{zul}	erhobene Daten
1	A 1	Ascheberg – Kreuz Münster-Süd	Nord	21.08.2012	14:30 – 18:30	4s+0	60	Radar, Video, ANPR
2	A 1	Ascheberg – Kreuz Münster-Süd	Süd	21.08.2012	14:30 – 18:30	0+4s	60	Radar, Video, ANPR
3	A 43	Lavesum – Marl-Nord	Süd	05.09.2012	06:00 – 10:00	0+4s	60	Radar, Video
4	A 30	Melle-Ost – Bünde	West	09.10.2012	14:00 – 18:00	4s+0	80	Radar, Video, ANPR
5	A 30	Melle-Ost – Bünde	Ost	09.10.2012	14:00 – 18:00	0+4s	80	Radar, Video, ANPR
6	A 57	Kreuz Neuss-West – Kreuz Kaarst	Nord	23.10.2012	14:00 – 18:00	4s+0	80	Radar, Video
7	A 57	Kreuz Neuss-West – Kreuz Kaarst	Süd	23.10.2012	14:00 – 18:00	0+4s	80	Radar, Video
8	A 44	Diemelstadt – Warburg	Ost	11.10.2012	14:00 – 18:00	1+3s	80	Radar, Video, ANPR
9	A 44	Diemelstadt – Warburg	West	11.10.2012	14:00 – 18:00	3s+1	80	Radar, Video, ANPR
10	A 7	Guxhagen – Malsfeld	Nord	26.07.2013	13:30 – 18:30	5s+0	80	Radar, Video
11	A 7	Guxhagen – Malsfeld	Süd	26.07.2013	13:30 – 18:30	0+5s	80	Radar, Video
12	A 2	Kreuz Hannover-Ost	Ost	12.09.2012	14:00 – 18:00	3s+3s	60	Radar, Video
13	A 2	Kreuz Hannover-Ost	West	12.09.2012	14:00 – 18:00	3s+3s	60	Radar, Video
14	A 3	Kreuz Hilden – Mettmann	Nord	07.11.2014	13:00 – 17:00	3+3n	80	Radar, Video

*Angabe der Verkehrsführung immer in Betrachtungsrichtung

Tab. 6-1: Übersicht der Kurzzeitmessungen an Arbeitsstellen längerer Dauer

Messungen 1 und 2: A 1 Ascheberg – Kreuz Münster-Süd (beide Fahrrichtungen)

Die untersuchte Arbeitsstelle war vom 10.06. bis 31.08.2012 auf der Autobahn A 1 zwischen der Anschlussstelle Ascheberg und dem Kreuz Münster-Süd eingerichtet. Grund für die Bauarbeiten war die Sanierung der Fahrbahn in Fahrtrichtung Süden. Die Arbeitsstelle hatte insgesamt eine Länge von 5,5 km und wurde mit einer 4s+0-Verkehrsführung ausgeführt. Am 21.08.2012 wurden an drei Querschnitten innerhalb der Arbeitsstelle Verkehrsmessungen durchgeführt. Hierbei kamen Kennzeichenerfassungssysteme sowie Kameras und Radargeräte zur Erfassung des Verkehrsablaufs zum Einsatz. Der Messaufbau ist in Bild 6-1 dargestellt. Die Fahrtzeitmessung erfolgte an zwei 4,1 km voneinander entfernten Brü-

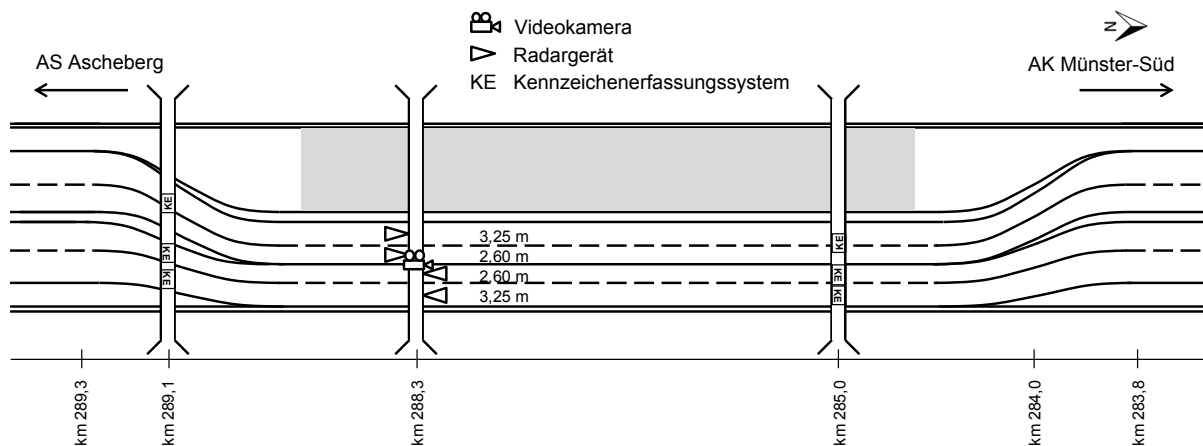


Bild 6-1: Messaufbau für die Messungen 1 und 2

ckenbauwerken. Auf einem weiteren Brückenbauwerk im mittleren Bereich der Arbeitsstelle wurde der Verkehrsablauf mit Kameras und Radargeräten erfasst. Die Messung erfolgte von 14:30 bis 18:30 Uhr.

In Bild 6-2 ist der Blick von der Übersichtskamera in Richtung Norden dargestellt. Auf dem Bild ist zu erkennen, dass im Arbeitsstelleninnenbereich auf den linken Fahrstreifen kein und auf den rechten Fahrstreifen nur ein sehr begrenzter seitlicher Bewegungsspielraum über die Fahrstreifenmarkierungen hinaus vorhanden war.



Bild 6-2: Blick von der Übersichtskamera für die Messungen 1 und 2 in Richtung Norden

Messung 3: A 43 Lavesum – Marl-Nord (Fahrtrichtung Süden)

Vom Frühjahr 2012 bis Ende Januar 2013 wurde die Autobahn A 43 zwischen den Anschlussstellen Marl-Nord und Lavesum grundhaft erneuert. Zunächst wurde bis zum 05.06.2012 die Fahrbahn in Fahrtrichtung Norden und danach die Fahrbahn in der Gegenrichtung saniert. Der Verkehr wurde in einer 0+4s- bzw. 4s+0-Verkehrsführung jeweils auf der anderen Richtungsfahrbahn abgewickelt. Die Verkehrsmessung mit Radargeräten und Kameras erfolgte am 05.09.2012 zwischen 6:00 und 10:00 Uhr von dem Überführungsbauwerk der Anschlussstelle Haltern. Aufgrund der Lage des Messstandorts im Bereich des Ausfädelungstreifens der Anschlussstelle wurde nur der Verkehrsablauf in Fahrtrichtung Süden erfasst. Der Messaufbau ist in Bild 6-3 dargestellt.

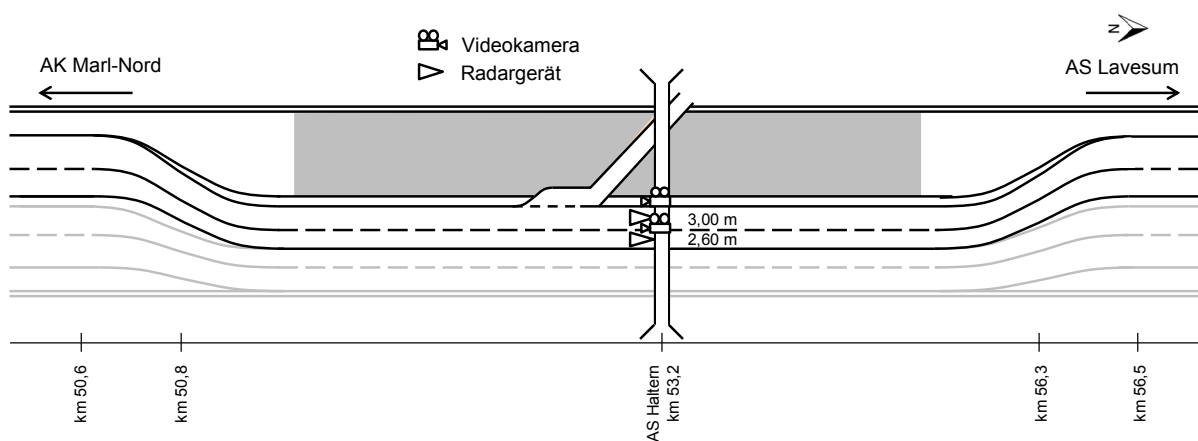


Bild 6-3: Messaufbau für die Messung 3

Die Zufahrt der Anschlussstelle Haltern in Fahrtrichtung Marl wurde durch die Baustelleneinrichtung getrennt von der Hauptfahrbahn geführt und traf, wie in Bild 6-4 zu sehen, erst in einiger Entfernung zur Messstelle auf die Autobahn. Im Bereich der Messstelle waren keine seitlichen Bewegungsspielräume vorhanden.



Bild 6-4: Blick von der Übersichtskamera für die Messung 3 in Richtung Süden

Messungen 4 und 5: A 30 Melle-Ost – Bünde (beide Fahrrichtungen)

Die untersuchte Arbeitsstelle war bis Anfang November 2012 auf der Autobahn A 30 zwischen den Anschlussstellen Melle-Ost und Bünde auf einer Länge von knapp 9 km mit einer 4s+0-Verkehrsführung eingerichtet. Grund war die Sanierung der Richtungsfahrbahn in Fahrtrichtung Bünde. Die Messung wurde am 09.10.2012 von 14:00 bis 18:00 Uhr an zwei Querschnitten innerhalb der Arbeitsstelle durchgeführt. Erfasst wurden dabei sowohl Fahrtzeiten über eine Kennzeichenverfolgung als auch lokale Kenngrößen des Verkehrsablaufs mittels überkopf angeordneten Radargeräten und Kameras. Der Messaufbau ist in Bild 6-5 dargestellt. Die beiden Messstandorte hatten einen Abstand von 2,9 km. Die drei in der Arbeitsstelle vorhandenen Anschlussstellen hatten keinen direkten Einfluss auf die Messung, da sie in ausreichendem Abstand zu den Messstellen lagen. Die Messung erfolgte für beide Fahrrichtungen. In Bild 6-6 ist zu erkennen, dass die linken Fahrstreifen im Bereich der Messstelle jeweils keine und die rechten Fahrstreifen geringe seitliche Bewegungsspielräume hatten.

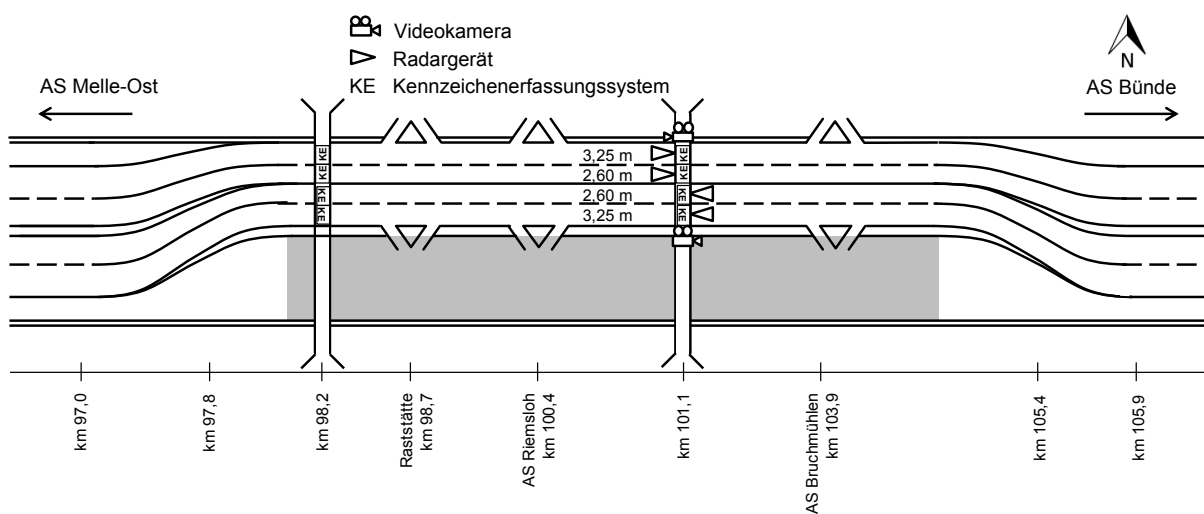


Bild 6-5: Messaufbau für die Messungen 4 und 5



Bild 6-6: Blick von der Übersichtskamera für die Messungen 4 und 5 in Richtung Osten

**Messungen 6 und 7: A 57 Kreuz Kaarst – Kreuz Neuss-West
(beide Fahrrichtungen)**

In den Jahren 2012 und 2013 wurden auf der Autobahn A 57 die Richtungsfahrbahnen zwischen dem Kreuz Kaarst und dem Kreuz Neuss-West saniert und teilweise für eine Erweiterung auf drei Fahrstreifen je Fahrtrichtung vorbereitet. Der Verkehr wurde bis zum 19.11.2012 mit einer 0+4s- und anschließend mit einer 4s+0-Verkehrsführung (bezogen auf die Fahrtrichtung Süden) geführt. Die Messung von einem Brückenbauwerk zwischen den Anschlussstellen Holzbüttgen und Neuss fand am 23.10.2012 zwischen 14:00 und 18:00 Uhr, also im Zustand der 0+4s-Verkehrsführung, statt. Der Verkehrsablauf wurde mit Radargeräten und Kameras erfasst. Der Messaufbau ist in Bild 6-7 dargestellt. In Fahrtrichtung Süden standen keine und in Fahrtrichtung Norden nur geringe Bewegungsspielräume für den rechten Fahrstreifen zur Verfügung (vgl. Bild 6-8).

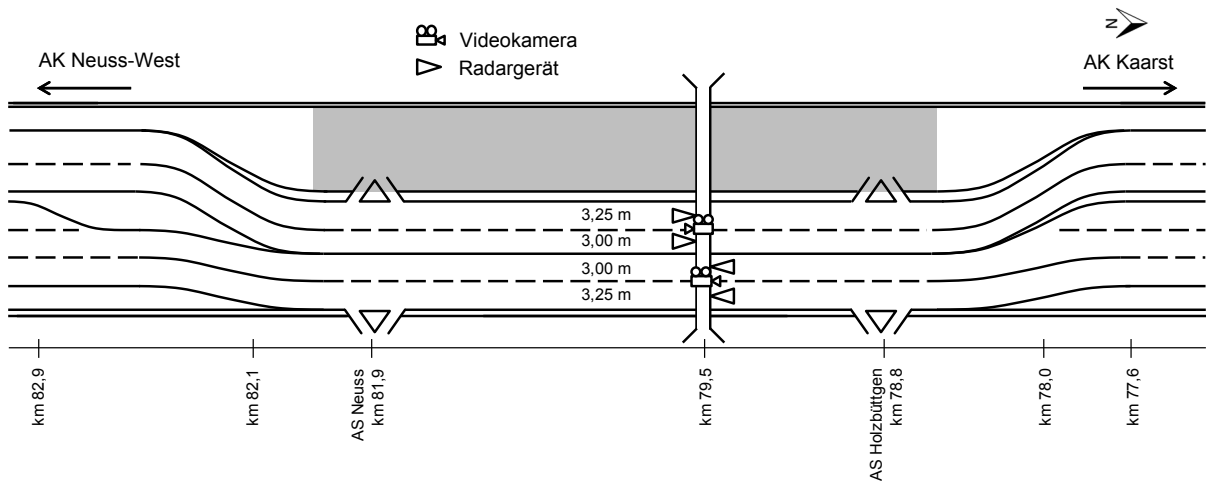


Bild 6-7: Messaufbau für die Messungen 6 und 7



Bild 6-8: Blick von der Übersichtskamera für die Messungen 6 und 7 in Richtung Norden

Messungen 8 und 9: A 44 Diemelstadt – Warburg (beide Fahrrichtungen)

Zwischen den Anschlussstellen Diemelstadt und Warburg im Zuge der Autobahn A 44 erfolgte vom 03.09.2012 bis zum 14.12.2012 eine grundlegende Erneuerung der Fahrbahn in Fahrtrichtung Kassel. Die Arbeitsstelle wurde mit einer 3s+1-Verkehrsführung ausgeführt. Hierbei wurden zunächst der Seitenstreifen und der Hauptfahrstreifen und im zweiten Bauabschnitt der Überholfahrstreifen saniert. Die Messung fand während des ersten Bauabschnitts am 11.10.2012 zwischen 14:00 und 18:00 Uhr statt. Hierbei wurden sowohl Fahrzeiten mittels Kennzeichenverfolgung als auch der Verkehrsablauf in beiden Fahrrichtungen mit Radargeräten und Videokameras erfasst. Der Messaufbau ist in Bild 6-9 dargestellt.

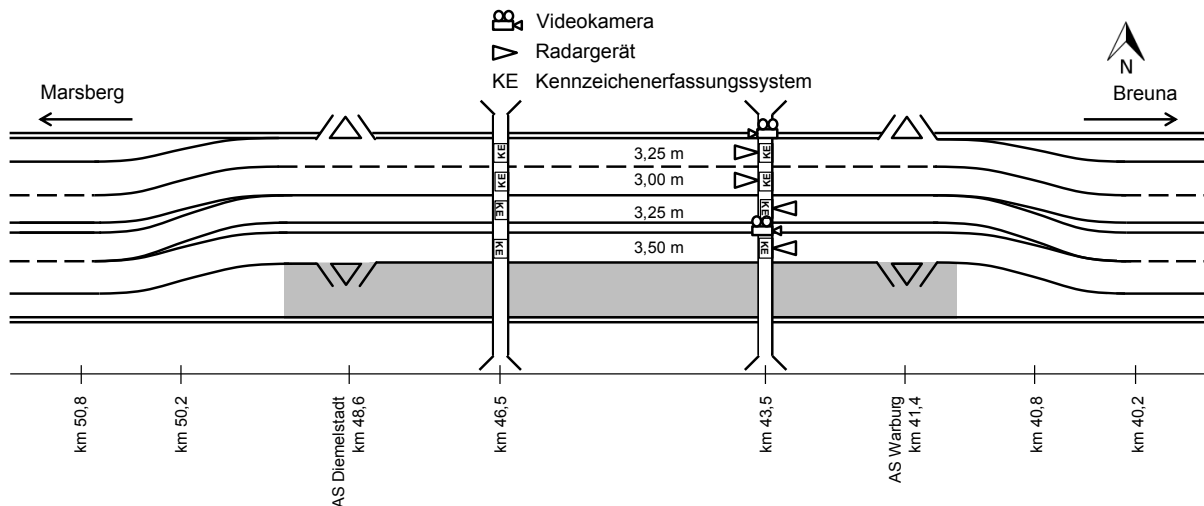


Bild 6-9: Messaufbau für die Messungen 8 und 9

In Bild 6-10 ist der Blick von der Videokamera in Richtung Osten dargestellt. Auf den einzeln geführten Fahrstreifen in Fahrtrichtung Osten sind seitliche Bewegungsspielräume vorhanden. Zudem sind die Fahrstreifen durch die getrennte Führung ohnehin schon relativ breit. In Fahrtrichtung Westen steht für den linken Fahrstreifen kein und für den rechten Fahrstreifen nur ein geringer Bewegungsspielraum zur Verfügung.



Bild 6-10: Blick von der Übersichtskamera für die Messungen 8 und 9 in Richtung Osten

Messungen 10 und 11: A 7 Guxhagen – Malsfeld (beide Fahrtrichtungen)

In den Jahren 2013 bis 2015 wurde die Helterbachtalbrücke im Zuge der Autobahn A 7 im Rahmen von insgesamt vier Bauphasen neu gebaut. Hiermit war eine etwa 7 km lange Arbeitsstellenverkehrsführung zwischen den Anschlussstellen Guxhagen und Malsfeld verbunden. Die Messung erfolgte während der zweiten Bauphase am 26.07.2013 zwischen 13:30 und 18:30 Uhr von einem Brückenbauwerk innerhalb der Arbeitsstelle. Der Verkehrsablauf in beiden Fahrtrichtungen wurde hier mittels Radargeräten und Kameras erfasst. Der Messaufbau ist in Bild 6-11 dargestellt.

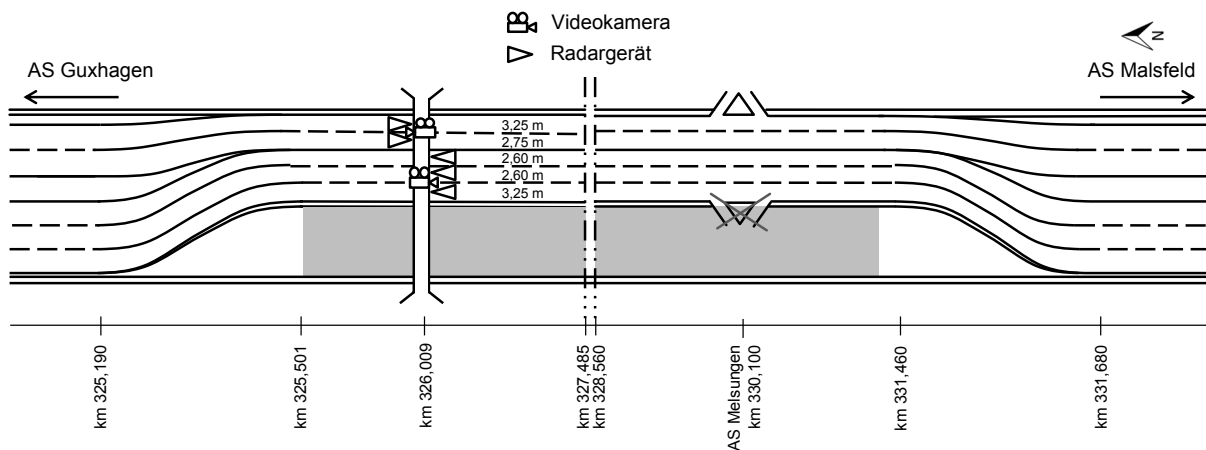


Bild 6-11: Messaufbau für die Messungen 10 und 11

Der Verkehr wurde innerhalb der Arbeitsstelle weitgehend – auch im Bereich des Messquerschnitts – mit einer 5s+0-Verkehrsführung geführt. Nur auf einem etwa 1 km langen Abschnitt südlich des Messquerschnitts lag eine 2s+3-Verkehrsführung vor. Auf die Darstellung dieses Bereichs wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit in Bild 6-11 verzichtet. In Bild 6-12 ist der Blick von der Übersichtskamera in Richtung Süden dargestellt. In beiden Fahrtrichtungen sind keine seitlichen Bewegungsspielräume vorhanden.



Bild 6-12: Blick von der Übersichtskamera für die Messungen 10 und 11 in Richtung Süden

Messungen 12 und 13: A 2 Kreuz Hannover Ost (beide Fahrrichtungen)

Das Überführungsbauwerk der Autobahn A 7 über die A 2 im Autobahnkreuz (AK) Hannover-Ost wurde von März 2011 bis August 2013 erneuert. Um im Bereich des Mittelstreifens Platz für die Bauarbeiten zu schaffen, wurde der sechsstreifige Querschnitt auf der A 2 mit verengten Fahrstreifen an den jeweiligen Außenseiten der Fahrbahnen unter dem Bauwerk durchgeführt. Zudem waren sämtliche Parallelfahrbahnen und alle inneren Rampen während der Bauzeit gesperrt. Während der Messung bestand eine 3s+3s-Verkehrsführung. Der Messaufbau ist in Bild 6-13 dargestellt.

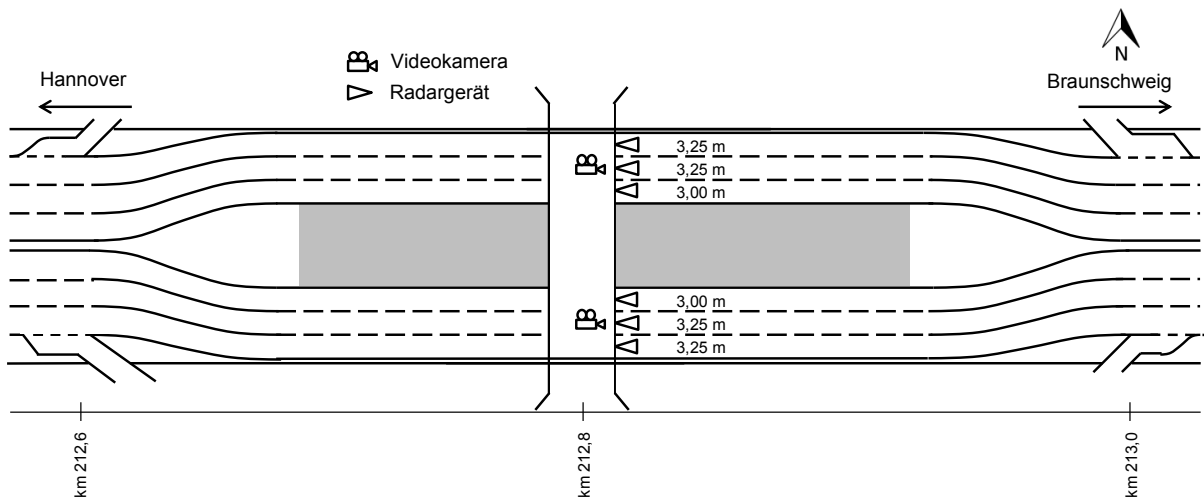


Bild 6-13: Messaufbau für die Messungen 12 und 13

Die Messung erfolgte am 12.09.2012 im Zeitraum von 14:00 bis 18:00 Uhr. Der Verkehrsablauf wurde mit Radargeräten und Videokameras vom Überführungsbauwerk der Autobahn A 7 in Blickrichtung Osten erfasst. Durch die dreistreifige Richtungsverkehrsführung mit relativ geringen Fahrstreifenbreiten war es mit den Radargeräten nicht möglich, ausschließlich den Verkehr auf dem mittleren der drei Fahrstreifen zu erfassen. Es wurden immer auch Fahrzeuge auf dem rechten oder linken Fahrstreifen mit erfasst, sodass bei der Auswertung die Daten des mittleren Fahrstreifens nicht verwendbar waren. Stattdessen wurden die Verkehrsstärken auf dem mittleren Fahrstreifen deshalb mithilfe der Videoaufzeichnungen ausgewertet.

In Bild 6-14 sind ein Radargerät und eine Übersichtskamera, mit denen der Verkehrsablauf in Fahrtrichtung Osten erfasst wurde, dargestellt. Es ist zudem zu erkennen, dass aufgrund



Bild 6-14: Blick von einer Übersichtskamera für die Messungen 12 und 13 in Richtung Osten

der seitlichen Schutzeinrichtungen für den linken Fahrstreifen gar kein und für den rechten Fahrstreifen nur ein geringer seitlicher Bewegungsspielraum zur Verfügung stand.

Messung 14: A 3 Kreuz Hilden – Mettmann (beide Fahrrichtungen)

Von September bis Dezember 2014 wurde der Seitenstreifen der Autobahn A 3 zwischen dem Kreuz Hilden und der Anschlussstelle Mettmann in Fahrrichtung Norden verstärkt, um die Fahrbahn für eine grundlegende Erneuerung in den Folgejahren vorzubereiten. Hierfür wurde der Verkehr auf drei verengten Fahrstreifen in einer 3+3n-Verkehrsführung auf insgesamt 6,5 km an dem Baufeld vorbeigeführt.

Die Messung erfolgte am 07.11.2014 im Zeitraum von 13:00 bis 17:00 Uhr. Der Verkehrsablauf wurde dabei mit Radargeräten und Videokameras von einem Brückenbauwerk innerhalb der Arbeitsstelle aus erfasst. Der Messaufbau ist in Bild 6-15 dargestellt.

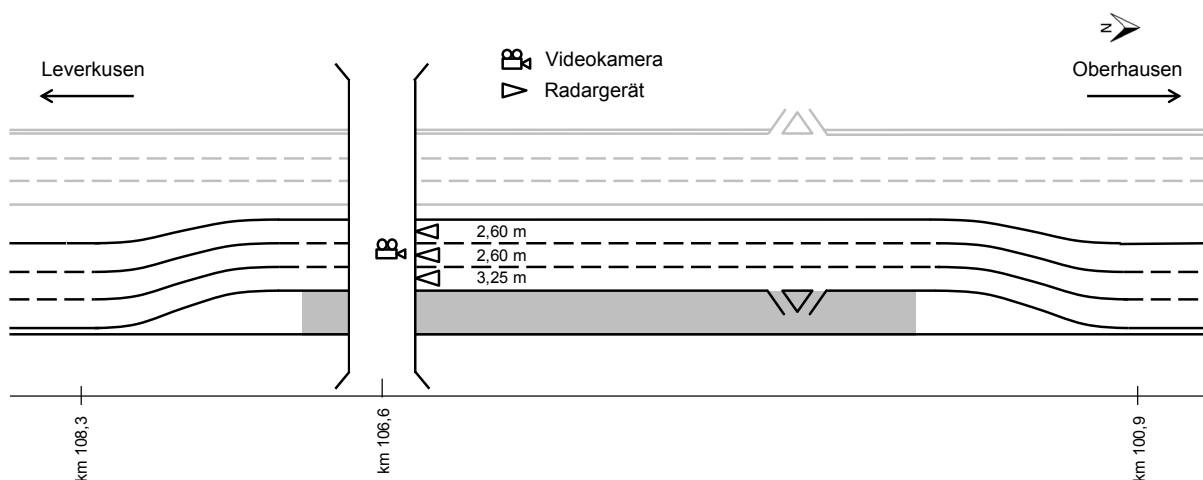


Bild 6-15: Messaufbau für die Messung 14

Bild 6-16 zeigt das Bild der Übersichtskamera in Richtung Norden. Da der rechte Fahrstreifen nur durch Baken vom Baufeld getrennt war, ergab sich ein gewisser Bewegungsspielraum.



Bild 6-16: Blick von der Übersichtskamera für die Messung 14 in Richtung Norden

6.2 Darstellung und Auswertung der Ergebnisse

Im Rahmen der durchgeführten Messungen wurden im Wesentlichen Verkehrsstärken und Geschwindigkeiten sowie Fahrstreifenaufteilungen für die Kalibrierung der Simulationsmodelle in Kapitel 7 erfasst. Dabei wurde vor allem geprüft, inwieweit sich die gefahrenen Geschwindigkeiten und Fahrstreifenaufteilungen in Abhängigkeit von den verschiedenen Randbedingungen unterscheiden. Für die Fahrstreifenaufteilungen wurden außerdem Unterschiede zu typischen Fahrstreifenaufteilungen auf der freien Strecke betrachtet. Zusätzlich zu Geschwindigkeitsverteilungen wurden auch Wunschgeschwindigkeiten getrennt für Pkw und Lkw ermittelt. Zur Ermittlung der Wunschgeschwindigkeiten kam das Verfahren für zensierte Daten zur Anwendung, welches von HOOGENDOORN (2005) und GEISTEFELDT (2007, 2011) für die Ermittlung von Wunschgeschwindigkeitsverteilungen eingesetzt wurde. Hierbei werden die Geschwindigkeiten aller unbeeinflusst fahrenden Fahrzeuge als unzensierte Beobachtungen bezeichnet. Die gemessene Geschwindigkeit v entspricht somit der Wunschgeschwindigkeit (v_w). Für die beeinflusst fahrenden Fahrzeuge kann die Wunschgeschwindigkeit hingegen nicht direkt gemessen werden. Diese muss jedoch größer oder gleich der gemessenen Geschwindigkeit sein. Diese Beobachtungen werden als zensiert bezeichnet.

q-v-Diagramme und Geschwindigkeitsverteilungen

Im Folgenden werden die q-v-Diagramme und Geschwindigkeitsverteilungen der verschiedenen Messungen miteinander verglichen. Dabei werden die Messungen nach der Verkehrsführung, der Geschwindigkeitsbeschränkung und den Behelfsfahrstreifenbreiten differenziert. Bild 6-17 zeigt die q-v-Diagramme der Messungen Nr. 1 und 2 (Autobahn A 1 Ascheberg – Kreuz Münster-Süd in beiden Fahrrichtungen), die eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 60 km/h und eine Fahrstreifenbreite des Überholfahrstreifens von 2,60 m aufweisen. Sie unterscheiden sich nur in der Führung der Fahrstreifen ohne bzw. mit Überleitung. Es ist zu erkennen, dass unabhängig von der Verkehrsführung die zulässige Höchstgeschwindigkeit von 60 km/h im Mittel immer überschritten wird. Die gefahrenen Geschwindigkeiten liegen zwischen 60 und 70 km/h. Das Geschwindigkeitsniveau ist dabei bei übergeleiteten und nicht übergeleiteten Fahrstreifen in etwa gleich hoch. Bei Betrachtung der zum einen lokal und zum anderen streckenbezogen erfassten Geschwindigkeitsverteilungen für die Messung 2 in Bild 6-18 wird deutlich, dass ein Großteil der Fahrzeuge die zulässige Höchstgeschwindigkeit nicht einhält. Die streckenbezogen erfassten Geschwindigkeiten liegen etwas höher als die lokal erfassten Geschwindigkeiten.

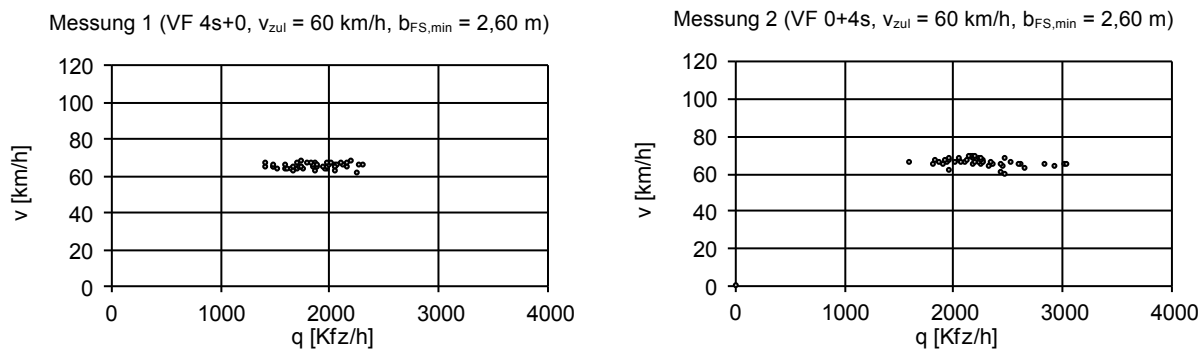


Bild 6-17: q-v-Diagramme der Messungen 1 und 2 (5-Minuten-Intervalle)

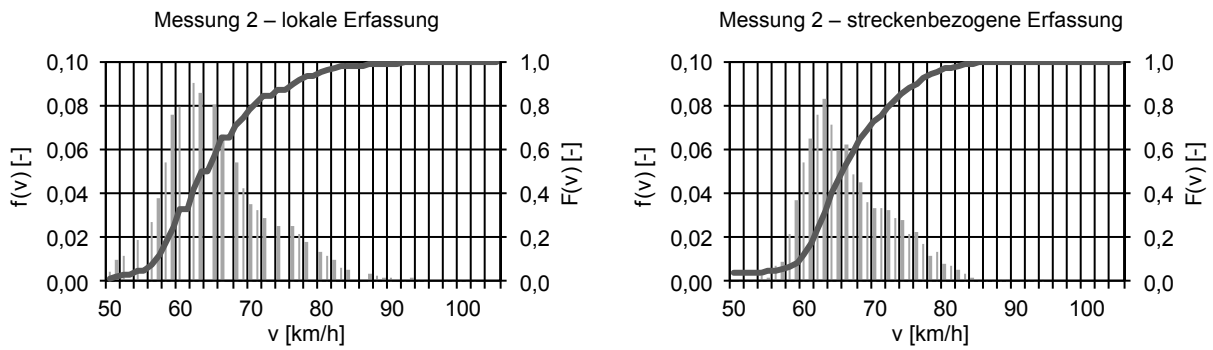


Bild 6-18: Geschwindigkeitsverteilungen der Messung 2 bei lokaler und streckenbezogener Erfassung

Die Arbeitsstellen der Messungen Nr. 4 und 5 (Autobahn A 30 Melle-Ost – Bünde in beiden Fahrtrichtungen) unterscheiden sich von den Arbeitsstellen der Messungen Nr. 1 und 2 nur in der zulässigen Höchstgeschwindigkeit, die hier bei 80 km/h liegt. Zudem wird ein niedrigerer Verkehrsstärkebereich betrachtet. Bild 6-19 zeigt, dass die lokal gemessenen Geschwindigkeiten auf den übergeleiteten Fahrstreifen etwas höher als auf den nicht übergeleiteten Fahrstreifen sind. Insgesamt wird die zulässige Höchstgeschwindigkeit im Mittel gut eingehalten.

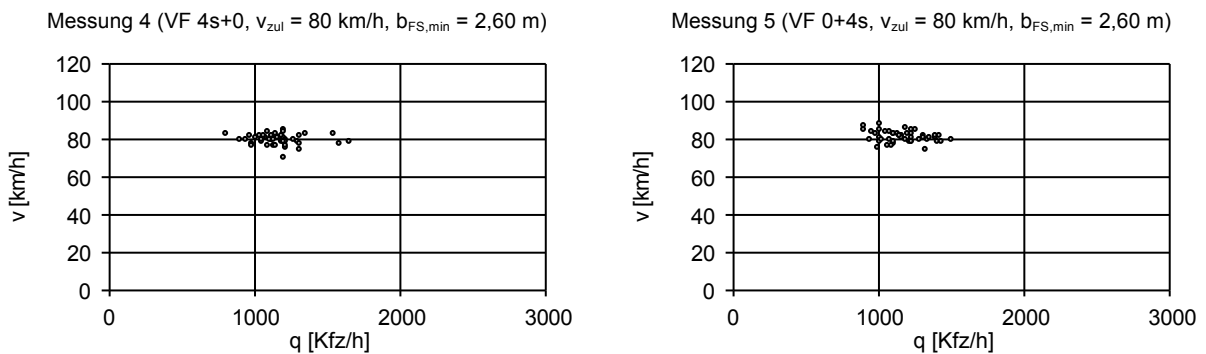


Bild 6-19: q-v-Diagramme der Messungen 4 und 5 (5-Minuten-Intervalle)

Eine Betrachtung der Geschwindigkeitsverteilungen für beide Messungen in Bild 6-20 zeigt jedoch, dass etwa 50 bis 60 % aller Pkw die zulässige Höchstgeschwindigkeit überschreiten. Der dennoch geringere Anteil der Überschreitungen als bei Arbeitsstellen mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 60 km/h wurde auch in früheren Untersuchungen (z. B. SÜMMERMANN, 2012; KEMPER et al., 2018) festgestellt.

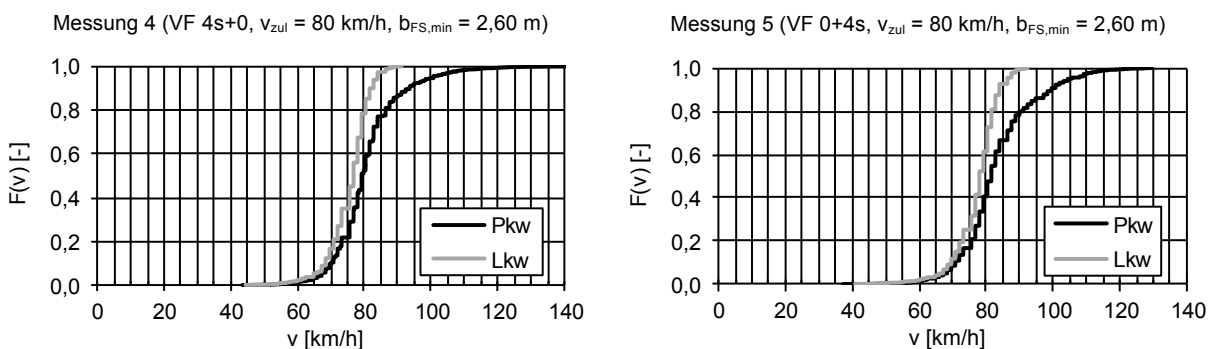


Bild 6-20: Geschwindigkeitsverteilungen der Messungen 4 und 5

Der Vergleich der Geschwindigkeitsverteilungen mit den in Bild 6-21 dargestellten Wunschgeschwindigkeitsverteilungen zeigt, dass die gefahrenen Geschwindigkeiten der Pkw bei schmalen Fahrstreifen sehr stark von den Lkw-Geschwindigkeiten beeinflusst werden. Insbesondere bei geringeren Geschwindigkeiten liegen die Geschwindigkeitsverteilungen von Pkw und Lkw sehr nah beieinander. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Lkw seltener überholt werden und stattdessen eher die Geschwindigkeit angepasst wird. Die Wunschgeschwindigkeiten der Pkw liegen hingegen deutlich über denen der Lkw.

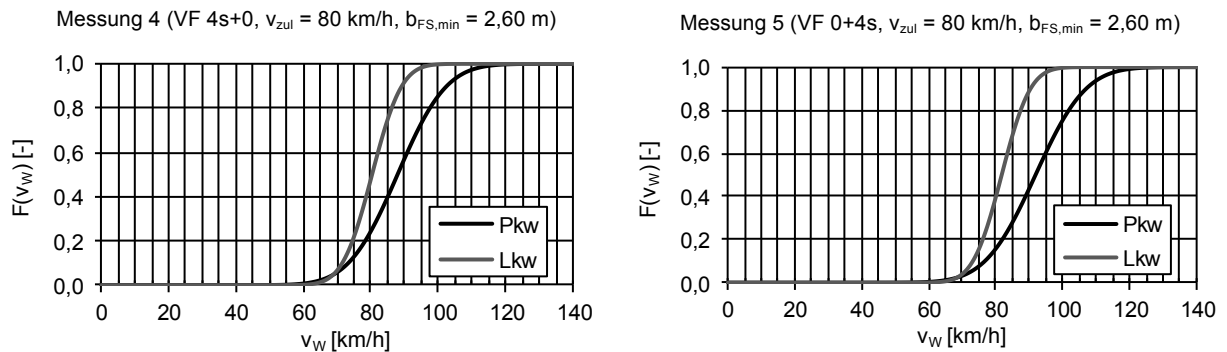


Bild 6-21: Wunschgeschwindigkeitsverteilungen der Messungen 4 und 5

Bild 6-22 zeigt die q-v-Diagramme für die Messungen 6 und 7 (Autobahn A 57 Kreuz Neuss-West – Kreuz Kaarst in beiden Fahrrichtungen) mit breiteren Fahrstreifen ($b_{FS,min} = 3,00$ m) und ansonsten gleichen Randbedingungen. Besonders auf der baustellenabgewandten Seite sind die Überschreitungen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit etwas höher als bei schmaleren Fahrstreifen. Die zugehörigen Geschwindigkeitsverteilungen (Bild 6-23) zeigen, dass etwa 70 % der Pkw und 20 bis 30 % der Lkw die zulässige Höchstgeschwindigkeit überschreiten.

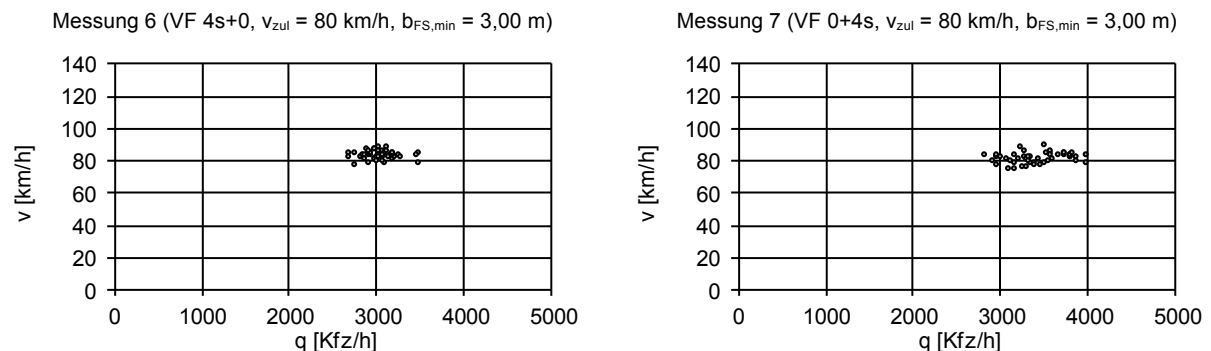


Bild 6-22: q-v-Diagramme der Messungen 6 und 7 (5-Minuten-Intervalle)

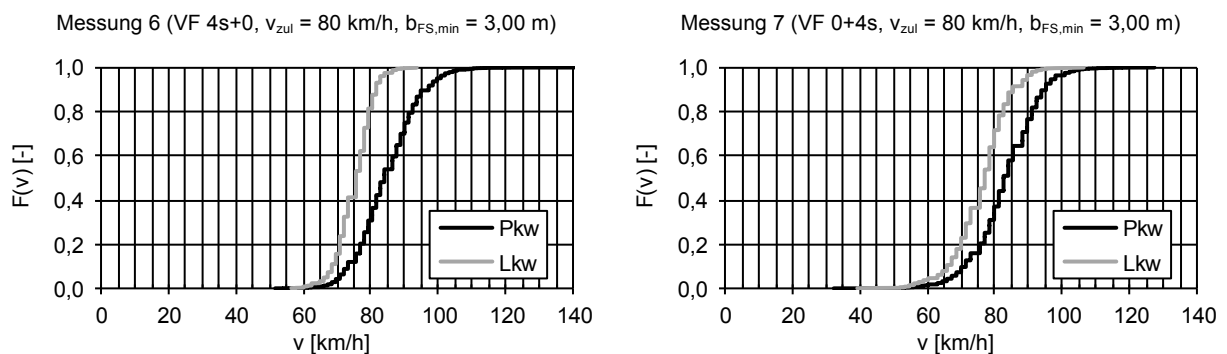


Bild 6-23: Geschwindigkeitsverteilungen der Messungen 6 und 7

Die Geschwindigkeitsverteilungen der Lkw und Pkw liegen deutlich weiter auseinander als bei den Messungen an Arbeitsstellen mit schmaleren Fahrstreifen. Es ist davon auszugehen, dass die Pkw hier in geringerem Maße von den Lkw beeinflusst werden. Auch der Unterschied zu den Wunschgeschwindigkeitsverteilungen (vgl. Bild 6-24) ist geringer.

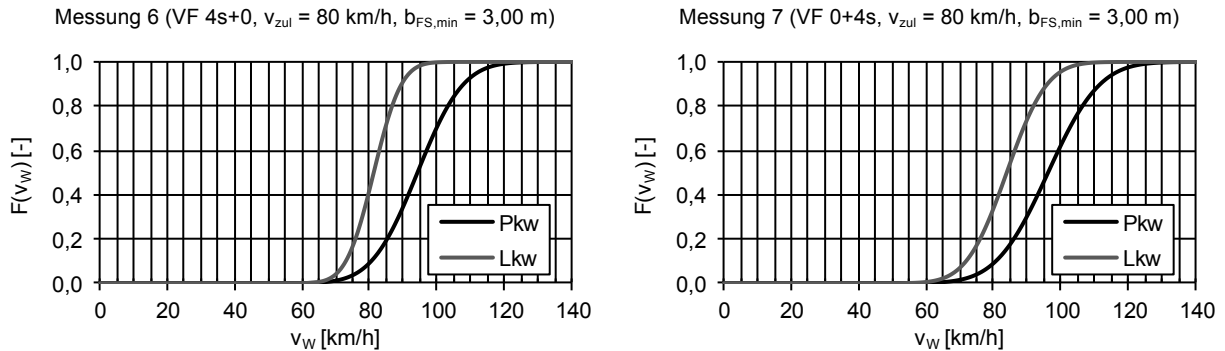


Bild 6-24: Wunschgeschwindigkeitsverteilungen der Messungen 6 und 7

Bild 6-25 zeigt für die Messung 18 mit 1+3s-Verkehrsführung die q-v-Diagramme für den rechten und linken Fahrstreifen. Die Breiten der getrennt geführten Fahrstreifen betragen jeweils 3,00 m. Auf dem linken, nur von Pkw befahrenen Fahrstreifen wurden erwartungsgemäß deutlich höhere Geschwindigkeiten gemessen als auf dem rechten, auch von Lkw befahrenen Fahrstreifen. Die mittleren Geschwindigkeiten auf dem rechten Fahrstreifen liegen weitestgehend unter der zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h und weisen zudem aufgrund des Einflusses einzelner langsam fahrender Lkw eine stärkere Streuung auf. Die Geschwindigkeiten auf dem linken Fahrstreifen ähneln den gemessenen Geschwindigkeiten in anderen vergleichbaren Messungen.

Die Geschwindigkeitsverteilungen auf dem rechten Fahrstreifen zeigen ähnliche Verläufe für Pkw und Lkw, da die gefahrene Geschwindigkeit der Pkw direkt durch die Lkw beeinflusst wird. Bei Betrachtung der Verläufe der Wunschgeschwindigkeitsverteilungen zeigt sich jedoch, dass die Pkw eine deutlich höhere Wunschgeschwindigkeit haben als die Lkw und bei unbeeinflusster Fahrt dementsprechend schneller fahren.

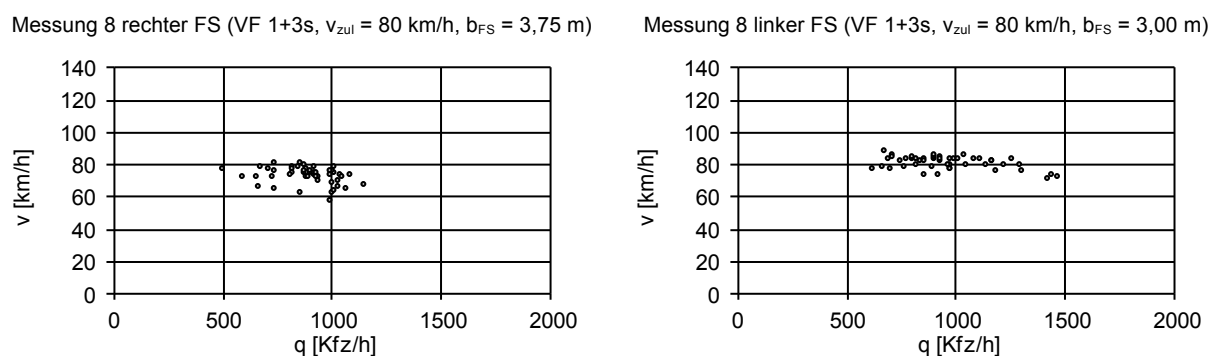
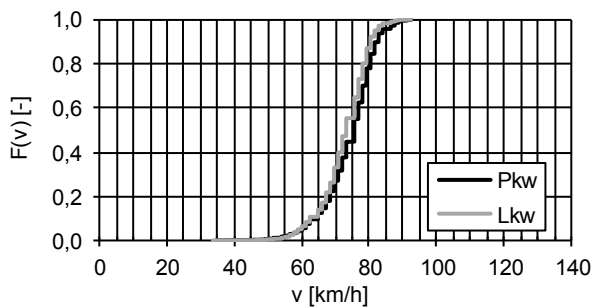


Bild 6-25: q-v-Diagramme des rechten und linken Fahrstreifens der Messung 8 (5-Minuten-Intervalle)

Messung 8 rechter FS (VF 1+3s, $v_{zul} = 80$ km/h, $b_{FS} = 3,75$ m)



Messung 8 linker FS (VF 1+3s, $v_{zul} = 80$ km/h, $b_{FS} = 3,00$ m)

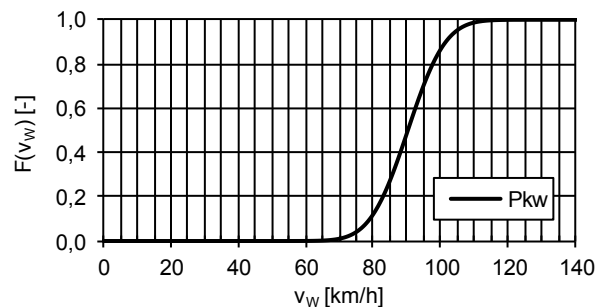
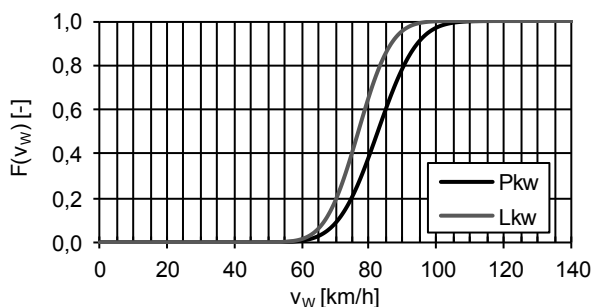


Bild 6-26: Geschwindigkeitsverteilung auf dem rechten und linken Fahrstreifen der Messung 8

Messung 8 rechter FS (VF 1+3s, $v_{zul} = 80$ km/h, $b_{FS} = 3,75$ m)



Messung 8 linker FS (VF 1+3s, $v_{zul} = 80$ km/h, $b_{FS} = 3,00$ m)

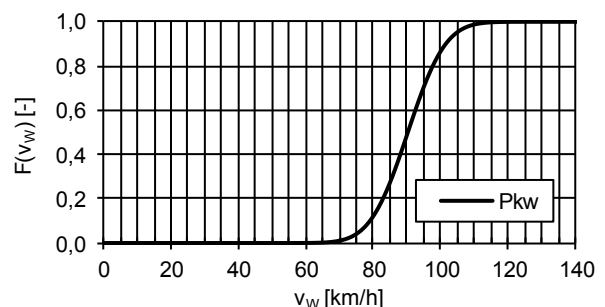
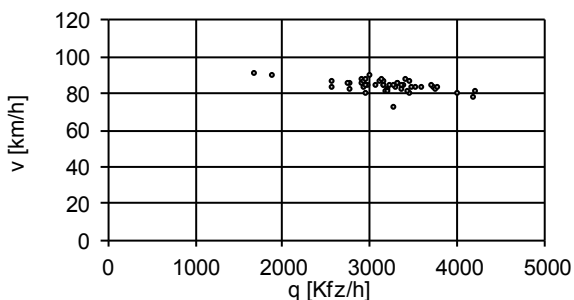


Bild 6-27: Wunschgeschwindigkeitsverteilung auf dem rechten und linken Fahrstreifen der Messung 8

Bild 6-28 zeigt zwei q-v-Diagramme für dreistreifige Richtungsverkehrsführungen mit identischen Randbedingungen (Autobahn A 2 Kreuz Hannover-Ost). Lediglich die erfassten Verkehrsstärkebereiche unterscheiden sich. Aufgrund der breiten Fahrstreifen in Verbindung mit der Geschwindigkeitsbeschränkung auf 60 km/h werden die zulässigen Höchstgeschwindigkeiten im Mittel um mehr als 20 km/h überschritten.

Messung 12 (VF 3s+3s, $v_{zul} = 60$ km/h, $b_{FS,min} = 3,00$ m)



Messung 13 (VF 3s+3s, $v_{zul} = 60$ km/h, $b_{FS,min} = 3,00$ m)

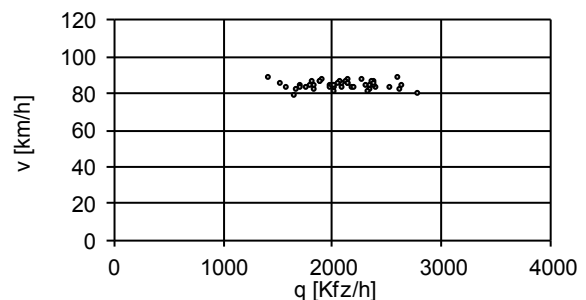


Bild 6-28: q-v-Diagramme der Messungen 12 und 13 (5-Minuten-Intervalle)

Da bei den dreistreifigen Verkehrsführungen die Einzelfahrzeugdaten auf dem mittleren Fahrstreifen nicht zuverlässig erfasst werden konnten und die Geschwindigkeiten hauptsächlich anhand der Videoaufzeichnungen, in 5-Minuten-Intervallen aggregiert, ermittelt und hochgerechnet wurden, ist eine Darstellung von Geschwindigkeits- und Wunschgeschwindigkeitsverteilungen nicht möglich.

Grundsätzlich ist für alle Messungen festzustellen, dass die mittleren lokalen Geschwindigkeiten über die erfassten Verkehrsstärken praktisch konstant sind und die q-v-Diagramme damit nahezu horizontal verlaufen. Bei schmalen Fahrstreifen ist der Einfluss der Lkw auf die Pkw-Geschwindigkeit deutlich höher als bei breiteren Fahrstreifen. Die Wunsch-

geschwindigkeiten der Pkw liegen dabei in der Regel deutlich über den zulässigen Höchstgeschwindigkeiten. Überlastungssituationen wurden in den Messungen nicht erfasst.

Fahrstreifenaufteilungen

Im Folgenden werden die Fahrstreifenaufteilungen in den analysierten Arbeitsstelleninnenbereichen verglichen. Bild 6-29 zeigt den deutlichen Unterschied der Fahrstreifenaufteilung zwischen übergeleiteten und nicht übergeleiteten Fahrstreifen in Arbeitsstellen mit 4s+0-Verkehrsführung. Bei vergleichbaren Verkehrsstärken und identischer Breite der Behelfsfahrstreifen in beiden Fahrrichtungen wird der linke übergeleitete Fahrstreifen deutlich weniger genutzt als der linke Fahrstreifen in der Gegenrichtung ohne Überleitung. Bei den nicht übergeleiteten Fahrstreifen (Messung 1) erreicht der rechte Fahrstreifen bei einer Gesamtverkehrsstärke von etwa 2.000 Kfz/h einen Verkehrsstärkeanteil von etwa 70 %. Bei vergleichbarer Gesamtverkehrsstärke weist der rechte Fahrstreifen auf den Richtungsverkehrsführungen mit Überleitung (Messungen 2 und 3) einen Verkehrsstärkeanteil von 75-80 % auf. Bei niedrigen Verkehrsstärken von etwa 1.000 Kfz/h fahren fast alle Fahrzeuge auf dem rechten Fahrstreifen. Dies ist auch in Bild 6-30 für die Messungen 4 und 5 zu erkennen.

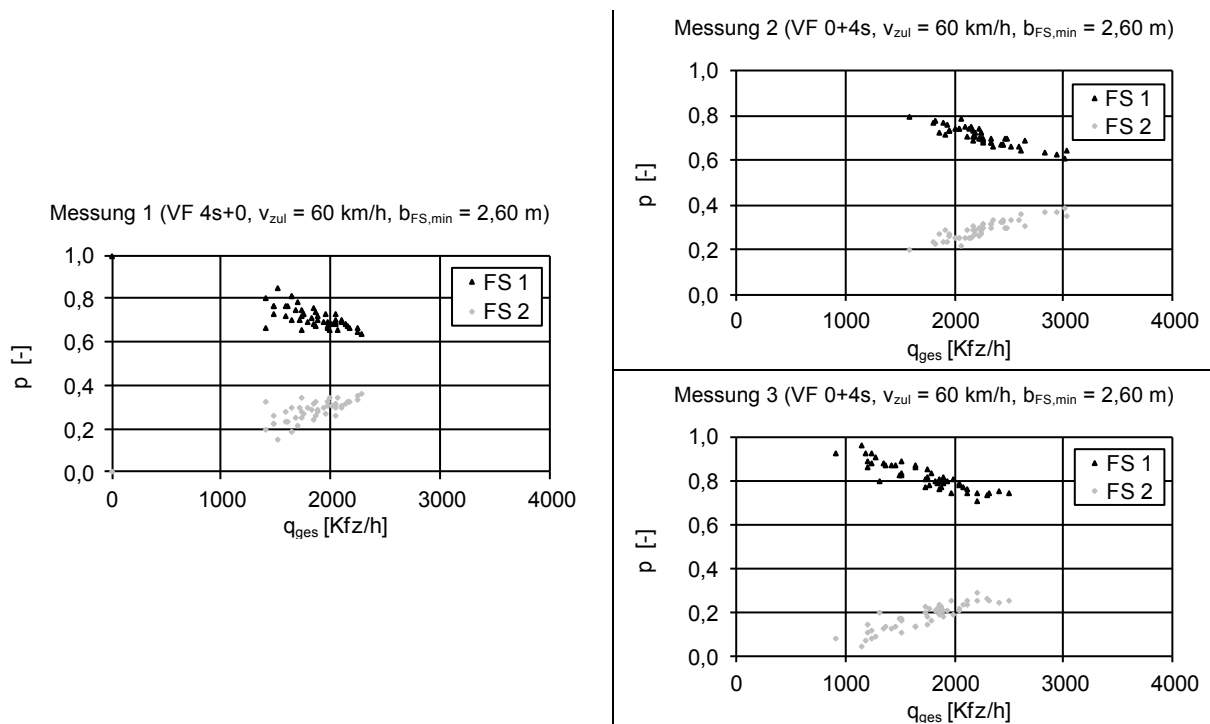


Bild 6-29: Fahrstreifenaufteilungen der Messungen 1, 2 und 3 (5-Minuten-Intervalle)

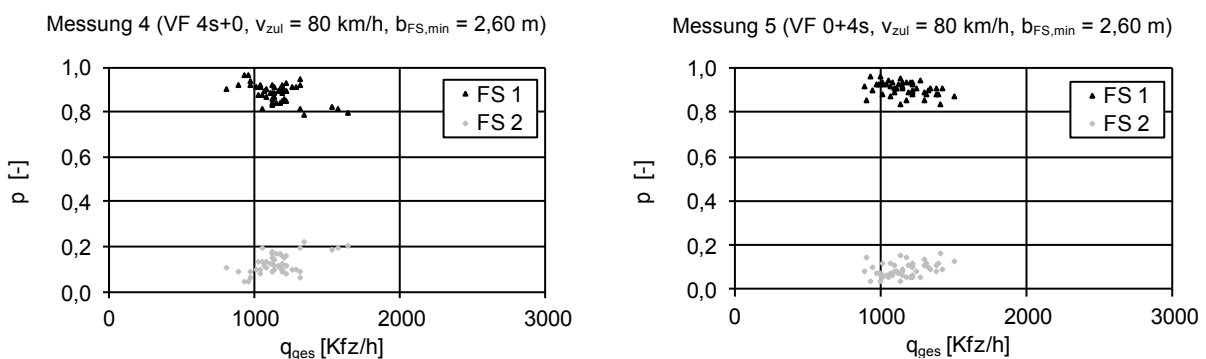


Bild 6-30: Fahrstreifenaufteilungen der Messungen 4 und 5 (5-Minuten-Intervalle)

Bild 6-31 zeigt die Fahrstreifenaufteilungen zweistreifiger Richtungsverkehrsführungen mit größeren Fahrstreifenbreiten ($b_{FS,min} = 3,00\text{ m}$). Hier nutzen auch bei geringeren Verkehrsstärken schon deutlich mehr Fahrzeuge den linken Fahrstreifen. Für die Messungen 6 und 9 ohne Überleitung der Fahrstreifen ergeben sich allerdings unterschiedliche Schnittpunkte der Anteilskurven. Während der Schnittpunkt bei der Messung 6 ungefähr bei 3.000 Kfz/h und damit höher als bei der Messung 1 mit kleineren Fahrstreifenbreiten liegt, nähern sich die Verkehrsstärkeanteile bei der Messung 9 bereits bei knapp über 2.000 Kfz/h an. Unterschiede in der Verkehrsführung, die diesen deutlichen Unterschied erklären könnten, sind nicht erkennbar. Bei der Messung 7 auf der baustellenzugewandten Seite liegt der Schnittpunkt knapp unter 3.000 Kfz/h. Im Bereich der höchsten Verkehrsstärken zwischen 3.000 und 4.000 Kfz/h bleibt die Fahrstreifenaufteilung auf einem ähnlichen Niveau. Hierbei fahren etwa 43 % der Fahrzeuge auf dem rechten und 57 % auf dem linken Fahrstreifen.

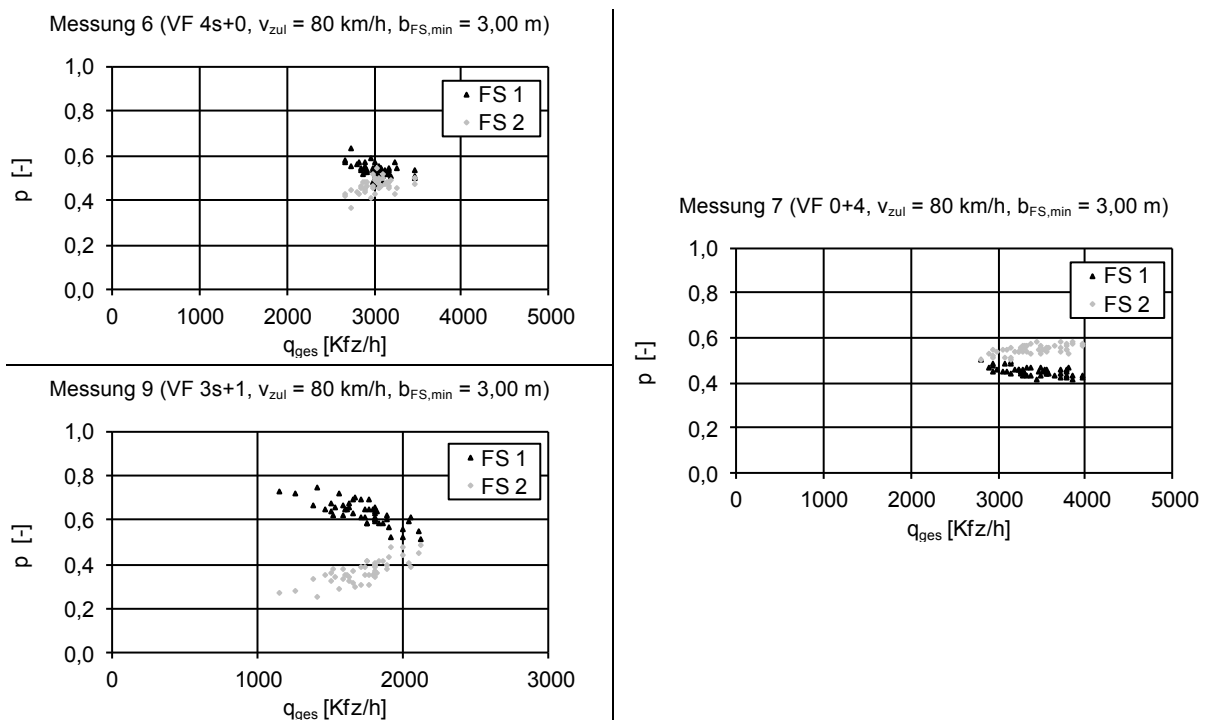


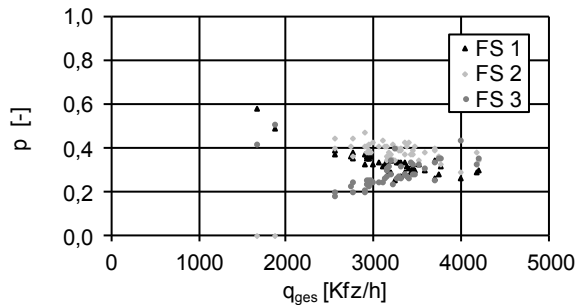
Bild 6-31: Fahrstreifenaufteilungen der Messungen 6, 7 und 9 (5-Minuten-Intervalle)

Die Ergebnisse zeigen erwartungsgemäß, dass auch bei höheren Fahrstreifenbreiten in Arbeitsstellen deutlich weniger Fahrzeuge auf dem linken Fahrstreifen fahren als auf der freien Strecke. Im Vergleich mit der Fahrstreifenaufteilung nach SPARMANN (1978) ist zu erkennen, dass nicht nur der Schnittpunkt der Kurven grundsätzlich erst bei deutlich höheren Verkehrsstärken als 1.200 Kfz/h auftritt. Auch die erreichbaren Belastungen des linken Fahrstreifens bei hohen Auslastungsgraden sind deutlich geringer. Während die Fahrstreifenaufteilung auf der freien Strecke bei höchster Auslastung etwa bei 35 zu 65 % liegt, werden in der Arbeitsstelle höchstens Aufteilungen von etwa 43 zu 57 % erreicht.

Die Betrachtung von dreistreifigen Richtungsverkehrsführungen zeigt ein ähnliches Bild. Normalerweise schneiden sich die Anteilskurven des ersten und dritten Fahrstreifens bei knapp unter 2.000 Kfz/h. Dies war bei keiner der analysierten Messungen der Fall. Der Schnittpunkt liegt bei einer Breite des linken Fahrstreifens von 3,00 m bei etwa 3.500 Kfz/h und bei einer Breite von 2,60 m zwischen 4.000 und 5.000 Kfz/h, je nachdem, ob die Fahrstreifen übergeleitet wurden oder nicht (vgl. Bild 6-32 und Bild 6-33). Auch steigt der Anteil des dritten Fahrstreifens erst bei einer Verkehrsstärke von 4.000 Kfz/h über den Anteil des zweiten Fahrstreifens. Die Anteile der Fahrstreifen 1 und 2 liegen meist auf einem ähnli-

chen Niveau. Der Fahrstreifen 3 erreicht in den betrachteten Fällen höchstens Anteile von 40 %. Die Anteile der Fahrstreifen 1 und 2 fallen nicht unter 25 %.

Messung 12 (VF 3s+3s, $v_{zul} = 60 \text{ km/h}$, $b_{FS,min} = 3,00 \text{ m}$)



Messung 13 (VF 3s+3s, $v_{zul} = 60 \text{ km/h}$, $b_{FS,min} = 3,00 \text{ m}$)

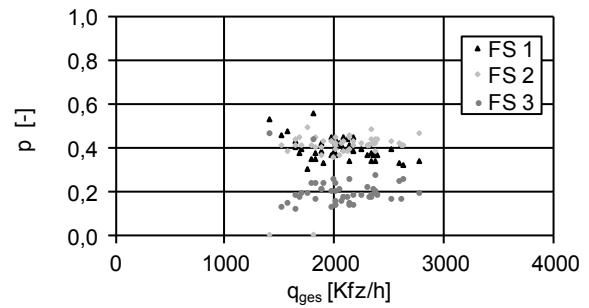
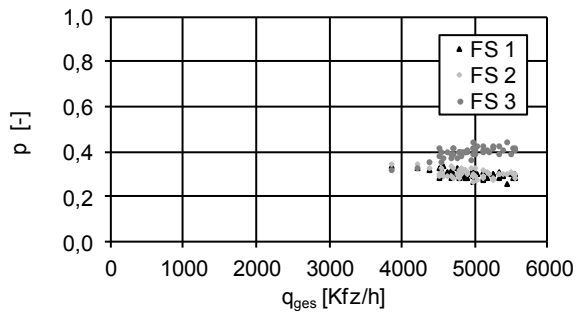


Bild 6-32: Fahrstreifenaufteilungen der Messungen 12 und 13 (5-Minuten-Intervalle)

Messung 14 (VF 3+3n, $v_{zul} = 80 \text{ km/h}$, $b_{FS,min} = 2,60 \text{ m}$)



Messung 11 (VF 0+5s, $v_{zul} = 80 \text{ km/h}$, $b_{FS,min} = 2,60 \text{ m}$)

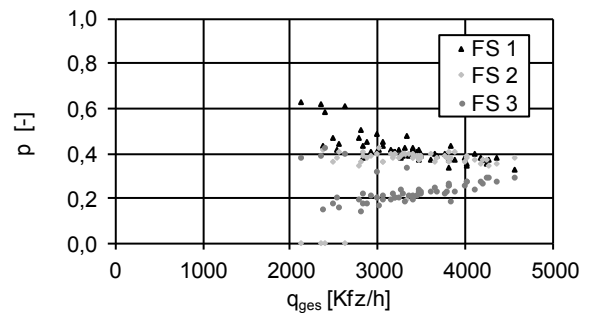


Bild 6-33: Fahrstreifenaufteilungen der Messungen 14 und 11 (5-Minuten-Intervalle)

7 Mikroskopische Verkehrsflusssimulation

7.1 Zielsetzung

Ziel der im Rahmen der vorliegenden Untersuchung durchgeführten Simulationen war die Nachbildung von Verkehrssituationen in Arbeitsstellen, die in der Realität nicht oder nur in Einzelfällen erfasst werden konnten. Im Mittelpunkt stand dabei die Analyse des Einflusses von hohen SV-Anteilen und von Steigungsstrecken, da diese im Untersuchungskollektiv nur vereinzelt auftraten. Dazu wurde der Verkehrsablauf an fiktiven Arbeitsstellen im Modell nachgebildet. Die Kalibrierung der Simulationsmodelle erfolgte zum einen anhand der in Kapitel 5.1.5 ermittelten standardisierten Kapazitätswerte und zum anderen mithilfe der Daten aus den Verkehrsmessungen innerhalb von Arbeitsstellen für den Zustand mit geringen oder mittleren SV-Anteilen ohne Steigung. Durch Erhöhung des SV-Anteils und der Längsneigung im Arbeitsstellenbereich in der Simulation wurde anschließend der Einfluss dieser beiden Parameter auf den Verkehrsablauf ermittelt.

7.2 Simulationsprogramm

Für die Verkehrsflusssimulation wurde eine weiterentwickelte Version des Programms BABSIM 2010 verwendet. Hierbei handelt es sich um ein mikroskopisches, zeitschrittorientiertes Simulationsprogramm zur Modellierung des Verkehrsablaufs auf Autobahnen, das 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 wurde (BRILON et al. 2005b; BRILON et al. 2007). Das Programm wurde bereits in verschiedenen Untersuchungen erfolgreich eingesetzt.

BABSIM beruht auf einem absichtsbasierten Verhaltensmodell. Für die Steuerung der Längsbewegung wird das Fahrzeugfolgmodell nach WIEDEMANN (1974) und für das Querverhalten das Fahrstreifenwechselmodell nach SPARMANN (1978) verwendet. Zur Kalibrierung des Fahrverhaltens existieren verschiedene Parameter, wie z. B. die Zeitlücke zum Vorderfahrzeug oder die Trägheit zu überholen. Wie alle einschlägigen Simulationswerkzeuge enthält das Programm allerdings keine speziellen Modelle oder Parameter zur Nachbildung des spezifischen Fahrverhaltens in Arbeitsstellen. Insbesondere hat die im Programm hinterlegte Fahrstreifenbreite keine Auswirkungen auf das modellierte Fahrverhalten. Zur Kalibrierung muss stattdessen auf die allgemeinen Fahrverhaltensparameter zugegriffen werden.

7.3 Simulationsnetze und Kalibrierung

Als maßgebende Einflussgrößen auf die Kapazität von Arbeitsstellen längerer Dauer wurden in Kapitel 5.1.5 – neben dem SV-Anteil und der Steigung – die Lage innerhalb oder außerhalb von Ballungsräumen, die Fahrstreifenbreite und das Vorhandensein einer Fahrbahnteilung ermittelt. Aus diesem Grund wurden bei der Festlegung der zu analysierenden Simulationsnetze nur Varianten dieser Einflussgrößen und z. B. keine Fahrstreifenreduktionen und Überleitungen auf die Gegenfahrbahn berücksichtigt.

Da hohe SV-Anteile in der bemessungsrelevanten Spitzenstunde sowie Steigungen mit hoher Längsneigung eher außerhalb von Ballungsräumen auftreten, wurde für die Simulationen eine Lage der Arbeitsstelle außerhalb von Ballungsräumen gewählt.

Das Vorhandensein einer Fahrbahnteilung hat zwar einen erheblichen Einfluss auf den Verkehrsablauf und die Kapazität von Arbeitsstellen, kann aber mit dem Programm BABSIM – wie auch in anderen Simulationsprogrammen – aufgrund der fehlenden Routenwahlmöglichkeit nicht nachgebildet werden. Es ist zwar eine Aufteilung der Fahrzeuge auf getrennte Fahrstreifen möglich, das strategische Fahrstreifenwechselverhalten vor der Fahrbahnteilung kann aber nicht realistisch nachgebildet werden. Aus diesem Grund wurden geteilte Fahrbahnen in der Simulationsstudie nicht berücksichtigt.

Die Vorgabe der Fahrstreifenbreite hat, wie zuvor bereits beschrieben, zunächst keinen Einfluss auf das Fahrverhalten in BABSIM. Die Vermeidung oder verzögerte Durchführung von Überholungen auf schmalen Fahrstreifen, insbesondere von zu überholenden Lkw, kann somit nur eingeschränkt durch Parameteranpassungen nachgebildet werden. Umfangreiche Tests haben gezeigt, dass das gewünschte Verhalten mit den zur Verfügung stehenden Parametern nicht ausreichend realistisch nachgebildet werden kann. Insbesondere ist eine Differenzierung des Verhaltens in Abhängigkeit von der Fahrstreifenbreite nicht möglich. Die veränderte Fahrstreifenaufteilung im Vergleich zur freien Strecke konnte für größere Fahrstreifenbreiten durch eine Herabsetzung der Überholabsicht und Erhöhung des Wunsches für einen Fahrstreifenwechsel nach rechts zufriedenstellend nachgebildet werden. Diese Parametrisierung zeigte allerdings nur so lange die gewünschte Wirkung, bis die Differenz zwischen Wunsch- und realer Geschwindigkeit zu groß wurde und der Überholdruck dementsprechend deutlich zunahm, was insbesondere bei langsam fahrenden Lkw auf dem rechten Fahrstreifen auftrat. Dies kann insbesondere die Nachbildung des Fahrverhaltens auf Steigungsstrecken in Arbeitsstellen beeinträchtigen.

Auf der Grundlage dieser Erkenntnisse wurden verschiedene Anpassungen der in BABSIM implementierten Absicht „Überholen“ getestet, um insbesondere die verzögerte Durchführung der Überholung von Lkw auf dem rechten Fahrstreifen zweistreifiger Arbeitsstellenverkehrsführungen durch Pkw auf dem linken Fahrstreifen nachbilden zu können. Die Implementierung eines solchen spezifischen Verhaltens innerhalb von Arbeitsstellen erfordert allerdings eine umfangreiche Entwicklungsarbeit, die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung nicht geleistet werden konnte.

Im Rahmen der Simulationen wurden somit nur Verkehrsführungen mit breiten Fahrstreifen ($b_{FS} = 2,75 \text{ m}$) mithilfe der Anpassung der zur Verfügung stehenden Parameter so realitätsnah wie möglich nachgebildet. Zum Vergleich wurden Arbeitsstellen sowohl mit einer zwei- als auch einer dreistreifigen Richtungsverkehrsführung simuliert. Unterschiedliche Fahrstreifenbreiten wurden nicht verglichen.

Da sich die Parameter des Fahrverhaltens im Zulauf zur Arbeitsstelle, im Bereich der Überleitung oder Verschwenkung und in der Arbeitsstelle unterscheiden, war für die Kalibrierung des Verkehrsablaufs eine Unterteilung der Simulationsnetze in mehrere Abschnitte mit unterschiedlichen Parametersätzen notwendig. Bild 7-1 zeigt in einer Prinzipskizze die Aufteilung des Netzes in vier Bereiche:

- Vorlauf: Durch die Arbeitsstelle unbeeinflusster Bereich ab 2 km vor dem Geschwindigkeitstrichter bis zum Beginn des Geschwindigkeitstrichters,
- Zulauf/Geschwindigkeitstrichter: Bereich des Geschwindigkeitstrichters ab 800 m vor der Arbeitsstelle bis zum Beginn des Engpasses,

- Engpass: Bereich des Arbeitsstellenbeginns,
- Arbeitsstelleninnenbereich: Bereich nach dem Engpass innerhalb der Arbeitsstelle.

Diesen vier Bereichen wurde jeweils ein eigenständiger Parametersatz zugeordnet.

Ziel der Simulationsstudie war in erster Linie die Nachbildung von Verkehrszusammenbrüchen im Bereich des Engpasses am Beginn der Arbeitsstelle zur Ermittlung von Kapazitäten. Zusätzlich sollte auch der Verkehrsablauf im Arbeitsstelleninnenbereich realistisch nachgebildet werden. Aus diesem Grund wurden jeweils zwei Querschnitte zur Kalibrierung der Netze herangezogen (MQ 1 und MQ 2 in Bild 7-1).

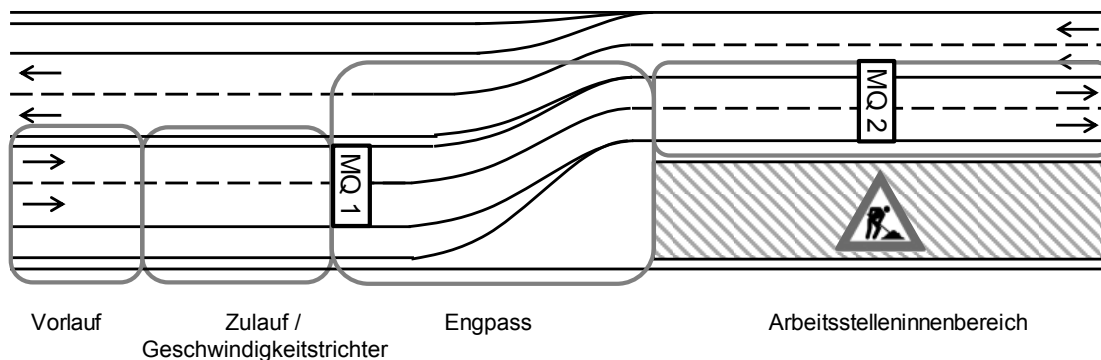


Bild 7-1: Prinzipskizze der Bereiche mit unterschiedlichen Parametersätzen im Simulationsnetz und Darstellung der Lage der zur Kalibrierung verwendeten Messquerschnitte

Für die Kalibrierung der Kapazität im Engpass (MQ 1) wurden die mit dem in Kapitel 5.1.5 entwickelten Modell ermittelten Kapazitäten für Arbeitsstellen außerhalb von Ballungsräumen, ohne Fahrbahnteilung und mit Fahrstreifenbreiten von mindestens 2,75 m herangezogen. Da insbesondere das Untersuchungskollektiv der Arbeitsstellen ohne Steigung mit SV-Anteilen zwischen 5 und 15 % relativ groß ist, können die Ergebnisse des Kapazitätsmodells hierfür als ausreichend valide angesehen werden.

Zur Ermittlung der Kapazität im Simulationsmodell ist es notwendig, die Ganglinie der Verkehrsnachfrage über die erwartete Kapazität hinaus zu steigern. Für die vorliegende Untersuchung wurde die Ganglinie über 90 Minuten kontinuierlich so weit gesteigert, dass mindestens ein Verkehrszusammenbruch auftrat. In der Regel sind Engpässe durch eine Fahrstreifenreduktion oder den Zufluss von Fahrzeugen an einer Anschlussstelle in Verbindung mit einer Veränderung der geometrischen Randbedingungen deutlich erkennbar. Im vorliegenden Fall musste der Engpass am Beginn der Arbeitsstelle hingegen allein durch die Parametereinstellungen generiert werden. Die Kapazität im Engpass war zudem nur geringfügig kleiner als auf der freien Strecke. Bei zu hohen Nachfragewerten führte dies dazu, dass bereits vor dem eigentlichen Engpass vereinzelt Verkehrszusammenbrüche auftraten. Der Stauabfluss war dann in einigen Fällen zu gering, um einen erneuten Zusammenbruch am eigentlichen Engpass zu erzeugen.

Zur Ermittlung der notwendigen Anzahl an Simulationsläufen wurde das in den Hinweisen zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation (FGSV, 2006) angegebene Verfahren angewandt. Voruntersuchungen ergaben sowohl im zweistreifigen als auch im dreistreifigen Simulationsnetz eine Streuung der Verkehrsstärken vor dem Zusammenbruch von ca. 400 Kfz/h. Um die Kapazität mit einem Fehler von 5 % (entspricht ca. 175 Kfz/h für das zweistreifige bzw. 260 Kfz/h für das dreistreifige Simulationsnetz) bei einem Konfidenzniveau von 95 % zu bestimmen, waren für das zweistreifige Simulationsnetz mindestens 16 und für das dreistreifige Netz mindestens 8 Simulationsläufe notwendig. Aufgrund der zuvor beschriebenen Problematik der nicht auftretenden Zusammenbrüche am eigentlichen

Engpass in einigen Simulationsläufen, insbesondere bei den dreistreifigen Simulationsnetzen, wurden für beide Simulationsnetze 20 Simulationsläufe durchgeführt. Hierdurch konnten für alle betrachteten Szenarien ausreichend viele Verkehrszusammenbrüche beobachtet werden.

Als Anhaltspunkt für die Ermittlung der Kapazität diente der Mittelwert der in den jeweils 20 durchgeführten Simulationsläufen identifizierten Verkehrsstärken vor dem Zusammenbruch. Nach GEISTEFELDT (2013) kann der Mittelwert der Verkehrsstärken vor dem Zusammenbruch in 5-Minuten-Intervallen näherungsweise als Schätzwert der deterministischen Kapazität in Stunden-Intervallen angesehen werden. Bei der Kalibrierung der Kapazitäten wurde jeweils eine Abweichung von bis zu 5 % toleriert. Die Ergebnisse der Kalibrierung der Kapazitäten am Engpass sind in Tabelle 7-1 angegeben. Die Toleranzen wurden in beiden Fällen eingehalten.

Simulationsnetz	Kapazität nach Gl. (5-4) [Kfz/h]	Kapazität in der Simulation [Kfz/h]	Abweichung
zweistreifige Richtungsverkehrsführung	3.454	3.498	+1,3 %
dreistreifige Richtungsverkehrsführung	5.181	4.988	-3,7 %

Tab. 7-1: Ergebnisse der Kalibrierung hinsichtlich der Kapazität am Engpass

Die Kalibrierung des Simulationsmodells für den Arbeitsstelleninnenbereich (MQ 2) erfolgte anhand der im Rahmen der Verkehrsmessungen innerhalb von Arbeitsstellen ermittelten Geschwindigkeiten und Fahrstreifenanteilen. Da anhand der Verkehrsmessungen in den einzelnen Arbeitsstellen unterschiedliche Verkehrsstärkebereiche erfasst wurden und sich die Geschwindigkeiten und Fahrstreifenanteile, auch bei vergleichbaren Randbedingungen, unterscheiden, wurden für die Kalibrierung gemittelte Werte aus den verschiedenen Messungen abgeleitet. Für zweistreifige Richtungsverkehrsführungen und breite Fahrstreifen ergaben sich im Bereich hoher Verkehrsstärken Fahrstreifenanteile von etwa 43 % auf dem rechten zu 57 % auf dem linken Fahrstreifen. Die Verkehrsstärke, bei der die Aufteilung des Verkehrs auf beiden Fahrstreifen in etwa ausgeglichen ist, lag bei etwa 2.500 bis 3.000 Kfz/h.

Bild 7-2 zeigt die kalibrierte Fahrstreifenanteile für das zweistreifige Netz. Die Fahrstreifenanteile bei hohen Verkehrsstärken stimmt sehr gut mit den empirischen Werten überein. Der Schnittpunkt, an dem die Aufteilung auf beide Fahrstreifen ausgeglichen ist, liegt allerdings bei einer deutlich niedrigeren Verkehrsstärke. Dies liegt daran, dass die Anpassung der maßgebenden Parameter nur Auswirkungen auf die Fahrstreifenanteile bei hoher Auslastung hat. Für geringere Auslastungen bleibt die Fahrstreifenanteile hingegen vergleichbar mit dem Zustand auf der freien Strecke ohne Arbeitsstelle. Eine Kalibrierung für geringere Auslastungsgrade war somit nicht zufriedenstellend möglich.

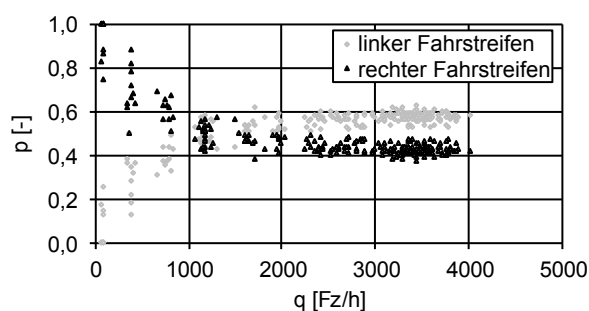


Bild 7-2: Kalibrierte Fahrstreifenanteile für das zweistreifige Simulationsnetz

Für dreistreifige Richtungsverkehrsführungen ergaben sich bei den durchgeführten Verkehrsmessungen im Bereich hoher Auslastungsgrade Verkehrsstärkeanteile von etwa 30, 30 und 40 % für den rechten, mittleren bzw. linken Fahrstreifen. Bild 7-3 zeigt die Ergebnisse der Kalibrierung für das dreistreifige Simulationsnetz. Die Verkehrsstärkeanteile liegen hier mit etwa 25, 35 und 40 % deutlich näher an der empirisch ermittelten Fahrstreifenaufteilung für Arbeitsstellen als an der typischen Fahrstreifenaufteilung für freie Strecken. Eine noch höhere Auslastung des rechten Fahrstreifens konnte mithilfe der zur Verfügung stehenden Parameter nicht erreicht werden. Die Problematik der Nachbildung der Fahrstreifenaufteilung bei niedrigeren Auslastungsgraden gilt hier analog zur zweistreifigen Verkehrsführung.

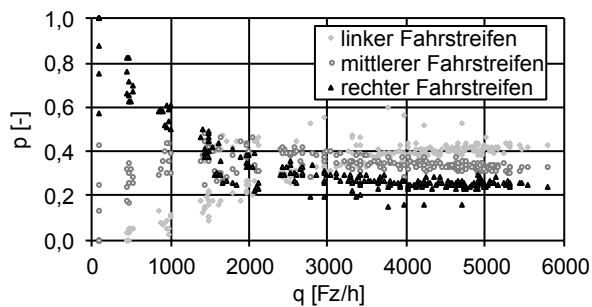


Bild 7-3: Kalibrierte Fahrstreifenaufteilung für das dreistreifige Simulationsnetz

Die Parametereinstellungen für die kalibrierten Simulationsnetze mit zwei- und dreistreifigen Richtungsverkehrsführungen sind in Tabelle 7-2 angegeben. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind nur die Parameter dargestellt, die im Rahmen der Kalibrierung angepasst wurden. Zur Generierung des Engpasses am Beginn der Arbeitsstelle wurden insbesondere die Zeitlücke zum Vorderfahrzeug und die sogenannte Trödelwahrscheinlichkeit, welche kurze Unaufmerksamkeiten des Fahrers widerspiegelt, angepasst. Zur Kalibrierung der Fahrstreifenaufteilung wurden hingegen Parameter verwendet, die das Überholverhalten steuern. Die Anpassung der Parameter erfolgte zum Teil bereits im Zulauf zur Arbeitsstelle, um zu abrupten Änderungen zu vermeiden.

Simulationsnetz	Standardwert	zweistreifig				dreistreifig			
		Vorlauf	Zulauf	Engpass	Innenbereich	Vorlauf	Zulauf	Engpass	Innenbereich
Zeitlücke	0,55	0,55	0,7	0,8	0,55	0,55	0,7	0,8	0,55
Trödelwahrscheinlichkeit	1	1	1	0,99	1	1	1	0,99	1
TrägheitRechtsfahrgebot	0,1	0,1	0,5	1	1	0,1	0,5	1	1
TrägheitÜberholen	1	1	0,01	0,01	0,07	1	0,05	0,05	0,1
TrägheitÜberholenFahrstreifen1	0,1	0,1	0,01	0,01	0,01	0,1	0,01	0,01	0,05
TrägheitÜberholenFahrstreifen2	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,01	0,01	0,01

Tab. 7-2: Anpassungen der Simulationsparameter in BABSIM (veränderte Werte sind grau hinterlegt)

Ergänzend wurden die gefahrenen Geschwindigkeiten über das gesamte Simulationsnetz möglichst realitätsnah nachgebildet. Hierzu wurden zunächst die anhand der durchgeführten Verkehrsmessungen ermittelten Wunschgeschwindigkeiten getrennt für Pkw und Lkw im Arbeitsstelleninnenbereich herangezogen. Ergänzend wurden Ergebnisse von Befahrungen von Arbeitsstellen aus der Untersuchung von KEMPER et al. (2018) als Anhaltspunkte für die Geschwindigkeitsprofile über alle Streckenabschnitte (Vorlauf, Geschwindigkeits-

trichter, Engpass und Arbeitsstelleninnenbereich) berücksichtigt. Trotz der einheitlichen Geschwindigkeitsbeschränkung auf 80 km/h im letzten Abschnitt des Geschwindigkeitstrichters, im Engpass und im Arbeitsstelleninnenbereich wurden für die verschiedenen Bereiche auf Grundlage dieser Datenbasis unterschiedliche Wunschgeschwindigkeiten hinterlegt. Während die mittleren Geschwindigkeiten im Geschwindigkeitstrichter in der Regel deutlich über den zulässigen Höchstgeschwindigkeiten liegen, ist die Geschwindigkeit im Engpass zumeist erkennbar reduziert, da durch die vorhandene Verschwenkung ein Abbremsen der Fahrzeuge notwendig wird. Der typische Geschwindigkeitseinbruch am Engpass wurde somit durch eine Anpassung der Wunschgeschwindigkeit realistisch nachgebildet. Durch diese relativ abrupte Änderung der Wunschgeschwindigkeit wurden gleichzeitig Zusammenbrüche des Verkehrsflusses im Bereich des Engpasses erzeugt. Im Innenbereich der Arbeitsstelle wurde die Wunschgeschwindigkeit dann wieder angehoben. Daraus ergeben sich für die vier berücksichtigten Bereiche die in Tabelle 7-3 dargestellten mittleren Wunschgeschwindigkeiten und Standardabweichungen.

Tempolimit [km/h]	Fahrzeugtyp	Mittelwert/Standardabweichung der Wunschgeschwindigkeitsverteilung [km/h]				
		Standardwert	Vorlauf	Zulauf	Engpass	Innenbereich
100	Pkw	110/18	110/12	110/12	-	-
	Lkw	90/5	90/8	90/8	-	-
80	Pkw	100/15	100/12	100/12	90/12	95/12
	Lkw	85/4	85/8	85/8	80/8	83/8

Tab. 7-3: Parameter der angepassten Wunschgeschwindigkeitsverteilungen in BABSIM

7.4 Durchführung und Ergebnisse der Simulationen

Für die Analyse des Einflusses von hohen SV-Anteilen und Steigungen in Arbeitsstellen wurden für jedes Simulationsnetz die im Folgenden dargestellten neun Simulationsszenarien festgelegt. Die Auswahl der Szenarien orientierte sich dabei an den Schwerverkehrsklassen der Kapazitätswerte für Strecken von Autobahnen des HBS (FGSV, 2015) und den Steigungsklassen in den RBAP (BMV, 1996). Repräsentativ für die Steigungsklasse $2\% < s \leq 4\%$ wurde die Steigung zu $s = 3\%$ gewählt. Für die Steigungsklasse $s > 4\%$ wurde die Steigung $s = 5\%$ gewählt:

- $b_{SV} = 10\%$ mit $s = 0\%$, $s = 3\%$ und $s = 5\%$,
- $b_{SV} = 20\%$ mit $s = 0\%$, $s = 3\%$ und $s = 5\%$,
- $b_{SV} = 30\%$ mit $s = 0\%$, $s = 3\%$ und $s = 5\%$.

Für jedes Szenario wurden zwanzig Simulationsläufe durchgeführt. In Bild 7-4 sind die auf diese Weise ermittelten Kapazitäten für alle Kombinationen der Parameter SV-Anteil und Steigung für das zwei- und dreistreifige Simulationsnetz dargestellt. Zusätzlich sind für jedes Szenario die Spannweiten der einzelnen Kapazitäten angegeben. Tabelle 7-4 und Tabelle 7-5 zeigen ergänzend die Abweichungen der Kapazitäten bei 3 und 5 % Steigung zu den Ausgangsszenarien bei 0 % Steigung.

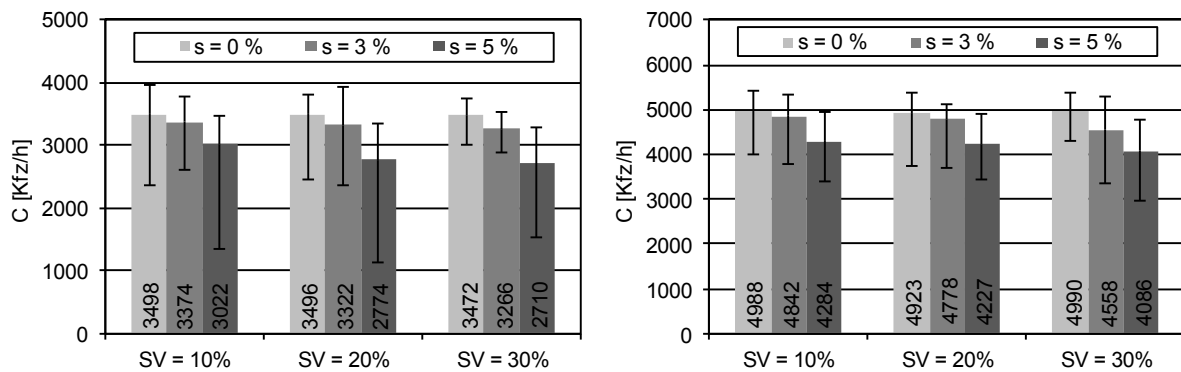


Bild 7-4: Kapazitäten der neun analysierten Simulationsszenarien für das zwei- (links) und dreistreifige (rechts) Simulationsnetz

		Schwerverkehrsanteil b_{SV}		
		10 %	20 %	30 %
Steigung s	0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
	3 %	-3,6 %	-5,0 %	-5,9 %
	5 %	-13,6 %	-20,6 %	-21,9 %

Tab. 7-4: Abweichungen der in der Simulation ermittelten Kapazitäten zum Ausgangswert von $s = 0 \%$ bei unterschiedlichen Steigungen und SV-Anteilen für das zweistreifige Netz (grau hinterlegte Werte sind Ausgangswerte)

		Schwerverkehrsanteil b_{SV}		
		10 %	20 %	30 %
Steigung s	0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
	3 %	-2,9 %	-2,9 %	-8,7 %
	5 %	-14,1 %	-14,0 %	-18,1 %

Tab. 7-5: Abweichungen der in der Simulation ermittelten Kapazitäten zum Ausgangswert von $s = 0 \%$ bei unterschiedlichen Steigungen und SV-Anteilen für das dreistreifige Netz (grau hinterlegte Werte sind Ausgangswerte)

Zunächst wird deutlich, dass alle Kapazitäten mit zunehmender Steigung abnehmen. Die Kapazität bei einer Steigung von 5 % ist beim Simulationsnetz mit zweistreifiger Richtungsverkehrsführung für die SV-Anteile 20 und 30 % um ca. 20 % geringer als auf ebener Strecke. Dies bestätigt den für das Kapazitätsmodell gewählten Abminderungsfaktor von 0,8 (vgl. Kapitel 5.1.5). Für die dreistreifigen Richtungsverkehrsführungen ergibt sich in der Simulation eine etwas geringere Abnahme der Kapazität.

Für die Richtungsverkehrsführungen mit Steigungen von 3 % sind die in den Simulationen ermittelten Kapazitäten um 2,9 bis 8,7 % geringer als in der Ebene. Anhand der empirischen Daten wurde eine Reduktion der Kapazität von Arbeitsstellen mit Steigungen von 2 bis 4 % um etwa 10 % ermittelt. Aufgrund der großen Spannweiten der Kapazitäten sowohl in den empirischen Daten als auch im Simulationsmodell wird der empirisch ermittelte Abminderungsfaktor von 0,9 beibehalten.

Tabelle 7-6 und Tabelle 7-7 zeigen die Abweichungen der Kapazitäten bei 20 und 30 % SV-Anteil zu den Ausgangsszenarien bei 10 % SV-Anteil. Die Höhe des SV-Anteils hat auf Grundlage der Simulationsergebnisse, mit Ausnahme des zweistreifigen Netzes mit 5 % Steigung, beinahe keine Auswirkungen auf die Kapazität. Diese Unabhängigkeit der Kapazität vom SV-Anteil widerspricht den existierenden Modellen zur Kapazitätsbestimmung in

den einschlägigen Richtlinien, z. B. im HBS (FGSV, 2015) und in den RBAP (BMV, 1996), und auch dem im Rahmen der vorliegenden Arbeit anhand empirischer Kapazitätsanalysen entwickelten Modell. Lediglich bei der Analyse des Verkehrsablaufs an Arbeitsstellen kürzerer Dauer (vgl. Kapitel 5.3) konnte ebenfalls keine Abhängigkeit zwischen der Kapazität und dem SV-Anteil nachgewiesen werden.

		Schwerverkehrsanteil b_{SV}		
		10 %	20 %	30 %
Steigung s	0 %	0,0 %	-0,1 %	-0,8 %
	3 %	0,0 %	-1,5 %	-3,2 %
	5 %	0,0 %	-8,2 %	-10,3 %

Tab. 7-6: Abweichungen der in der Simulation ermittelten Kapazitäten zum Ausgangswert von $b_{SV} = 10$ % bei unterschiedlichen Steigungen und SV-Anteilen für das zweistreifige Netz (grau hinterlegte Werte sind Ausgangswerte)

		Schwerverkehrsanteil b_{SV}		
		10 %	20 %	30 %
Steigung s	0 %	0,0 %	-1,3 %	0,0 %
	3 %	0,0 %	-1,3 %	-5,9 %
	5 %	0,0 %	-1,3 %	-4,6 %

Tab. 7-7: Abweichungen der in der Simulation ermittelten Kapazitäten zum Ausgangswert von $b_{SV} = 10$ % bei unterschiedlichen Steigungen und SV-Anteilen für das dreistreifige Netz (grau hinterlegte Werte sind Ausgangswerte)

Im Rahmen der Modellentwicklung in Kapitel 5.1.5 wurde u. a. ein Modell geprüft, bei dem angenommen wird, dass der SV-Anteil keinen Einfluss auf die Kapazität an Arbeitsstellen längerer Dauer hat. Die Optimierungsgüte dieses Modells war jedoch deutlich schlechter als die Optimierungsgüte des letztendlich gewählten Modells. Aus diesem Grund werden die empirisch ermittelten Faktoren beibehalten.

Die im Hinblick auf den Einfluss des Schwerverkehrs abweichenden Ergebnisse zwischen den empirisch und anhand der Simulationen ermittelten Kapazitäten sind im Wesentlichen mit den fehlenden Möglichkeiten zur Nachbildung des spezifischen Überholverhaltens in Arbeitsstellen in der Simulation zu erklären. Da die Vermeidung oder verzögerte Durchführung von Überholungen innerhalb der Arbeitsstelle nicht adäquat nachgebildet werden kann, führt ein höherer SV-Anteil in der Simulation zu mehr überholenden Pkw auf dem linken Fahrstreifen und damit zu einer gleichmäßigeren Auslastung der Behelfsfahrstreifen als in der Realität.

8 Analyse der Verkehrssicherheit

8.1 Datengrundlagen

Bei den durchgeführten Untersuchungen zur Verkehrssicherheit in Arbeitsstellen auf Autobahnen wurden Arbeitsstellen längerer Dauer und Arbeitsstellen kürzerer Dauer betrachtet. Für diese wurde jeweils ein möglichst umfassendes und repräsentatives Untersuchungskollektiv zu Grunde gelegt. Bild 8-1 zeigt die gewählte Herangehensweise.

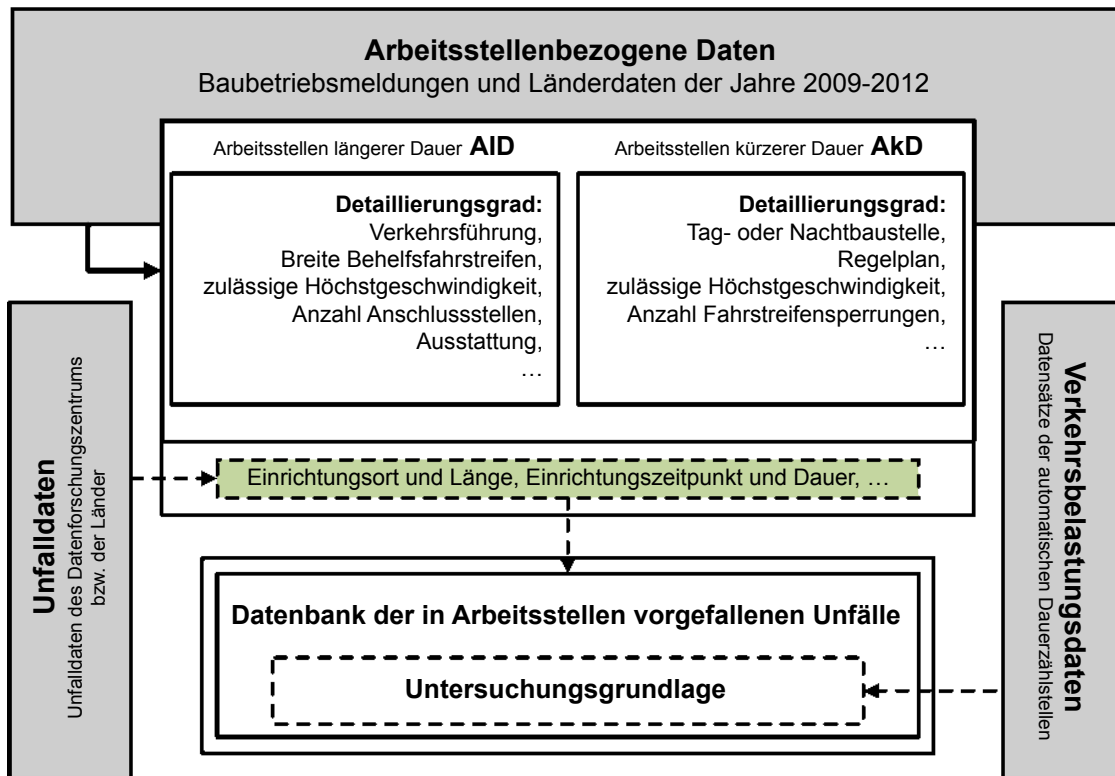


Bild 8-1: Übersicht über die Datengrundlage für die Untersuchungen der Verkehrssicherheit

Die arbeitsstellenbezogenen Daten stellen die Bezugsebene der Untersuchungen zum Unfallgeschehen dar. Hierzu gehören neben den Angaben zur Einrichtung einer Arbeitsstelle sowie zur örtlichen und zeitlichen Lokalisierung der Arbeitsstelle (Ort, d. h. Autobahn und Betriebs-km, Beginn/Ende der Einrichtung) weitere Angaben u. a. zur Verkehrsführung. Alle arbeitsstellenbezogenen Daten wurden, differenziert nach Arbeitsstellen längerer und kürzerer Dauer, in eine Arbeitsstellendatenbank aufgenommen.

Grundlegend für die Ermittlung der Unfallkenngrößen sind die Verfügbarkeit, die Vollständigkeit und die Richtigkeit aller Informationen über die Unfälle in den Arbeitsstellen bzw. in einzelnen Bereichen innerhalb der Arbeitsstellen. Dazu sind zu jedem Unfall mindestens folgende Angaben erforderlich:

- Unfalldatum und -uhrzeit,
- Unfallort (auf Autobahnen über den Betriebs-km und die Fahrtrichtung),
- Unfallkategorie,
- Anzahl der Verunglückten nach Verletzungsschwere (bei Unfällen mit Personenschaden).

Neben diesen Angaben wurden, sofern verfügbar, für weitergehende Betrachtungen zusätzlich Angaben wie Unfalltyp, Unfallart und Unfallursachen aufgenommen.

Vor dem Hintergrund der zu analysierenden Datenmenge stützte sich die Datengrundlage auf elektronische Unfalldaten der statistischen Landesämter sowie teilweise der Straßenbauverwaltungen der Länder. Vorgegangene Untersuchungen, beispielsweise von KEMPER et al. (2018), belegen, dass die inzwischen verfügbare Datengenauigkeit und -qualität eine ausreichend detaillierte Auswertung der Unfälle mit diesen Daten ermöglichen. Da bei den statistischen Landesämtern nur Daten zu den Unfällen der Kategorien 1-4 geführt werden, war es notwendig, auf Daten zu allen Unfällen, die bei den Straßenbauverwaltungen der Länder vorliegen, zurückzugreifen. Zu nennen sind hier die Straßenbauverwaltungen von Bayern, Hessen, Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz. Des Weiteren bestehen bei einigen Autobahnpolizeien (z. B. in Nordrhein-Westfalen bei der Autobahnpolizei Köln und der Autobahnpolizei Düsseldorf) geeignete Unfalldatenbanken, die alle Unfälle enthalten.

Zur Ermittlung der relevanten Unfallkenngrößen – hier Unfallraten und Unfallkostenraten – waren Daten zur Fahrleistung in der jeweiligen Arbeitsstelle erforderlich. Die Bestimmung der Fahrleistung erfolgte anhand der Daten von Dauerzählstellen. Nach der in Kapitel 4.1.1 dargestellten Vorgehensweise wurde aus den fahrtrichtungsbezogenen DTV-Angaben die während der Baumaßnahme vorherrschende Verkehrsmenge ermittelt. Die saisonalen Abweichungen sowie die notwendigen Korrekturen in Bezug auf die tagesgenauen Meldungen über den Beginn und das Ende der Baumaßnahme erfolgten über die Berücksichtigung von Jahres- und Wochenganglinien bei Arbeitsstellen längerer Dauer sowie zusätzlich von Tagesganglinien bei Arbeitsstellen kürzerer Dauer. Arbeitsstellen auf Autobahnabschnitten, zu denen keine Angaben zur Verkehrsstärke vorlagen, wurden von den Betrachtungen ausgenommen.

8.2 Arbeitsstellen längerer Dauer

8.2.1 Untersuchungsmethodik

Im Rahmen der Unfallanalyse erfolgte – ähnlich wie in bereits durchgeführten Untersuchungen aus der Vergangenheit, z. B. von EMDE und HAMESTER (1983) und zuletzt bei KEMPER et al. (2018) – jeweils eine bereichsbezogene Betrachtung innerhalb der Arbeitsstellen. Dazu wurden die Arbeitsstellen in einzelne Teilbereiche (im Weiteren auch als Sektionen bezeichnet) unterteilt: Vorlauf, Zulauf, Fahrstreifen- oder Fahrbahnverschwenkung bzw. Überleitung, Innenbereich (bei Verkehrsführungen mit Überleitung auf die Gegenfahrbahn der Bereich mit Gegenverkehrstrennung) und Rückverschwenkung bzw. Rückleitung. Der Vorlauf bezieht sich auf den Bereich von 2.000 m (1. Ankündigung der Arbeitsstelle durch Zeichen 123 StVO) bis 800 m (2. Ankündigung durch Zeichen 123 StVO mit nachfolgendem Geschwindigkeitstrichter und weiterer Beschilderung mit Verkehrslenkungstafeln) und der Zulauf auf den Bereich von 800 m bis 0 m (Beginn der Überleitung bzw. des Innenbereichs bei Verkehrsführungen ohne Überleitung) vor der Arbeitsstelle. Darüber hinaus wurden die Ein- und Ausfahrtbereiche von Anschlussstellen bzw. Tank- und Rastanlagen oder Parkplätzen im Arbeitsstelleninnenbereich gesondert erfasst.

Es wurde eine fahrtrichtungsbezogene Definition von Teilbereichen jeder untersuchten Arbeitsstelle vorgenommen. Diese ist in Bild 8-2 am Beispiel einer 4+0-Verkehrsführung mit insgesamt drei im Innenbereich liegenden Anschlussstellen verdeutlicht.

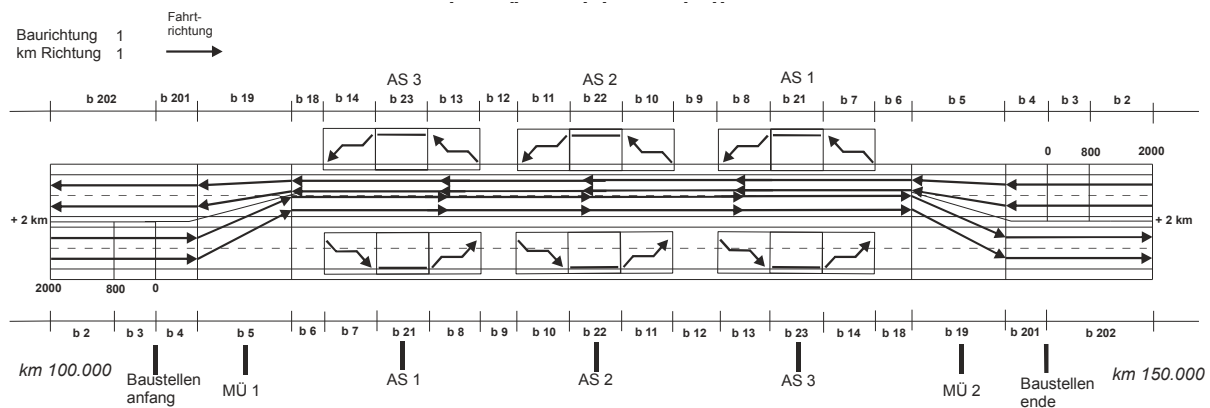


Bild 8-2: Einteilung einer Arbeitsstelle längerer Dauer in Teilbereiche (Sektionen)

Nach Bild 8-2 können somit bei Arbeitsstellen längerer Dauer pro Richtungsfahrbahn und in Abhängigkeit von der Anzahl innenliegender Anschlussstellen maximal 24 Sektionen unterschieden werden. Sieben dieser Sektionen sind immer vorhanden und stellen die Bereiche der Arbeitsstelle dar, die nicht zum Innenbereich gehören. Es handelt sich hierbei um die Sektionen:

- Sektion b2: Vorlauf von 2.000 m bis 800 m vor der Arbeitsstelle (1. Ankündigung der Arbeitsstelle durch Zeichen 123 StVO bis 2. Ankündigung durch Zeichen 123 StVO),
- Sektion b3: Zulauf von 800 m bis 0 m vor der Arbeitsstelle (2. Ankündigung durch Zeichen 123 StVO bis zum Beginn der Arbeitsstelle) einschließlich Sektion b4: (eventuell vorhandener) Bereich zwischen dem Beginn der Arbeitsstelle und dem Beginn der Überleitung bzw. Verschwenkung,
- Sektion b5: Überleitung bzw. Verschwenkung,
- Sektion b6 bis b18: Innenbereich,
- Sektion b19: Rückleitung bzw. Rückverschwenkung,
- Sektion b201: Bereich zwischen der Rückleitung bzw. Rückverschwenkung und der Aufhebung der arbeitsstellenbedingten Beschränkung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit,
- Sektion b202: Bereich ab der Aufhebung der Geschwindigkeitsbeschränkung (Länge pauschal 1 km).

Die Sektionen des Innenbereichs sind abhängig von der Anzahl der Anschlussstellen. So stellt die Sektion b6 den Innenbereich der Arbeitsstelle beim Nichtvorhandensein von Anschlussstellen bzw. den Bereich zwischen der Überleitung bzw. Verschwenkung und der ersten Ausfahrt beim Vorhandensein mindestens einer Anschlussstelle dar.

Für die einzelnen Teilbereiche erfolgte zunächst eine differenzierte Analyse des Unfallgeschehens. Im Laufe der Unfallanalyse wurden dann auch einzelne Teilbereiche zusammengefasst, z. B. der gesamte Arbeitsstelleninnenbereich. Den so gebildeten Teilbereichen wurden die im Zeitraum der Arbeitsstelle polizeilich registrierten Unfälle zugeordnet. Diese Zuordnung ist über die in den Unfalldaten enthaltenen Angaben (Datum, BAB-Nr., Kilometrierung, Fahrtrichtung) eindeutig möglich. Die Unfalldaten wurden in einer Unfalldatenbank aufbereitet, die mit der Arbeitsstellendatenbank verknüpft ist. Auf dieser Grundlage konnten dann alle erforderlichen Analysen, u. a. auch die Berechnung der Unfallkosten und die Ermittlung der Unfallkenngrößen, durchgeführt werden.

Zunächst erfolgte eine Analyse der Unfall- und der Verunglücktenstruktur. Dabei wurden u. a. verschiedene einzelne und zusammengefasste Teilbereiche innerhalb der Arbeitsstellen (Zulauf, Verschwenkung bzw. Überleitung, Innenbereich usw.) differenziert.

Darauf aufbauend wurden die Unfallkosten ermittelt. Da ein ausreichendes Kollektiv von Unfällen mit Personenschaden (Kategorien 1-3) vorlag, erfolgte eine Anpassung der Unfallkostensätze, da hiermit die spezifische Verunglücktenstruktur am besten berücksichtigt wird (siehe Kapitel 8.2.3).

Mit den ermittelten angepassten Unfallkostensätzen wurden die Unfallkosten jeder Arbeitsstelle, differenziert nach den verschiedenen einzelnen und zusammengefassten Teilbereichen innerhalb der Arbeitsstellen, berechnet. Mit diesen Unfallkosten wurden dann die Unfallkostenraten für jeden betrachteten Bereich einzeln sowie die mittlere Unfallkostenrate für die jeweiligen Bereiche aller Arbeitsstellen einer Verkehrsführung bestimmt. Die Berechnung erfolgte gemäß Kapitel 4.1.1 unter Berücksichtigung der Jahres- und Wochenganglinien des Kfz-Verkehrs.

Im Ergebnis wurden richtungsbezogene Unfallkostenraten für Zulauf, Verschwenkung bzw. Überleitung, Innenbereich usw. zu allen relevanten Verkehrsführungen bereitgestellt. Die so differenzierten Unfallkostenraten sollen eine praxistaugliche Bewertung der zu erwartenden Auswirkungen verschiedener Verkehrsführungen in Abhängigkeit von den gegebenen Randbedingungen (DTV, verfügbare Fahrbahnbreite, realisierbare Breite der Behelfsfahrstreifen usw.) ermöglichen.

Zusätzlich zu den Unfallkostenraten wurden auch jeweils die richtungsbezogenen Unfallraten bestimmt. Diese können als Kenngröße der Häufigkeit von unfallbedingten Störungen des Verkehrsablaufs herangezogen werden. Die Berechnung erfolgte ebenfalls gemäß Kapitel 4.1.1 unter Berücksichtigung der Jahres- und Wochenganglinien des Kfz-Verkehrs.

8.2.2 Untersuchungskollektiv

Die Definition der Anforderungen an die Untersuchungsgrundlage und somit das Aufstellen einer entsprechenden Datenbank mit arbeitsstellenbezogenen Daten von Arbeitsstellen längerer Dauer erfolgte ausgehend von den in Kapitel 2.4 genannten „maßgebenden Arbeitsstellen“. Die Ableitung von standardisierten Kenngrößen für Arbeitsstellen mit 2+2-, 4+0-, 3+1-, 3+3-, 2+1-, 3+2-, 2+0-, 1+1-, 4+2- und 3+0-Verkehrsführungen stellte somit das wesentliche Ziel der Untersuchungen dar. Darüber hinaus sollten auch Erkenntnisse über die Verkehrsführungen gewonnen werden, welche zukünftig aufgrund des zunehmenden Anteils sechs- und achtstreifiger Autobahnen in Deutschland voraussichtlich häufiger zum Einsatz kommen und somit an Bedeutung gewinnen werden. Dabei handelt es sich um 5+0-, 5+1-, 6+0- und 6+2-Verkehrsführungen, die ebenfalls berücksichtigt wurden.

Mit dieser Festlegung wurde zum einen die Berücksichtigung aller praxisrelevanten Verkehrsführungen sichergestellt und zum anderen die Grundlage für die fahrtrichtungsbezogene Übertragung der Ergebnisse auf andere Verkehrsführungen geschaffen. So sollten auch Aussagen über die derzeit noch selten vorkommenden, jedoch relevanten Verkehrsführungen getroffen werden. Beispielsweise ist eine 5+2-Verkehrsführung fahrtrichtungsbezogen mit einer 5+0- bzw. 3+2-Verkehrsführung vergleichbar.

Hinsichtlich der Einrichtungslänge und -dauer wurde für Arbeitsstellen längerer Dauer eine Mindestlänge von 700 m sowie eine Mindestdauer von 21 Tagen festgesetzt. Dies erfolgte in Anlehnung an die in Kapitel 2.4 gewonnenen Erkenntnisse und die Festlegungen in der vorangegangenen Untersuchung von KEMPER et al. (2018), um diese Ergebnisse direkt mit

denen der vorliegenden Untersuchung gegenüberstellen bzw. bei Bedarf die Datengrundlage erweitern zu können.

Im ersten Schritt der Kollektivbildung fand die Auswertung der Baubetriebsmeldungen der Jahre 2003 bis 2012 statt. Daraus wurden insgesamt 175 Arbeitsstellen längerer Dauer in den der Ländern Baden-Württemberg, Bayern, Hessen, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz ausgewählt, die bis in die Jahre 2009 bis 2014 eingerichtet waren (Tabelle 8-1). Es zeigt sich, dass etwas mehr als die Hälfte der betrachteten Arbeitsstellen bis in die Jahre 2012 bis 2014 eingerichtet waren, rund weitere 30 % der Arbeitsstellen bis ins Jahre 2011. Damit ist das den Unfallanalysen zu Grunde gelegte Arbeitsstellenkollektiv von überwiegend hoher Aktualität gekennzeichnet, sodass eine Berücksichtigung der allgemeinen zeitlichen Unfallentwicklung nicht erforderlich ist.

Jahr	Land						Σ
	BY	BW	HE	NI	NW	RP	
2009	5	1	4	0	0	5	15
2010	0	3	5	0	6	2	16
2011	6	13	9	2	16	5	51
2012	25	15	5	4	30	7	86
2013	0	2	0	0	2	2	6
2014	1	0	0	0	0	0	1
Σ	37	34	23	6	54	21	175

Tab. 8-1: Arbeitsstellen längerer Dauer nach Jahren (Ende der Einrichtung) und Ländern

Die Angaben zu diesen Arbeitsstellen wurden plausibilisiert und in Form eines Datenblatts für die bevorstehende Länderabfrage vorbereitet. Die erarbeiteten Datenblätter wurden anschließend mit der Bitte um Prüfung und Ergänzung an die Straßenbauverwaltungen der genannten Länder verschickt. Im Fokus der Befragung stand die Ergänzung der bereits aus den Baubetriebsmeldungen vorliegenden Daten um die Informationen, mit deren Hilfe eine zielführende Sektionsbildung und Analyse erreicht werden kann. Nach Rücklauf der Länderabfrage in Form ausgefüllter Datenblätter oder angehängter Planunterlagen ergab sich für die Untersuchung der Arbeitsstellen längerer Dauer ein Gesamtuntersuchungskollektiv von 175 Arbeitsstellen. Tabelle 8-2 zeigt eine Übersicht der Verteilung dieser Arbeitsstellen über die Länder sowie die Angaben zur Verkehrsführung.

Land	2+2	4+0	3+1	3+3	2+1	3+2	2+0	1+1	4+2	3+0	5+0	6+2	5+1	6+0	sonst.	Σ
BY	9	14	0	0	0	2	5	0	0	2	4	0	1	0	0	37
HE	5	5	5	2	0	0	0	0	3	0	0	2	0	0	1	23
NI	1	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
NW	16	13	3	10	2	4	0	1	2	0	0	0	0	2	1	54
RP	2	8	1	0	0	0	6	1	0	1	2	0	0	0	0	21
Σ	33	44	10	12	2	6	11	2	5	3	6	2	1	2	2	141
BW*	6	13	3	2	0	0	1	0	1	2	5	0	1	0	0	34
* keine Angaben zu Unfällen mit leichtem Sachschaden (Unfallkategorie 5)														Gesamtsumme	175	

Tab. 8-2: Arbeitsstellen längerer Dauer nach Verkehrsführungen

Etwa 20 % der 175 Arbeitsstellen hatten eine Länge unter 5 km. Mit 64 % hatte der Großteil der Arbeitsstellen eine Länge von 5 km bis 10 km, weitere 15 % der Arbeitsstellen hatten eine Länge von 10 km bis 15 km. Nur drei der 175 Arbeitsstellen, also weniger als 1 %, hatten eine Länge von mehr als 15 km, wobei die maximale Länge knapp über 16 km lag.

Für die 175 Arbeitsstellen längerer Dauer wurden Unfallanalysen durchgeführt. Für alle Arbeitsstellen lagen die Daten zu Unfällen mit Personenschaden (Kategorien 1-3) vor. Da für die Arbeitsstellen in Baden-Württemberg keine Angaben zu den Unfällen mit leichtem Sachschaden (Kategorie 5) verfügbar waren und für die Arbeitsstellen in Bayern in der zur Verfügung gestellten Unfalldatenbank keine Differenzierung der Unfälle mit Sachschaden (Kategorien 4-6) angegeben war, wurden unterschiedliche Unfallkollektive gebildet (Bild 8-3).

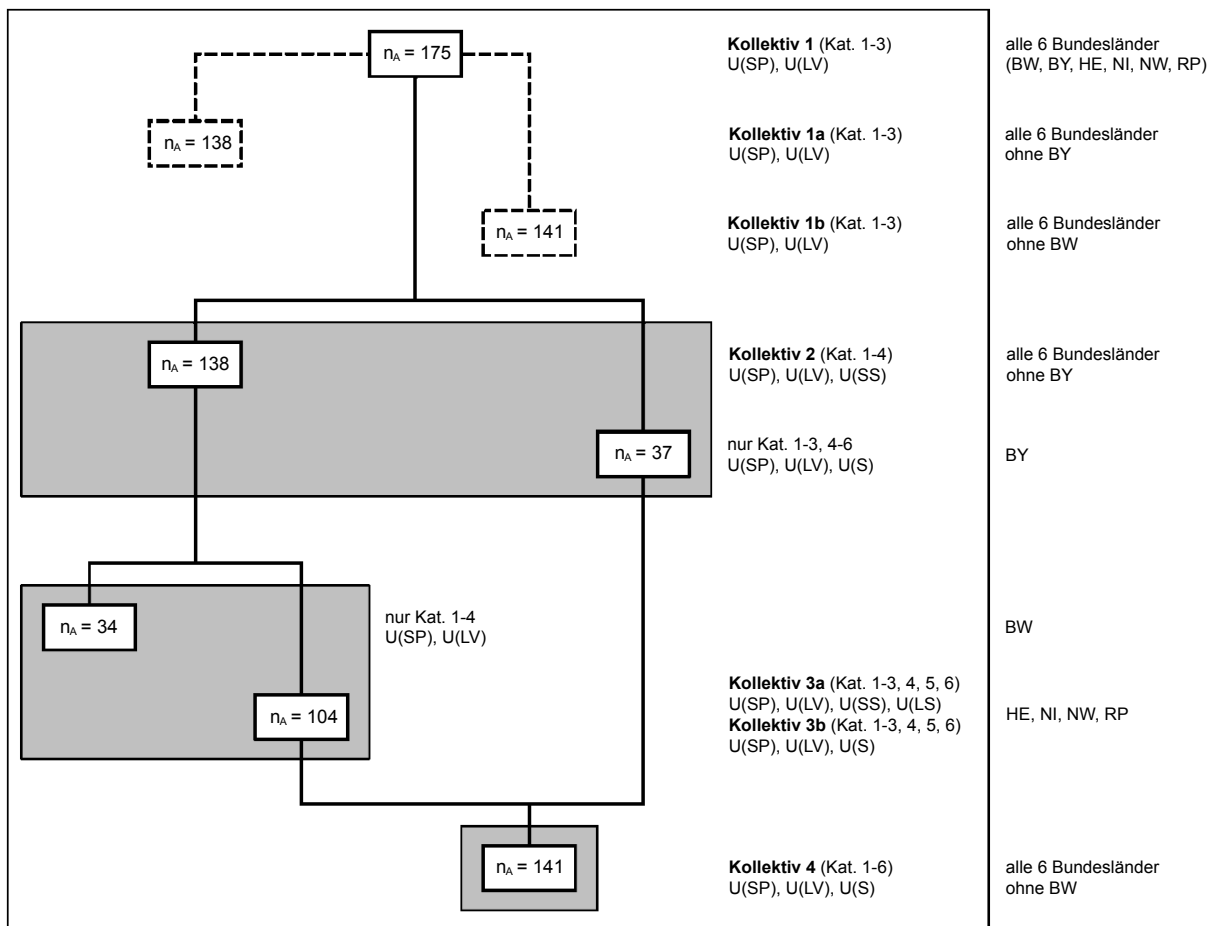


Bild 8-3: Aufteilung des Untersuchungskollektivs der betrachteten Arbeitsstellen längerer Dauer in Abhängigkeit von den verfügbaren Unfalldaten

8.2.3 Verunglücktenstruktur

Da mit insgesamt 872 Unfällen mit Personenschaden in allen 175 Arbeitsstellen (gesamter Arbeitsstellenbereich zuzüglich jeweils 2 km Zulauf und Nachlauf) eine für eine Ermittlung angepasster Unfallkostensätze erforderliche Mindestanzahl von Unfällen mit Personenschaden (vgl. Kapitel 4.1.2) vorlag, erfolgte eine Anpassung der Unfallkostensätze. In den innerhalb der Arbeitsstellen betrachteten Bereichen Zulauf, Überleitung/Verschwenkung, Innenbereich und Rückleitung/Rückverschwenkung ist die Anzahl der Unfälle mit Personenschaden deutlich geringer, sodass auf eine differenzierte Anpassung der Kostensätze in den einzelnen Bereichen verzichtet wurde.

Die Verunglücktenstruktur der Unfälle mit schwerem Personenschaden in den betrachteten 175 Arbeitsstellen unterscheidet sich deutlich von der durchschnittlichen Verunglücktenstruktur aller Unfälle mit schwerem Personenschaden auf Bundesautobahnen (Tabelle 8-3). In den Arbeitsstellen ist die Anzahl der Getöteten pro 100 Unfälle mit schwerem Personenschaden deutlich geringer als im Mittel auf Bundesautobahnen. Auch die Anzahl der Schwerverletzten pro 100 Unfälle mit schwerem Personenschaden ist geringer. Zusätzlich zeigt sich ein leichter Unterschied zwischen Arbeitsstellen mit und ohne Überleitung. Bei Arbeitsstellen ohne Überleitung ist die Anzahl der Getöteten pro 100 Unfälle mit schwerem Personenschaden geringer als bei Arbeitsstellen mit Überleitung. Diese Differenzierung wurde jedoch bei der Anpassung der Unfallkostensätze nicht berücksichtigt.

Bereich		Verunglückte je 100 U(SP)		
		Getötete	Schwerverletzte	Leichtverletzte
Autobahnen insgesamt	2.000	12	123	64
	2.010	12	120	63
Arbeitsstellen längerer Dauer	alle ($n_A = 175$)	8	114	66
	mit Überleitung ($n_A = 112$)	8	113	69
	ohne Überleitung ($n_A = 63$)	6	115	55

Tab. 8-3: Verunglücktenstruktur der Unfälle mit schwerem Personenschaden auf Autobahnen insgesamt und in den betrachteten 175 Arbeitsstellen

In Tabelle 8-4 sind die angepassten Unfallkostensätze für Unfälle in den betrachteten Arbeitsstellen längerer Dauer angegeben. Entsprechend der Verunglücktenstruktur mit einer deutlich geringeren Anzahl an Getöteten und Schwerverletzten pro 100 Unfälle mit schwerem Personenschaden sind die Kostensätze für Unfälle mit schwerem Personenschaden (Kategorien 1+2) niedriger als die pauschalen, durchschnittlichen Unfallkostensätze für Unfälle mit schwerem Personenschaden auf Autobahnen insgesamt (siehe hierzu Tabelle 8-18 in Kapitel 8.3.3). Für die Berechnung der Unfallkostenraten wurden die nach den einzelnen Unfallkategorien differenzierten Kostensätze aus Tabelle 8-4 verwendet. Neben dem aktuellen Preisstand 2010 wurden auch die Kostensätze für den Preisstand 2000 ermittelt, um auch Unfallkostenraten zu diesem Preisstand berechnen zu können, die einen Vergleich mit den Ergebnissen bereits vorliegender Untersuchungen ermöglichen.

Unfallkategorie	KSU [€/U]	
	Preisstand 2000	Preisstand 2010
Kategorie 1+2: U(SP)	240.000	28.9609
Kategorie 3: U(LV)	31.500	44.161
Kategorie 1-3: U(P)	70.500	89.791
Kategorie 4+6: U(SS)	18.500	24.130
Kategorie 5: U(LS)	8.000	4.950
Kategorie 4-6: U(S)	10.500	7.129

Tab. 8-4: Unfallkostensätze für Unfälle in den betrachteten Arbeitsstellen längerer Dauer

8.2.4 Unfallraten und Unfallkostenraten

Für die betrachteten Arbeitsstellen längerer Dauer wurden jeweils die Unfallraten und Unfallkostenraten gemäß Kapitel 4.1.1 berechnet und daraus dann für die jeweiligen Teilkollektive die gewichteten mittleren Unfallraten und Unfallkostenraten ermittelt. In Tabelle 8-5 sind die mittleren Unfallraten und mittleren Unfallkostenraten für die 141 Arbeitsstellen längerer Dauer (gesamter Arbeitsstellenbereich zuzüglich jeweils 2 km Zu- und Nachlauf), zu denen Daten aller Unfälle (Kategorien 1-6) vorlagen (vgl. Bild 8-3), angegeben. Tabelle 8-6 enthält die mittleren Unfallraten und mittleren Unfallkostenraten für die Innenbereiche dieser 141 Arbeitsstellen. In den 141 Arbeitsstellen längerer Dauer sind insgesamt 4.792 Unfälle passiert, in den Innenbereichen dieser Arbeitsstellen 2.075 Unfälle. Bei den in Tabelle 8-5 und Tabelle 8-6 angegebenen mittleren Unfallraten und mittleren Unfallkostenraten handelt es sich um querschnittsbezogene Werte, die einen Vergleich mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen ermöglichen. Ein Vergleich mit den Ergebnissen von KEMPER et al. (2018) gemäß Tabelle 4-1 zeigt, dass sich für 3+1-, 4+0- und 4+2-Verkehrsführungen zwar die gleiche Rangreihung ergibt, aber sowohl die Absolutwerte als auch die Differenzen bei gleichem Preisstand doch teilweise deutlich voneinander abweichen (3+1: 10,9 €/1.000 Kfz · km gegenüber 9,3 €/1.000 Kfz · km; 4+0: 12,1 €/1.000 Kfz · km gegenüber 13,3 €/1.000 Kfz · km und 4+2: 17,0 €/1.000 Kfz · km gegenüber 15,2 €/1.000 Kfz · km). Dies mag zum einen an der zeitlichen Entwicklung und zum anderen an der nach Verkehrsführung differenzierten Anpassung der Unfallkostensätze bei KEMPER et al. (2018) liegen.

Verkehrsführung		n _A [-]	n _U [U]	UR _{A,M} [U/10 ⁶ Kfz · km]	UKR _{A,M} [€/1.000 Kfz · km]	
					Preisstand 2000	Preisstand 2010
ohne Überleitung	1+1	1	82	0,43	8,8	8,7
	2+1	2	12	0,13	6,9	7,9
	2+2	33	389	0,43	9,0	9,1
	3+2	6	37	0,39	9,7	10,2
	3+3	12	294	0,39	12,7	13,4
	4+3	1	102	1,02	12,4	10,3
mit Überleitung	2+0	12	246	0,66	12,1	11,8
	3+0	3	13	0,28	3,9	3,6
	3+1	10	253	0,55	10,9	10,9
	4+0	44	2.246	0,72	12,7	12,1
	4+1	1	41	0,74	15,0	15,7
	4+2	5	321	0,98	17,5	17,0
	5+0	6	215	0,72	15,0	15,5
	5+1	1	13	0,25	4,6	5,3
	6+0	2	467	0,85	16,2	16,6
	6+2	2	32	0,34	6,6	6,6

Tab. 8-5: Mittlere querschnittsbezogene Unfallraten und mittlere querschnittsbezogene Unfallkostenraten für den gesamten Arbeitsstellenbereich der 141 Arbeitsstellen längerer Dauer mit Unfällen der Kategorien 1-6 nach Verkehrsführung

Verkehrsführung		n _A [-]	n _U [U]	UR _{A,M} [U/10 ⁶ Kfz · km]	UKR _{A,M} [€/1.000 Kfz · km]	
					Preisstand 2000	Preisstand 2010
ohne Überleitung	1+1	1	19	0,69	8,7	7,6
	2+1	2	2	0,07	8,6	10,2
	2+2	33	142	0,51	10,3	10,2
	3+2	6	10	0,35	5,2	5,2
	3+3	12	120	0,62	12,5	12,5
	4+3	1	67	2,57	31,8	26,8
mit Überleitung	2+0	12	66	0,38	7,7	7,8
	3+0	3	1	0,09	1,0	0,6
	3+1	10	113	0,58	8,6	7,9
	4+0	44	1.257	0,87	12,9	11,3
	4+1	1	11	0,38	6,2	6,5
	4+2	5	179	0,96	16,5	16,1
	5+0	6	49	0,48	8,7	8,7
	5+1	1	4	0,72	11,3	11,8
	6+0	2	18	0,34	4,3	3,8
	6+2	2	9	0,26	2,8	1,9

Tab. 8-6: Mittlere querschnittsbezogene Unfallraten und mittlere querschnittsbezogene Unfallkostenraten für den Innenbereich der 141 Arbeitsstellen längerer Dauer mit Unfällen der Kategorien 1-6 nach Verkehrsführung

In Tabelle 8-7 bis Tabelle 8-10 sind die mittleren richtungsbezogenen Unfallraten und die mittleren richtungsbezogenen Unfallkostenraten für die einzelnen definierten Bereiche (Zulauf, Überleitung/Verschwenkung, Innenbereich, Rückleitung/Rückverschwenkung) in den betrachteten 141 Arbeitsstellen längerer Dauer angegeben. Differenziertere Angaben zum Unfallgeschehen nach Verkehrsführungen von Arbeitsstellen längerer Dauer und deren einzelnen Bereichen sind in Anhang C dargestellt.

Bei Arbeitsstellen mit 4+0-Verkehrsführung sind zwei Drittel auf vierstreifigen Autobahnen, ein Drittel auf fünf- bzw. sechsstreifigen Autobahnen, letztere jeweils zu einem gleichem Anteil. Somit sind in ein Viertel der Zuläufe zu diesen Arbeitsstellen Fahrstreifenreduktionen von drei auf zwei Fahrstreifen vorhanden. Dies wird bei der Ableitung der standardisierten Unfallkostenraten und Unfallraten in Kapitel 8.2.5 berücksichtigt.

Es zeigt sich, dass der Zulauf sowie die Verschwenkungen bzw. Überleitungen bei den meisten Verkehrsführungen die unsichersten Bereiche einer Arbeitsstelle längerer Dauer darstellen. Infolgedessen ist eine Arbeitsstelle bei ansonsten gleichen Randbedingungen bzgl. DTV, Verkehrsführung sowie Fahrstreifenbreite und zulässiger Höchstgeschwindigkeit im Innenbereich mit zunehmender Länge relativ gesehen sicherer, da der Einfluss des Innenbereichs mit niedrigeren Unfallkostenraten gegenüber dem Einfluss der übrigen Bereiche mit höheren Unfallkostenraten – und konstanten Längen – zunimmt. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass der überwiegende Teil der betrachteten Arbeitsstellen längerer Dauer (rund 85 %) kürzer als 10 km waren, weniger als 1 % der betrachteten Arbeitsstellen waren länger als 15 km.

Verkehrsführung		Fahrstreifenanzahl und -führung in der betrachteten Richtung	n _A [-]	n _U [U]	UR _{ARI,M} [U/10 ⁶ Kfz · km]	UKR _{ARI,M} [€/1.000 Kfz · km]
ohne Überleitung	1+1	1 Fahrstreifen	2	20	0,67	15,4
	2+1	1 Fahrstreifen	2	1	0,09	25,1
	2+2	2 Fahrstreifen	48	53	0,45	5,7
	3+2	2 Fahrstreifen	6	10	0,62	39,5
	3+3	3 Fahrstreifen	15	84	1,15	20,7
	4+3	3 Fahrstreifen	2	9	0,64	4,6
mit Überleitung	2+0	1 Fahrstreifen, ohne Überleitung	12	41	1,95	26,2
		1 Fahrstreifen, übergeleitet	12	34	1,40	14,5
	3+0	2 Fahrstreifen, ohne Überleitung	3	2	0,67	4,8
		1 Fahrstreifen, übergeleitet	3	2	0,48	12,4
	3+1	2 Fahrstreifen, ohne Überleitung	10	15	0,52	16,1
		2 Fahrstreifen, z. T. übergeleitet	10	28	1,11	10,8
	4+0	2 Fahrstreifen, ohne Überleitung	43	192	0,89	18,2
		2 Fahrstreifen, übergeleitet	43	166	1,11	19,3
	4+1	3 Fahrstreifen, ohne Überleitung	1	2	0,74	19,1
		2 Fahrstreifen, z. T. übergeleitet	1	4	1,82	158,1
	4+2	3 Fahrstreifen, ohne Überleitung	5	15	1,14	56,7
		3 Fahrstreifen, z. T. übergeleitet	5	29	2,16	42,0
	5+0	3 Fahrstreifen, ohne Überleitung	6	17	0,91	10,5
		2 Fahrstreifen, übergeleitet	6	63	2,56	57,9
	5+1	3 Fahrstreifen, ohne Überleitung	1	1	0,25	1,8
		3 Fahrstreifen, z. T. übergeleitet	0	–	–	–
	6+0	3 Fahrstreifen, ohne Überleitung	2	105	1,12	20,0
		3 Fahrstreifen, übergeleitet	2	132	1,30	34,1
	6+2	4 Fahrstreifen, ohne Überleitung	2	1	0,18	51,2
		4 Fahrstreifen, z. T. übergeleitet	2	2	0,36	2,5

Tab. 8-7: Mittlere richtungsbezogene Unfallraten und mittlere richtungsbezogene Unfallkostenraten für den Zulauf der 141 Arbeitsstellen längerer Dauer mit Unfällen der Kategorien 1-6 nach Verkehrsführung sowie Fahrstreifenanzahl und -führung in der betrachteten Richtung (Preisstand 2010)

Verkehrsführung		Fahrstreifenanzahl und -führung in der betrachteten Richtung	n _A [-]	n _U [U]	UR _{ARI,M} [U/10 ⁶ Kfz · km]	UKR _{ARI,M} [€/1.000 Kfz · km]
ohne Überleitung	1+1	1 Fahrstreifen	2	2	0,71	5,1
	2+1	1 Fahrstreifen	2	0	0	0
	2+2	2 Fahrstreifen	48	14	1,14	11,1
	3+2	2 Fahrstreifen	6	1	1,34	9,5
	3+3	3 Fahrstreifen	15	9	1,15	44,1
	4+3	3 Fahrstreifen	2	5	2,26	16,1
mit Überleitung	2+0	1 Fahrstreifen, ohne Überleitung	12	2	0,68	4,8
		1 Fahrstreifen, übergeleitet	12	9	2,83	31,8
	3+0	2 Fahrstreifen, ohne Überleitung	3	0	0	0
		1 Fahrstreifen, übergeleitet	3	0	0	0
	3+1	2 Fahrstreifen, ohne Überleitung	10	1	0,28	80,3
		2 Fahrstreifen, z. T. übergeleitet	10	10	2,52	36,6
	4+0	2 Fahrstreifen, ohne Überleitung	43	21	0,88	7,9
		2 Fahrstreifen, übergeleitet	43	76	2,96	39,3
	4+1	3 Fahrstreifen, ohne Überleitung	1	0	0	0
		2 Fahrstreifen, z. T. übergeleitet	1	1	2,48	17,7
	4+2	3 Fahrstreifen, ohne Überleitung	5	4	1,96	32,0
		3 Fahrstreifen, z. T. übergeleitet	5	10	5,31	57,5
	5+0	3 Fahrstreifen, ohne Überleitung	6	6	1,34	9,6
		2 Fahrstreifen, übergeleitet	6	9	2,46	17,6
	5+1	3 Fahrstreifen, ohne Überleitung	1	0	0	0
		3 Fahrstreifen, z. T. übergeleitet	0	–	–	–
	6+0	3 Fahrstreifen, ohne Überleitung	2	12	1,97	14,0
		3 Fahrstreifen, übergeleitet	2	12	1,88	13,4
	6+2	4 Fahrstreifen, ohne Überleitung	2	1	1,03	7,3
		4 Fahrstreifen, z. T. übergeleitet	2	2	2,07	53,2

Tab. 8-8: Mittlere richtungsbezogene Unfallraten und mittlere richtungsbezogene Unfallkostenraten für die Überleitung bzw. Verschwenkung der 141 Arbeitsstellen längerer Dauer mit Unfällen der Kategorien 1-6 nach Verkehrsführung sowie Fahrstreifenanzahl und -führung in der betrachteten Richtung (Preisstand 2010)

Verkehrsführung		Fahrschleifenanzahl und -führung in der betrachteten Richtung	n _A [-]	n _U [U]	UR _{ARI,M} [U/10 ⁶ Kfz · km]	UKR _{ARI,M} [€/1.000 Kfz · km]
ohne Überleitung	1+1	1 Fahrschleife	2	19	0,69	7,6
	2+1	1 Fahrschleife	2	2	0,15	22,0
	2+2	2 Fahrschleifen	48	125	0,58	12,3
	3+2	2 Fahrschleifen	6	6	0,45	6,0
	3+3	3 Fahrschleifen	15	80	0,65	8,4
	4+3	3 Fahrschleifen	2	67	2,57	26,8
mit Überleitung	2+0	1 Fahrschleife, ohne Überleitung	12	32	0,37	4,4
		1 Fahrschleife, übergeleitet	12	34	0,40	11,2
	3+0	2 Fahrschleifen, ohne Überleitung	3	1	0,18	1,3
		1 Fahrschleife, übergeleitet	3	0	0	0
	3+1	2 Fahrschleifen, ohne Überleitung	10	58	0,60	10,2
		2 Fahrschleifen, z. T. übergeleitet	10	55	0,56	5,5
	4+0	2 Fahrschleifen, ohne Überleitung	43	627	0,87	13,2
		2 Fahrschleifen, übergeleitet	43	626	0,88	9,7
	4+1	3 Fahrschleifen, ohne Überleitung	1	9	0,62	9,5
		2 Fahrschleifen, z. T. übergeleitet	1	2	0,14	3,5
	4+2	3 Fahrschleifen, ohne Überleitung	5	95	1,03	18,6
		3 Fahrschleifen, z. T. übergeleitet	5	84	0,89	13,7
	5+0	3 Fahrschleifen, ohne Überleitung	6	25	0,49	10,4
		2 Fahrschleifen, übergeleitet	6	24	0,47	7,0
	5+1	3 Fahrschleifen, ohne Überleitung	1	2	0,61	4,3
		3 Fahrschleifen, z. T. übergeleitet	0	–	–	–
	6+0	3 Fahrschleifen, ohne Überleitung	2	8	0,30	3,5
		3 Fahrschleifen, übergeleitet	2	10	0,38	4,1
	6+2	4 Fahrschleifen, ohne Überleitung	2	4	0,23	1,7
		4 Fahrschleifen, z. T. übergeleitet	2	5	0,29	2,1

Tab. 8-9: Mittlere richtungsbezogene Unfallraten und mittlere richtungsbezogene Unfallkostenraten für den Innenbereich der 141 Arbeitsstellen längerer Dauer mit Unfällen der Kategorien 1-6 nach Verkehrsführung sowie Fahrschleifenanzahl und -führung in der betrachteten Richtung (Preisstand 2010)

Verkehrsführung		Fahrstreifenanzahl und -führung in der betrachteten Richtung	n _A [-]	n _U [U]	UR _{ARI,M} [U/10 ⁶ Kfz · km]	UKR _{ARI,M} [€/1.000 Kfz · km]
ohne Überleitung	1+1	1 Fahrstreifen	2	0	– 1)	– 1)
	2+1	1 Fahrstreifen	2	0	0	0
	2+2	2 Fahrstreifen	48	9	0,79	30,3
	3+2	2 Fahrstreifen	6	1	1,77	12,6
	3+3	3 Fahrstreifen	15	2	0,36	9,1
	4+3	3 Fahrstreifen	2	1	0,75	5,3
mit Überleitung	2+0	1 Fahrstreifen, ohne Überleitung	12	1	0,36	2,6
		1 Fahrstreifen, übergeleitet	12	6	2,05	14,6
	3+0	2 Fahrstreifen, ohne Überleitung	3	0	0	0
		1 Fahrstreifen, übergeleitet	3	0	0	0
	3+1	2 Fahrstreifen, ohne Überleitung	10	3	0,78	5,6
		2 Fahrstreifen, z. T. übergeleitet	10	0	0	0
	4+0	2 Fahrstreifen, ohne Überleitung	43	19	0,74	17,6
		2 Fahrstreifen, übergeleitet	43	25	1,04	10,5
	4+1	3 Fahrstreifen, ohne Überleitung	1	0	0	0
		2 Fahrstreifen, z. T. übergeleitet	1	2	5,52	39,4
	4+2	3 Fahrstreifen, ohne Überleitung	5	7	3,85	27,4
		3 Fahrstreifen, z. T. übergeleitet	5	1	0,48	3,4
	5+0	3 Fahrstreifen, ohne Überleitung	6	2	0,54	3,9
		2 Fahrstreifen, übergeleitet	6	3	0,90	17,5
	5+1	3 Fahrstreifen, ohne Überleitung	1	0	0	0
		3 Fahrstreifen, z. T. übergeleitet	0	–	–	–
	6+0	3 Fahrstreifen, ohne Überleitung	2	12	1,89	25,1
		3 Fahrstreifen, übergeleitet	2	12	1,97	32,3
	6+2	4 Fahrstreifen, ohne Überleitung	2	1	1,03	7,4
		4 Fahrstreifen, z. T. übergeleitet	2	1	1,03	7,4

¹⁾ aufgrund fehlender Rückverschwenkung keine Berechnung von mittleren Unfallraten und Unfallkostenraten

Tab. 8-10: Mittlere richtungsbezogene Unfallraten und mittlere richtungsbezogene Unfallkostenraten für die Rückleitung bzw. Rückverschwenkung der 141 Arbeitsstellen längerer Dauer mit Unfällen der Kategorien 1-6 nach Verkehrsführung sowie Fahrstreifenanzahl und -führung in der betrachteten Richtung (Preisstand 2010)

8.2.5 Ableitung standardisierter Unfallkostenraten und Unfallraten

Auf Grundlage der in Kapitel 8.2.4 dargestellten Ergebnisse zu den mittleren richtungsbezogenen Unfallkostenraten und Unfallraten für die einzelnen definierten Bereiche wurden Vorschläge für standardisierte Unfallkostenraten und Unfallraten für die definierten Bereiche in Arbeitsstellen längerer Dauer abgeleitet. Dazu wurden zur Erhöhung der Datengrundlage die Ergebnisse aus den Untersuchungen von KEMPER et al. (2018) zu diesen Bereichen bei 3+1-, 4+0- und 4+2-Verkehrsführungen herangezogen. Die Vorschläge für standardisierte richtungsbezogene Unfallkostenraten und Unfallraten für den unbeeinflussten Verkehr bei 2+1-, 2+2-, 3+2-, 3+3-, 4+3- und 4+4-Verkehrsführungen wurden auf Basis der von BAIER et al. (2015) abgeleiteten Unfallkostenraten festgelegt, die wiederum auf den Ergebnissen von LEMKE (2007) basieren.

Die Ableitung der vorgeschlagenen standardisierten richtungsbezogenen Unfallkostenraten und Unfallraten für den beeinflussten Verkehr in den einzelnen Bereichen (Zulauf, Überleitung/Verschwenkung, Innenbereich, Rückleitung/Rückverschwenkung) erfolgte durch eine teilweise zusammenfassende Betrachtung von verschiedenen Verkehrsführungen, die im Hinblick auf ihre Gestaltung (z. B. Fahrstreifenanzahl im Innenbereich in einer betrachteten Richtung) – und damit den Verkehrsablauf und das Unfallgeschehen – als vergleichbar angesehen werden können. Dazu wurden jeweils die gewichten Mittelwerte der richtungsbezogenen Unfallkostenraten und Unfallraten innerhalb der Verkehrsführungskollektive gebildet. Nachfolgend ist die Ableitung der vorgeschlagenen standardisierten richtungsbezogenen Unfallkostenraten beispielhaft erläutert. (Tabelle 8-11 bis Tabelle 8-14). Die Vorschläge für die standardisierten richtungsbezogenen Unfallraten wurden analog hierzu abgeleitet.

Hierdurch wurden auch standardisierte richtungsbezogene Unfallkostenraten und Unfallraten zu Verkehrsführungen abgeleitet, zu denen nur eine geringe Datengrundlage zu Verfügung stand. Beispielsweise ist der zweistreifige Zulauf bei 2+2- sowie 3+0-, 3+1- und 4+0-Verkehrsführungen auf zweistreifigen Richtungsfahrbahnen in der nicht übergeleiteten Fahrtrichtung im Hinblick auf die Beschilderung gemäß den RSA bzgl. der Anordnung von Zeichen 274 StVO zur stufenweisen Reduzierung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit (Geschwindigkeitstrichter) und der Verkehrslenkungsstafeln (Zeichen 500 ff. StVO) identisch bzw. bestehende Unterschiede sind für den Verkehrsteilnehmer nicht erkennbar, sondern erst im weiteren Fahrtverlauf relevant, wie die konkrete Ausbildung der Verschwenkung, die dann gesondert betrachtet wird. Ebenso ist beispielsweise der Zulauf mit Fahrstreifenreduktion von zwei auf einen Fahrstreifen bei 1+1-, 2+1-, 2+0- und 3+0-Verkehrsführungen vergleichbar. Auch die zweistreifigen Innenbereiche von Arbeitsstellen mit 2+2- sowie 3+0-, 3+1- (nicht übergeleitete Fahrtrichtung) und 4+0-Verkehrsführungen (beide Fahrtrichtungen) wurden zusammengefasst betrachtet, da diese für den Verkehrsteilnehmer im Wesentlichen als eine Führung auf zwei Behelfsfahrstreifen wahrgenommen werden, unabhängig davon, wie der Gegenverkehr geführt wird oder abgetrennt ist.

Diese Überlegungen basieren u. a. auf den Erkenntnissen der Untersuchungen von FISCHER und BRANNOLTE (2006) sowie KEMPER et al. (2018), wonach Arbeitsstellen mit Gegenverkehrstrennung durch Leitschwellen nicht unsicherer sind als solche mit transportablen Schutzeinrichtungen. Unterschiede bestehen hier somit für den Verkehrsteilnehmer im Wesentlichen in unterschiedlichen Fahrstreifenbreiten, deren Auswirkungen gesondert durch Anpassungsfaktoren berücksichtigt werden.

In Tabelle 8-11 bis Tabelle 8-14 sind neben den Unfallkostenraten der einzelnen Verkehrsführungen auch die jeweils mit der Anzahl der Arbeitsstellen gewichten Mittelwerte der richtungsbezogenen Unfallkostenraten innerhalb der Verkehrsführungskollektive angegeben. Es zeigt sich, dass die Spannweite der Anzahl der Arbeitsstellen im jeweiligen Ver-

kehrsführungskollektiv sehr stark streut, mit den mit deutlichem Abstand höchsten Belegungen bei den Behelfsverkehrsführungen an zweistreifigen Richtungsfahrbahnen. Daher wurden Werte für Verkehrsführungen, die im betrachteten Kollektiv der 141 Arbeitsstellen nur in einem geringen Umfang oder gar nicht repräsentiert waren, anhand von Plausibilitätsüberlegungen und Analogieschlüssen gesetzt. Dies betrifft neben einzelnen Verkehrsführungen auf dreistreifigen Richtungsfahrbahnen insbesondere die Verkehrsführungen auf vierstreifigen Richtungsfahrbahnen. Die Plausibilitätsüberlegungen beziehen sich beispielsweise darauf, dass ein Zulauf mit Fahrstreifenreduktion als unsicherer eingeschätzt wird als ein Zulauf ohne eine Fahrstreifenreduktion. Die Analogieschlüsse beziehen sich im Wesentlichen auf die relativen Verhältnisse der Unfallkostenraten und Unfallraten einzelner Bereiche bzw. verschiedener Verkehrsführungen zueinander. Die für Verschwenkungen und Überleitungen vorgeschlagenen Unfallkostenraten und Unfallraten sind z. B. höher als diejenigen für Innenbereiche; die Unfallkostenraten und Unfallraten für Rückverschwenkungen und Rückleitungen geringer als die von Verschwenkungen und Überleitungen. Verschwenkungen (ohne Überleitung) werden als sicherer eingeschätzt als Überleitungen. Diese abgeleiteten Verhältnisse wurden dann auf diejenigen Verkehrsführungen übertragen, zu denen keine bzw. keine ausreichende Datengrundlage vorlag.

Insbesondere bei kleinen Kollektiven werden die Streuungen der einzelnen Unfallkostenraten und Unfallraten deutlich, die sich teilweise extrem auf die gewichtete mittlere Unfallkostenrate bzw. Unfallrate auswirken. Auch bei größeren Kollektiven bestehen durchaus Streuungen der einzelnen Unfallkostenraten und Unfallraten, diese wirken sich jedoch im Allgemeinen weniger stark auf die mittleren Werte aus. Aus diesem Grund sowie aufgrund der teilweise geringen Datengrundlage konnte ein Vielzahl von Unfallkostenraten und Unfallraten nicht auf Basis der empirischen Erkenntnisse oder der gewichteten Mittelwerte abgeleitet werden. Hier wurden Setzungen vorgenommen, die auf den zuvor erläuterten Plausibilitätsüberlegungen und Analogieschlüssen zu den relativen Verhältnisse der Unfallkostenraten und Unfallraten einzelner Bereiche und Verkehrsführungen zueinander beruhen.

Die vorgeschlagenen standardisierten Unfallkostenraten und Unfallraten werden nach der Verkehrsführung und der Anzahl der Fahrstreifen im Vorlauf zur Arbeitsstelle (vorhandene Richtungsfahrbahn) differenziert. Für die Innenbereiche wird zusätzlich eine Anpassung in Abhängigkeit von der Breite des Hauptfahrstreifens und des/der Überholfahrstreifen sowie teilweise in Abhängigkeit von der zulässigen Höchstgeschwindigkeit vorgeschlagen.

In Tabelle 8-11 sind für den Zulauf in Arbeitsstellen längerer Dauer die jeweils zusammenfassend betrachteten Verkehrsführungen und die hierfür vorgeschlagenen standardisierten richtungsbezogenen Unfallkostenraten angegeben. Zwei vorgeschlagene Standardwerte für einen Zulauf ohne Fahrstreifenreduktion auf einer zweistreifigen Richtungsfahrbahn wurden auf Basis der empirisch ermittelten Unfallkostenraten abgeleitet, ebenso der Standardwert für einen Zulauf mit Fahrstreifenreduktion auf einer dreistreifigen Richtungsfahrbahn mit anschließender Verschwenkung. Die übrigen Werte wurden unter folgenden Prämissen gesetzt:

- Unfallkostenraten im Zulauf mit Fahrstreifenreduktion sind höher als im Zulauf ohne Fahrstreifenreduktion,
- Unfallkostenraten nehmen mit der Fahrstreifenanzahl zu und
- Unfallkostenraten im Zulauf mit anschließender Überleitung sind höher als im Zulauf mit anschließender Verschwenkung.

Verkehrsführung im Zulauf					Empirie ¹⁾		Empirie aggregiert		Vorschlag Standardwert
Fahrstreifenreduktion	RFB	Fahrstreifenanzahl	anschließender Bereich	VF	n _{ARI} [-]	UKR _{ARI,M} [€/1.000 Kfz · km]	n _{ARI} [-]	UKR _{ARI,M} [€/1.000 Kfz · km]	UKR _{Zu} [€/1.000 Kfz · km]
ohne Fahrstreifenreduktion	zweistreifige RFB	2	Verschwenkung	2+2	48	5,7	90	11,4	12
				3+0	3	4,8			
				3+1	10	16,1			
				4+0	29	19,9			
			Verschwenkung/Überleitung	3+1	10	10,8	34	6,9	14
					24	5,3			
	Überleitung	4+0	29	16,4	117	15,0	16		
			88	14,5					
	dreistreifige RFB	3	Verschwenkung	3+3	15	20,7	30	23,9	21
				4+1	1	19,1			
				4+2	5	56,7			
				5+0	6	10,5			
				5+1	1	1,8			
				6+0	2	20,0			
			Verschwenkung/Überleitung	4+2	5	42,0	5	42,0	25
					5+1	0			
	Überleitung	6+0	2	34,1	2	34,1	28		
	vierstreifige RFB	4	Verschwenkung	4+4	0	–	2	51,2	26
				6+2	2	51,2			
			Verschwenkung/Überleitung	6+2	2	2,5	2	2,5	31
mit Fahrstreifenreduktion	zweistreifige RFB	2 → 1	Verschwenkung	1+1	2	15,4	16	24,7	20
				2+1	2	25,1			
				2+0	12	26,2			
			Überleitung	2+0	12	15,4	15	14,8	25
				3+0	3	12,4			
	dreistreifige RFB	3 → 2	Verschwenkung	3+2	6	39,5	20	28,2	28
				4+0	14	23,4			
			Verschwenkung/Überleitung	4+1	1	158,1	1	158,1	32
				Überleitung	4+0	14	16,3	20	28,8
			5+0		6	57,9			
vierstreifige RFB	4 → 3	Verschwenkung	4+3	2	4,6	2	4,6	32	

¹⁾ kursiv angegebene Werte aus Untersuchungen von KEMPER et al. (2018)

Tab. 8-11: Ableitung der standardisierten richtungsbezogenen Unfallkostenraten für den Zulauf in Arbeitsstellen längerer Dauer auf Basis der Unfallanalysen (Preisstand 2010)

In Tabelle 8-12 sind für die Verschwenkung bzw. Überleitung in Arbeitsstellen längerer Dauer die jeweils zusammenfassend betrachteten Verkehrsführungen und die hierfür vorgeschlagenen standardisierten richtungsbezogenen Unfallkostenraten angegeben. Verschwenkungen und Überleitungen werden nach der Fahrstreifenanzahl differenziert, unabhängig von der Ausbildung der Richtungsfahrbahnen. Die vorgeschlagenen Standardwerte für eine zweistreifige Verschwenkung und eine zweistreifige Überleitung sowie eine dreistreifige Verschwenkung wurden auf Basis der empirisch ermittelten Unfallkostenraten abgeleitet. Die übrigen Werte wurden unter folgenden Prämissen gesetzt:

- Unfallkostenraten nehmen mit der Fahrstreifenanzahl zu und
- Unfallkostenraten von Überleitungen höher sind als von Verschwenkungen.

Verkehrsführung in Verschwenkung bzw. Überleitung			Empirie ¹⁾		Empirie aggregiert		Vorschlag Standardwert	
Fahrstreifenanzahl	Ausbildung des Übergangs von Zulauf zu Innenbereich	VF	n _{ARI} [-]	UKR _{ARI,M} [€/1.000 Kfz · km]	n _{ARI} [-]	UKR _{ARI,M} [€/1.000 Kfz · km]	UKR _{V/Ü} [€/1.000 Kfz · km]	
1	Verschwenkung	1+1	2	5,1	16	4,2	9	
		2+1	2	0,0				
		2+0	12	4,8				
	Überleitung	2+0	12	31,8	15	25,4		
		3+0	3	0,0				
2	Verschwenkung	2+2	48	11,1	110	15,8	16	
		3+0	3	0,0				
		3+1	10	80,3				
		3+2	6	9,5				
		4+0	43	7,9				
	Verschwenkung/Überleitung (1/1)	3+1	10	36,6	35	25,1		
			24	20,6				
		4+1	1	17,7				
	Überleitung	4+0	43	39,3	137	22,2		
			88	14,2				
		5+0	6	17,6				
3	Verschwenkung	3+3	15	44,1	32	29,4	28	
		4+3	2	16,1				
		4+1	1	0,0				
		4+2	5	32,0				
		5+0	6	9,6				
		5+1	1	0,0				
		6+0	2	14,0				
	Verschwenkung/Überleitung (2/1)	4+2	5	57,5	19	24,5		
			14	12,7				
	Verschwenkung/Überleitung (1/2)	5+1	0	–	0	-		18
	Überleitung	6+0	2	13,4	2	13,4		38
4	Verschwenkung	4+4	0	–	2	7,3	35	
		6+2	2	7,3				
	Verschwenkung/Überleitung (2/2)	6+2	2	53,2	2	53,2		19

¹⁾ kursiv angegebene Werte aus Untersuchungen von KEMPER et al. (2018)

Tab. 8-12: Ableitung der standardisierten mittleren richtungsbezogenen Unfallkostenraten für die Verschwenkung bzw. Überleitung in Arbeitsstellen längerer Dauer auf Basis der Unfallanalysen (Preisstand 2010)

In Tabelle 8-13 sind für den Innenbereich in Arbeitsstellen längerer Dauer die jeweils zusammenfassend betrachteten Verkehrsführungen und die hierfür vorgeschlagenen standardisierten richtungsbezogenen Unfallkostenraten angegeben. Die Standardwerte für einen Fahrstreifen in der betrachteten Richtung sowie für zwei bzw. drei gemeinsam auf einer Richtungsfahrbahn geführte Fahrstreifen in der betrachteten Richtung wurden auf Basis der empirisch ermittelten Unfallkostenraten abgeleitet. Die Werte für zwei bzw. drei Fahrstreifen in der betrachteten Richtung, die nicht gemeinsam auf einer Richtungsfahr-

Verkehrsführung im Innenbereich		Empirie ¹⁾		Empirie aggregiert		Vorschlag Standardwert				
Fahrstreifenanzahl und -führung		VF	n _{ARI} [-]	UKR _{ARI,M} [€/1.000 Kfz · km]	n _{ARI} [-]	UKR _{ARI,M} [€/1.000 Kfz · km]	UKR _{In,B} ²⁾ [€/1.000 Kfz · km]			
1	ohne Überleitung	1+1	2	7,6	31	7,9	8			
		2+1	2	22,0						
	mit Überleitung, Fahrstreifen nicht übergeleitet	2+0	12	4,4						
	mit Überleitung, Fahrstreifen übergeleitet	2+0	12	11,2						
		3+0	3	0,0						
2	mit Überleitung, Fahrstreifen z. T. übergeleitet (1 von 2)	3+1	10	5,5	35	6,5	8			
			24	7,0						
		4+1	1	3,5						
	ohne Überleitung	2+2	48	12,3	359	12,6	12			
		3+2	6	6,0						
	mit Überleitung, Fahrstreifen nicht übergeleitet	3+0	3	1,3						
			3+1	10				10,2		
		4+0	24	13,0						
			43	13,2						
		mit Überleitung, Fahrstreifen übergeleitet	4+0	88				14,0		
				43				9,7		
	88	14,0								
	5+0	6	7,0							
3	mit Überleitung, Fahrstreifen z. T. übergeleitet (1 von 3)	4+2	5	13,7				19	15,6	11
			14	16,3						
	mit Überleitung, Fahrstreifen z. T. übergeleitet (2 von 3)	5+1	0	-						
	ohne Überleitung	3+3	15	8,4	48	14,0	14			
		4+3	2	26,8						
	mit Überleitung, Fahrstreifen nicht übergeleitet	4+1	1	9,5						
			4+2	5				18,6		
		5+0	14	22,1						
			6	10,4						
		5+1	1	4,3						
		6+0	2	3,5						
mit Überleitung, Fahrstreifen übergeleitet	6+0	2	4,1							
4	ohne Überleitung	4+4	0	-				2	1,7	16
	mit Überleitung, Fahrstreifen nicht übergeleitet	6+2	2	1,7						
	mit Überleitung, Fahrstreifen z. T. übergeleitet (2 von 4)	6+2	2	2,1	2	2,1	12			

¹⁾ kursiv angegebene Werte aus Untersuchungen von KEMPER et al. (2018)
²⁾ Basis-Unfallkostenrate für Fahrstreifenbreiten B_{HFS} ≥ 3,25 m (Hauptfahrstreifen) und 2,60 m ≤ B_{ÜFS} < 2,70 m (Überholfahrstreifen) bei V_{Zul} = 80 km/h

Tab. 8-13: Ableitung der standardisierten mittleren richtungsbezogenen Unfallkostenraten für den Innenbereich in Arbeitsstellen längerer Dauer auf Basis der Unfallanalysen (Preisstand 2010)

bahn geführt werden (Fahrbahnteilung), und die Werte für vier Fahrstreifen in der betrachteten Richtung wurden gesetzt (Prämisse: Unfallkostenraten nehmen mit der Fahrstreifenanzahl zu).

In Tabelle 8-14 sind für die Rückverschwenkung bzw. Rückleitung in Arbeitsstellen längerer Dauer die jeweils zusammenfassend betrachteten Verkehrsführungen und die hierfür vorgeschlagenen standardisierten richtungsbezogenen Unfallkostenraten angegeben. Die Standardwerte wurden gesetzt, da die empirischen Ergebnisse zum größten Teil unplausibel erschienen. Bei den Setzungen wurden dieselben Prämissen wie bei den Verschwenkungen und Überleitungen zugrundegelegt.

Verkehrsführung in Rückverschwenkung bzw. -leitung			Empirie		Empirie aggregiert		Vorschlag Standardwert
Fahrstreifenanzahl	Ausbildung des Übergangs von Innenbereich zu freier Strecke	VF	n _{ARI} [-]	UKR _{ARI,M} [€/1.000 Kfz·km]	n _{ARI} [-]	UKR _{ARI,M} [€/1.000 Kfz·km]	UKR _{V/Ü} [€/1.000 Kfz·km]
1	Rückverschwenkung	1+1	2	–	14	2,2	8
		2+1	2	0,0			
		2+0	12	2,6			
	Rückleitung	2+0	12	14,6	15	11,7	
		3+0	3	0,0			
2	Rückverschwenkung	2+2	48	30,3	110	21,3	14
		3+2	6	12,6			
		3+0	3	0,0			
		3+1	10	5,6			
		4+0	43	17,6			
	Rückverschwenkung/-leitung (1/1)	3+1	10	0,0	11	3,6	
		4+1	1	39,4			
	Rückleitung	4+0	43	10,5	49	11,4	
		5+0	6	17,5			
	3	Rückverschwenkung	3+3	15	9,1	32	
4+3			2	5,3			
4+1			1	0,0			
4+2			5	27,4			
5+0			6	3,9			
5+1			1	0,0			
6+0			2	25,1			
Rückverschwenkung/-leitung (2/1)		4+2	5	3,4	5	3,4	
Rückverschwenkung/-leitung (1/2)		5+1	0	–	0	–	
Rückleitung		6+0	2	32,3	2	32,3	
4	Rückverschwenkung	4+4	0	–	2	7,4	30
		6+2	2	7,4			
	Rückverschwenkung/-leitung (2/2)	6+2	2	7,4	2	7,4	

Tab. 8-14: Ableitung der standardisierten mittleren richtungsbezogenen Unfallkostenraten für die Rückverschwenkung bzw. Rückleitung in Arbeitsstellen längerer Dauer auf Basis der Unfallanalysen (Preisstand 2010)

Die in Tabelle 8-13 angegebenen Werte der vorgeschlagenen standardisierten Unfallkostenraten für den Innenbereich stellen eine Basis-Unfallkostenrate dar. Diese gilt für Breiten des Hauptfahrstreifens von mindestens 3,25 m und des/der Überholfahrstreifen von mehr als 2,60 m bis 2,70 m sowie bei einer Beschränkung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit auf 80 km/h. Bei abweichenden Fahrstreifenbreiten und/oder zulässiger Höchstgeschwin-

digkeit sind diese durch entsprechende Faktoren anzupassen. Dies gilt entsprechend für die Unfallraten.

Die Anpassungsfaktoren wurden auf Grundlage einer detaillierten Betrachtung des Unfallgeschehens in Innenbereichen abgeleitet. Dazu erfolgte zunächst eine Differenzierung der Innenbereiche der empirisch betrachteten Arbeitsstellen nach Fahrstreifenbreiten und zulässiger Höchstgeschwindigkeit (Tabelle 8-15, zu zwei Arbeitsstellen lagen keine entsprechenden Angaben vor). Dabei wurden die Differenzierungen der verschiedenen Breitenklassen der Behelfsfahrstreifen aus dem entwickelten Kapazitätsmodell für Arbeitsstellen längerer Dauer (vgl. Kapitel 5.1.5) übernommen, um eine einheitliche Eingangsgrößen zu gewährleisten. Es zeigte sich, dass nur für wenige Kombinationen aus Fahrstreifenbreiten und zulässiger Höchstgeschwindigkeit ausreichende Kollektive vorlagen. Außerdem streuen die Werte zwischen den einzelnen Arbeitsstellen sehr stark.

In Tabelle 8-15 sind die empirischen mittleren fahrtrichtungsbezogenen Unfallkostenraten im Innenbereich differenziert nach der Breite des Hauptfahrstreifens und des Überholfahrstreifens sowie der zulässigen Höchstgeschwindigkeit angegeben. Zwar führt die Beschränkung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit auf 60 km/h gegenüber 80 km/h in Summe sowohl für Breiten des Hauptfahrstreifens von weniger als auch mindestens 3,25 m zu einer Reduzierung der Unfallkostenraten. Allerdings zeigen sich absolut gesehen deutlich höhere Unfallkostenraten bei schmalen Hauptfahrstreifen von unter 3,25 m, und dieser Effekt wird durch die Beschränkung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit auf 60 km/h gegenüber 80 km/h nicht kompensiert.

Breite des Hauptfahrstreifens B_{HFS} [m]	Breite des Überholfahrstreifens $B_{ÜFS}$ [m]	$V_{zul} = 60$ km/h		$V_{zul} = 80$ km/h		$V_{zul} = 100$ km/h		alle	
		n_A [-]	UKR _{ARI,M} [€/1.000 Kfz·km]	n_A [-]	UKR _{ARI,M} [€/1.000 Kfz·km]	n_A [-]	UKR _{ARI,M} [€/1.000 Kfz·km]	n_A [-]	UKR _{ARI,M} [€/1.000 Kfz·km]
≥ 3,00 und < 3,25	≥ 2,50 und < 2,60	30	14,0	17	16,6	0	–	47	
	≥ 2,60 und < 2,75	1	2,0	2	10,5	0	–	3	
	≥ 2,75	0	–	0	–	0	–	0	–
	alle	31	13,3	19	15,9	0	–	50	14,3
≥ 3,25	≥ 2,50 und < 2,60	4	7,6	39	5,4	0	–	43	5,6
	≥ 2,60 und < 2,75	2	6,2	28	12,2	0	–	30	11,8
	≥ 2,75	6	4,1	41	8,9	3	10,8	50	8,4
	alle	12	5,6	108	8,5	3	10,8	123	8,3
alle	alle	43	11,2	127	9,6	3	10,8	173	10,0

Tab. 8-15: Anzahl und mittlere fahrtrichtungsbezogene Unfallkostenraten im Innenbereich nach Breite des Hauptfahrstreifens und zulässiger Höchstgeschwindigkeit (Preisstand 2010) der Arbeitsstellen längerer Dauer

Betrachtet man nur die Unfallkostenraten im Innenbereich bei Hauptfahrstreifenbreiten von mindestens 3,25 m differenziert nach der Breite des Überholfahrstreifens und der zulässigen Höchstgeschwindigkeit, zeigt sich, dass – zumindest bei einer Beschränkung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit auf 80 km/h (Regelfall) – sowohl bei schmaleren als auch breiteren Überholfahrstreifen die Unfallkostenraten geringer sind als bei Breiten des/der Überholfahrstreifen von mindestens 2,60 m bis 2,75 m.

Auf der Grundlage der in Tabelle 8-15 angegebenen empirischen mittleren Unfallkostenraten wurden Anpassungsfaktoren, differenziert für die verschiedenen Fahrstreifenbreiten und für von 80 km/h abweichende zulässige Höchstgeschwindigkeiten, abgeleitet. Anhand von Plausibilitätsüberlegungen erfolgte dabei in Bezug auf den Einfluss der Fahrstreifen-

breiten eine zusammenfassende Betrachtung der Innenbereiche mit zulässigen Höchstgeschwindigkeiten von 60 km/h und 80 km/h.

Es wurden Faktoren sowohl für die Anpassung der Basis-Unfallkostenraten als auch die Anpassung der Basis-Unfallraten vorgeschlagen (Kapitel 9.3). Dies ist darin begründet, dass bei gleicher Unfallstruktur – die innerhalb der verschiedenen differenzierten Innenbereiche jeweils unterstellt werden kann – der durchschnittliche Kostensatz für alle Unfälle identisch für alle entsprechenden Verkehrsführungen ist.

Aus Letzterem ergibt sich auch der Vorschlag, dass die in Kapitel 9.3.3 zur gesonderten Ermittlung der Anzahl der Unfälle mit Personenschaden beschriebenen Anteilsfaktoren für diese Unfälle nicht nach den einzelnen Verkehrsführungen differenziert sind, sondern lediglich nach den betrachteten Bereichen (Zulauf, Verschwenkung bzw. Überleitung, Innenbereich, Rückverschwenkung bzw. Rückleitung). Auch für Bereiche mit unbeeinflusstem Verkehr in Arbeitsstellen längerer Dauer sind diese Anteilsfaktoren dort nicht nach den Verkehrsführungen differenziert ermittelt worden.

Die Verkehrssicherheit in Arbeitsstellen längerer Dauer, ausgedrückt durch Unfallkostenraten und Unfallraten, ist von einer Vielzahl von Einflussgrößen abhängig. Neben der Einrichtungsdauer der Arbeitsstelle und den Längen der einzelnen Bereiche innerhalb einer Arbeitsstelle sowie dem DTV – diese Größen sind zur Berechnung der Unfallkosten und Unfallanzahl aus den standardisierten Unfallkostenraten bzw. Unfallraten erforderlich – sind dies vor allem die infrastrukturellen Randbedingungen. Eine Auflistung der möglichen Einflussgrößen ist in Kapitel 9.3.1 gegeben. Die vorgeschlagenen standardisierten Unfallkostenraten und Unfallraten sind jedoch nicht nach allen grundsätzlich möglichen Einflussgrößen differenziert, da hierzu aufgrund des empirisch betrachteten Kollektivs nicht alle Merkmale erfasst bzw. nur vereinzelt erfasst werden konnten oder aufgrund z. B. der zu kleinen Kollektivgröße keine Auswirkung auf die Unfallkostenraten und Unfallraten analysiert und bestimmt werden konnten. Der Einfluss dieser Merkmale war somit anhand des Untersuchungskollektivs nicht ermittelbar.

Die empfohlenen Berechnungsschritte für die Bewertung der Verkehrssicherheit in Kapitel 9.3 gehen von standardisierten Unfallkostenraten für Arbeitsstellen längerer Dauer sowie standardisierten Unfallraten jeweils differenziert nach den Verkehrsführungen und der Fahrstreifenanzahl in der betrachteten Richtung aus.

8.3 Arbeitsstellen kürzerer Dauer

8.3.1 Untersuchungsmethodik

Im Rahmen der Unfallanalyse wurde, wie in den Untersuchungen von KEMPER (2010) und KEMPER et al. (2012), der Zulaufbereich zur Arbeitsstelle auf einer Länge von 2 km bis zur fahrbaren Absperrtafel und der eigentliche Arbeitsstellenbereich hinter der fahrbaren Absperrtafel, in dem in der Regel eine Absperrung gegenüber den verbleibenden Fahrstreifen durch Leitkegel oder Leitbaken erfolgt, betrachtet. Dem definierten Zulaufbereich sowie dem eigentlichen Arbeitsstellenbereich wurden dann die im Zeitraum der Arbeitsstelle polizeilich registrierten Unfälle zugeordnet. Diese Zuordnung ist über die in den Unfalldaten enthaltenen Angaben (Datum, BAB-Nr., Kilometrierung, Fahrtrichtung) eindeutig möglich.

Die Unfalldaten wurden in einer Unfalldatenbank aufbereitet, die mit der Arbeitsstellendatenbank verknüpft wurde. Auf dieser Grundlage konnten dann alle erforderlichen Analysen zur Ermittlung der Unfallkenngrößen durchgeführt werden. Dabei erfolgte aufgrund der

von KEMPER (2010) wie auch KEMPER et al. (2012) gewonnenen Erkenntnisse auch eine Unterscheidung von Tages- und Nachtbaustellen.

Zunächst erfolgte eine Analyse der Unfall- und der Verunglücktenstruktur. Darauf aufbauend wurden die Unfallkosten ermittelt. Da keine ausreichend großen Kollektive von Unfällen mit Personenschaden (Kategorien 1-3) vorlagen, wurden pauschale Unfallkostensätze angesetzt (siehe Kapitel 8.3.3.).

Im Ergebnis wurden differenzierte Unfallkostenraten für alle relevanten Verkehrsführungen von Arbeitsstellen kürzerer Dauer bereitgestellt. Diese wurden gemäß Kapitel 4.1.1 berechnet. Die ermittelten Unfallkostenraten ermöglichen eine praxistaugliche Bewertung der zu erwartenden Auswirkungen verschiedener Verkehrsführungen von Arbeitsstellen kürzerer Dauer, unterschieden nach der Anzahl der vorhandenen Fahrstreifen der Richtungsfahrbahn (Arbeitsstellen mit Absicherung nach Regelplänen gemäß den RSA (1995 bzw. Entwurf 2012) auf zwei-, drei- und vierstreifigen Richtungsfahrbahnen).

Zusätzlich zu den Unfallkostenraten wurden auch jeweils die Unfallraten bestimmt. Diese können als Kenngröße der Häufigkeit von unfallbedingten Störungen des Verkehrsablaufs herangezogen werden. Die Berechnung erfolgte ebenfalls gemäß Kapitel 4.1.1.

8.3.2 Untersuchungskollektiv

Im Gegensatz zu Arbeitsstellen längerer Dauer besteht für die Bundesländer keine Meldepflicht der Arbeitsstellen kürzerer Dauer an das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Weiter unterscheidet sich auch der Planungsablauf dieser Arbeitsstellen sowie die Archivierung arbeitsstellenbezogener Daten zwischen den einzelnen Bundesländern, da diese nach internen Regelungen vorgenommen werden. Entsprechende Datenbanken werden u. a. von den Straßenbauverwaltungen in Bayern, Hessen und Nordrhein-Westfalen geführt und vorgehalten. Diese Datenbanken enthalten alle relevanten Angaben zu stationären Arbeitsstellen kürzerer Dauer wie beispielsweise die BAB-Nr., die Fahrtrichtung, den Betriebs-km des Arbeitsstellenbeginns (Standort der fahrbaren Absperrtafel) und die Länge der Arbeitsstelle, den Einrichtungszeitraum mit Datum und Uhrzeit sowie die Verkehrsführung. Derartige vollständige Angaben für Wanderbaustellen, deren Einrichtungsart und -dauer nicht exakt bestimmt bzw. festgehalten werden kann, liegen nicht vor.

Zur Analyse der Einflüsse einer Arbeitsstelle kürzerer Dauer auf die Verkehrssicherheit erfolgte neben der Abfrage der Datenbanken der Länder auch eine Bestandsaufnahme der Ländererlasse sowie der eingesetzten Regelpläne, um repräsentative Verkehrsführungen zu identifizieren. Zur Betrachtung entsprechend großer und repräsentativer Teilkollektive der relevanten Verkehrsführungen wurden Arbeitsstellen kürzerer Dauer aus den Jahren 2009 bis 2012 in Nordrhein-Westfalen sowie aus dem Jahr 2012 in Hessen berücksichtigt. Für alle anderen Länder lagen entweder keine ausreichend genauen Unfallkollektive vor oder die gemeldeten Arbeitsstellendaten waren nicht eindeutig genug.

Zu den Arbeitsstellen sind beispielsweise in der Datenbank des Landesbetriebs Straßenbau Nordrhein-Westfalen u. a. jeweils die Autobahn, die Fahrtrichtung, der Betriebs-km des Arbeitsstellenbeginns (Standort der fahrbaren Absperrtafel) und die Länge der Arbeitsstelle, der Einrichtungszeitraum mit Datum und Uhrzeit sowie die Verkehrsführung angegeben. Des Weiteren ist der Grund der Arbeitsstelle (z. B. Markierungsarbeiten, Gehölzpflege, ...) angegeben. Aufgrund der eindeutigen Zuordnung dieser Meldungen hinsichtlich der verwendeten Verkehrsführung und der Anzahl der vorhandenen Fahrstreifen standen hier alle erforderlichen Angaben vollständig zur Verfügung. Die Arbeitsstellenmeldungen aus Hessen wurden in die Struktur der Daten aus Nordrhein-Westfalen überführt.

Im Rahmen der Unfallanalyse wurden nur diejenigen Arbeitsstellen betrachtet,

- die ausschließlich bei Tageshelligkeit (Tagesbaustellen) oder bei Dunkelheit (Nachtbaustellen) eingerichtet waren und
- deren gemeldete Länge maximal 3 km betrug.

Die Zuordnung zu Tages- und Nachtbaustellen erfolgte anhand der Uhrzeit, differenziert nach Jahreszeiten. Als Tagesbaustellen wurden diejenigen definiert, deren Einrichtungszeitraum im Frühjahr/Sommer (von April bis September) zwischen 6 und 21 Uhr und im Herbst/Winter (von Oktober bis März) zwischen 8 und 18 Uhr lag. Nachtbaustellen sind dementsprechend diejenigen zwischen 21 und 6 Uhr (Frühjahr/Sommer) bzw. zwischen 18 und 8 Uhr (Herbst/Winter). Arbeitsstellen, deren Einrichtungszeitraum teilweise in beiden Zeitbereichen lag, z. B. im Frühjahr/Sommer (von April bis September) von 19 bis 23 Uhr, wurden von den Betrachtungen ausgenommen.

Die Begrenzung auf eine maximal gemeldete Länge von 3 km erfolgte, da bei größeren Längen nicht ausgeschlossen werden kann, dass es sich um Arbeitsstellen handelt, bei denen der Standort der fahrbaren Absperrtafel sukzessive während der Einrichtungszeit innerhalb des angegebenen Abschnitts verändert wurde (temporär stationäre Arbeitsstellen). Oftmals handelt es sich dabei um Tätigkeiten wie Bankett fräsen oder Leitpfostenreinigung, bei denen eine solche Vorgehensweise durchaus üblich ist. Wie die Untersuchungen von KEMPER et al. (2012) gezeigt haben, wurden bei Arbeitsstellen mit Längen von maximal 3 km solche Tätigkeiten nicht durchgeführt, sodass hier von über den gesamten Einrichtungszeitraum stationären Arbeitsstellen ausgegangen werden kann, bei denen der Standort der fahrbaren Absperrtafel nicht verändert wurde. Hierdurch kann von einer hinreichenden Genauigkeit ausgegangen werden.

Die exakte Position der Absperrung und die tatsächliche Dauer einer Arbeitsstelle kürzerer Dauer können zwar mit den Angaben aus den Datenbanken nicht bestimmt werden, da die angegebenen Zeitfenster lediglich die geplanten bzw. genehmigten Zeitfenster darstellen. Dennoch wird hier u. a. aufgrund des sehr geringen Unfallgeschehens in Arbeitsstellen kürzerer Dauer (vgl. KEMPER et al., 2012) von einer hinreichenden Genauigkeit ausgegangen.

Darüber hinaus sind die Angaben in den Arbeitsstellendatenbanken zur Länge der Arbeitsstelle – anders als der Standort der fahrbaren Absperrtafel (Betriebs-km) – teilweise ungenau oder unvollständig. Bei Arbeitsstellen, zu denen keine Längenangabe, sondern nur die Angabe zum Standort der fahrbaren Absperrtafel vorlag, wurde deshalb für den eigentlichen Arbeitsstellenbereich eine Länge von pauschal 50 m angesetzt, auch um eine Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen von KEMPER et al. (2012) bzw. die Einbeziehung dieser zur Erweiterung des Datenkollektivs zu ermöglichen.

Teilweise waren auch Arbeitsstellen mit identischem Einrichtungszeitraum und -ort, aber verschiedenen Verkehrsführungen (z. B. eine Arbeitsstelle mit Sperrung des Hauptfahrstreifens und die zweite Arbeitsstelle mit Sperrung des Überholfahrstreifens) gemeldet. In diesen Fällen ist nachträglich nicht mehr ermittelbar, wann innerhalb des angegebenen Einrichtungszeitraums der rechte und wann der linke Fahrstreifen gesperrt war. Arbeitsstellen mit solchen zeitlich-räumlichen Überschneidungen wurden deshalb von den Betrachtungen ausgenommen. Arbeitsstellen mit einer Dauer unter einer Stunde wurden ebenfalls von den Betrachtungen ausgenommen.

Als letztes Prüfkriterium wurden die gemeldeten Arbeitsstellendaten mit den BAB-Kilometrierungen abgeglichen. Teilweise sind BAB-km doppelt vergeben, sodass entsprechende

Arbeitsstellen nicht eindeutig einem Autobahnabschnitt zuzuordnen sind. Diese Arbeitsstellen wurden daher von den Betrachtungen ausgenommen.

Um Unfallkenngrößen für Arbeitsstellen kürzerer Dauer ermitteln zu können, müssen – wie bei Arbeitsstellen längerer Dauer – Daten zur Anzahl und Schwere der Unfälle vorliegen bzw. vollständig bekannt sein. Ebenso ist es erforderlich, dass das Gesamtunfallgeschehen (Kategorien 1-6) zu Grunde gelegt wird.

Die Untersuchungen von KEMPER (2010) und KEMPER et al. (2012) zum Unfallgeschehen in Arbeitsstellen kürzerer Dauer im Zuständigkeitsbereich der Autobahnpolizeien Köln (in den Jahren 2002 bis 2005) haben gezeigt, dass die Anzahl der Unfälle in Arbeitsstellen kürzerer Dauer bezogen auf die Anzahl eingerichteter Arbeitsstellen sehr gering ist. So sind in den rund 5.800 Arbeitsstellen kürzerer Dauer mit Sperrung mindestens eines Fahrstreifens, die von KEMPER et al. (2012) betrachtet wurden, nur etwa 220 Unfälle aufgetreten. Betrachtet wurden hierbei jeweils nur die Zulaufbereiche vor der Fahrstreifensperrung auf einer Länge von 2 km. Um ein ausreichend großes Unfallkollektiv berücksichtigen zu können, ist es somit erforderlich, eine entsprechend hohe Anzahl von Arbeitsstellen kürzerer Dauer in die Unfallanalyse einzubeziehen. Hierdurch wird die sich aus der Verwendung der Datenbanken der Straßenbauverwaltungen der Länder ergebende Unschärfe hinsichtlich des genauen Ortes und Zeitraums der Arbeitsstellen kürzerer Dauer (es lagen lediglich Angaben zu geplanten Arbeitsstellen vor) kompensiert. Es kann somit von einer hinreichenden Genauigkeit der Ergebnisse ausgegangen werden.

Die Datengrundlage zur Untersuchung der Verkehrssicherheit in stationären Arbeitsstellen kürzerer Dauer basiert auf den Unfalldaten der Straßenbauverwaltungen. In Hessen liegen beispielsweise die erforderlichen Unfalldaten in elektronischer Form vor, in Nordrhein-Westfalen sind diese Daten zumindest für die Zuständigkeitsbereiche der Autobahnpolizeien Köln und Düsseldorf vorhanden. Die inzwischen verfügbare Datengenauigkeit und -struktur ermöglichen eine eindeutige Zuordnung der Unfälle zu den einzelnen stationären Arbeitsstellen kürzerer Dauer.

Das Unfallkollektiv enthält neben den Unfällen mit Personenschaden (Kategorien 1-3) und den schwerwiegenden Unfällen mit Sachschaden i. e. S. (Kategorie 4) einschließlich der übrigen Unfälle mit Alkoholeinwirkung (Kategorie 6) auch die sonstigen Unfälle mit Sachschaden (Kategorie 5). Zu diesen Unfällen sind jeweils alle relevanten Merkmale angegeben: Unfalldatum und -uhrzeit sowie der Unfallort (auf Autobahnen über den Betriebs-km und die Fahrtrichtung), die Unfallkategorie, die Anzahl der Verunglückten nach Verletzungsschwere (bei Unfällen mit Personenschaden) und der Unfalltyp, aber auch die Unfallart und die Unfallursachen.

Insgesamt wurden in die Unfallanalyse 20.745 Arbeitsstellen kürzerer Dauer einbezogen, davon 16.991 Tagesbaustellen und 3.754 Nachtbaustellen. In Tabelle 8-16 sind die Tagesbaustellen differenziert nach den Verkehrsführungen sowie die jeweiligen Unfälle im pauschal mit 2 km Länge angesetzten Zulaufbereich sowie im eigentlichen Arbeitsstellenbereich angegeben, in Tabelle 8-17 die Nachtbaustellen und die jeweiligen Unfälle. Bei 42 Tagesbaustellen und 107 Nachtbaustellen lag eine Vollsperrung vor; diese Arbeitsstellen kürzerer Dauer wurden nicht weiter betrachtet. In den verbleibenden 16.949 Tagesbaustellen sind im Zulaufbereich 171 Unfälle passiert, im Arbeitsstellenbereich 64 Unfälle (Tabelle 8-16). In den verbleibenden 3.647 Nachtbaustellen sind im Zulaufbereich 28 Unfälle passiert, im Arbeitsstellenbereich 12 Unfälle (Tabelle 8-17). Von den insgesamt 199 Unfällen im Zulaufbereich sind nur 52 Unfälle mit Personenschaden, davon ein Unfall mit Getöteten. Dies sind rund 25 % aller Unfälle im Zulaufbereich von Tages- und Nachtbaustellen.

Von den insgesamt 76 Unfällen im eigentlichen Arbeitsstellenbereich sind 16 Unfälle mit Personenschaden, davon kein Unfall mit Getöteten. Dies sind knapp 20 % aller Unfälle im Arbeitsstellenbereich von Tages- und Nachtbaustellen.

Verkehrsführung			Anzahl der Arbeitsstellen	Anzahl der Unfälle	
RFB	Bezeichnung	Beschreibung		Zulaufbereich	Arbeitsstellenbereich
zwei-streifig	2VF0	Sperrung Seitenstreifen ohne Einengung der Fahrstreifen	549	5	1
	2VF1	Sperrung Seitenstreifen mit Einengung der Fahrstreifen	1.473	14	5
	2VF2	Sperrung Überholfahrstreifen	2.765	19	7
	2VF3	Sperrung Überholfahrstreifen mit Freigabe Seitenstreifen	777	6	2
	2VF4	Sperrung Hauptfahrstreifen	3.030	41	15
	2VF10	Sperrung aller Fahrstreifen und Freigabe Seitenstreifen	26	0	0
	2VFF	Vollsperrung	11	– 1)	– 1)
drei-streifig	3VF0	Sperrung Seitenstreifen ohne Einengung der Fahrstreifen	1.283	18	5
	3VF5	Sperrung 2. Überholfahrstreifen	2.723	18	6
	3VF6	Sperrung 1. und 2. Überholfahrstreifen	327	3	1
	3VF7	Sperrung 1. und 2. Überholfahrstreifen mit Freigabe Seitenstreifen	166	3	0
	3VF8	Sperrung Hauptfahrstreifen	3.164	34	17
	3VF9	Sperrung Hauptfahrstreifen und 1. Überholfahrstreifen	440	6	1
	3VF11	Sperrung aller Fahrstreifen und Freigabe Seitenstreifen	3	0	0
	3VFF	Vollsperrung	25	– 1)	– 1)
vier-streifig	4VF0	Sperrung Seitenstreifen ohne Einengung der Fahrstreifen	115	2	2
	4VF12	Sperrung 2. Überholfahrstreifen	15	0	1
	4VF13	Sperrung Hauptfahrstreifen	68	1	1
	4VF14	Sperrung 2. und 3. Überholfahrstreifen	0	–	–
	4VF15	Sperrung Hauptfahrstreifen und 1. Überholfahrstreifen	21	1	0
	4VF16	Sperrung 1. bis 3. Überholfahrstreifen	4	0	0
	4VF17	Sperrung 1. bis 3. Überholfahrstreifen mit Freigabe Seitenstreifen	0	–	–
	4VFF	Vollsperrung	6	– 1)	– 1)

¹⁾ aufgrund der Vollsperrung keine Unfälle

Tab. 8-16: Anzahl der betrachteten Tagesbaustellen nach Verkehrsführungen und Anzahl der Unfälle im Zulauf- und Arbeitsstellenbereich

Verkehrsführung			Anzahl der Arbeitsstellen	Anzahl der Unfälle	
RFB	Bezeichnung	Beschreibung		Zulaufbereich	Arbeitsstellenbereich
zwei-streifig	2VF0	Sperrung Seitenstreifen ohne Einengung der Fahrstreifen	11	0	0
	2VF1	Sperrung Seitenstreifen mit Einengung der Fahrstreifen	376	1	0
	2VF2	Sperrung Überholfahrstreifen	493	2	1
	2VF3	Sperrung Überholfahrstreifen mit Freigabe Seitenstreifen	6	0	0
	2VF4	Sperrung Hauptfahrstreifen	1.027	9	6
	2VF10	Sperrung aller Fahrstreifen und Freigabe Seitenstreifen	16	0	0
	2VFFV	Vollsperrung	91	– 1)	– 1)
drei-streifig	3VF0	Sperrung Seitenstreifen ohne Einengung der Fahrstreifen	52	0	0
	3VF5	Sperrung 2. Überholfahrstreifen	163	3	0
	3VF6	Sperrung 1. und 2. Überholfahrstreifen	492	3	1
	3VF7	Sperrung 1. und 2. Überholfahrstreifen mit Freigabe Seitenstreifen	7	0	0
	3VF8	Sperrung Hauptfahrstreifen	558	3	2
	3VF9	Sperrung Hauptfahrstreifen und 1. Überholfahrstreifen	381	7	2
	3VF11	Sperrung aller Fahrstreifen und Freigabe Seitenstreifen	1	0	0
	3VFFV	Vollsperrung	14	– 1)	– 1)
vier-streifig	4VF0	Sperrung Seitenstreifen ohne Einengung der Fahrstreifen	6	0	0
	4VF12	Sperrung 2. Überholfahrstreifen	3	0	0
	4VF13	Sperrung Hauptfahrstreifen	9	0	0
	4VF14	Sperrung 2. und 3. Überholfahrstreifen	3	0	0
	4VF15	Sperrung Hauptfahrstreifen und 1. Überholfahrstreifen	36	0	0
	4VF16	Sperrung 1. bis 3. Überholfahrstreifen	6	0	0
	4VF17	Sperrung 1. bis 3. Überholfahrstreifen mit Freigabe Seitenstreifen	1	0	0
	4VFFV	Vollsperrung	2	– 1)	– 1)

¹⁾ aufgrund der Vollsperrung keine Unfälle

Tab. 8-17: Anzahl der betrachteten Nachtbaustellen nach Verkehrsführungen und Anzahl der Unfälle im Zulauf- und Arbeitsstellenbereich

8.3.3 Ergebnisse

Für die betrachteten Arbeitsstellen kürzerer Dauer wurden jeweils die einzelnen Unfallraten und Unfallkostenraten berechnet und daraus dann für die jeweiligen Teilkollektive die mit der Fahrleistung gewichteten mittleren Unfallraten und Unfallkostenraten ermittelt. Die nur sehr geringe Anzahl an Unfällen mit Personenschaden (Kategorien 1-3) erlaubt zur Berechnung der Unfallkosten jeder Arbeitsstelle nur die Verwendung pauschaler, d. h. durchschnittlicher Unfallkostensätze für Unfälle auf Autobahnen insgesamt. Dabei wurden sowohl die Kostensätze für den Preisstand 2000 – zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit den Ergebnissen von KEMPER et al. (2012) – als auch die aktuellen Kostensätze für den Preisstand 2010 zu Grunde gelegt (Tabelle 8-18).

In Tabelle 8-19 sind die mittleren Unfallraten und Unfallkostenraten für die betrachteten Tagesbaustellen, in Tabelle 8-20 die mittleren Unfallraten und Unfallkostenraten für die betrachteten Nachtbaustellen angegeben. Bei der Berechnung der Unfallkostenraten wurden die nach den einzelnen Unfallkategorien differenzierten Kostensätze aus Tabelle 8-18 verwendet. Aufgrund der teilweise sehr geringen Anzahl von Arbeitsstellen einzelner Ver-

kehrsführungen sowie des geringen Unfallgeschehens ist nicht für alle Verkehrsführungen eine Ableitung gesicherter mittlerer Unfallraten und Unfallkostenraten möglich. Die berechneten Unfallraten und Unfallkostenraten sind deshalb nur eingeschränkt verwendbar. Differenziertere Angaben zum Unfallgeschehen nach Verkehrsführungen von Arbeitsstellen kürzerer Dauer sind in Anhang D dargestellt.

Unfallkategorie	KS _U [€/U]	
	Preisstand 2000	Preisstand 2010
Kategorie 1+2: U(SP)	300.000	340.878
Kategorie 3: U(LV)	31.000	43.592
Kategorie 1-3: U(P)	105.000	111.523
Kategorie 4+6: U(SS)	18.500	24.130
Kategorie 5: U(LS)	8.000	4.950
Kategorie 4-6: U(S)	10.500	7.129

Tab. 8-18: Unfallkostensätze für Unfälle in den betrachteten Arbeitsstellen kürzerer Dauer (entsprechen pauschalen durchschnittlichen Kostensätzen für Unfälle auf Autobahnen insgesamt)

Verkehrsführung		Anzahl der Arbeits- stellen	Zulaufbereich			Arbeitsstellenbereich		
RFB	Bezeich- nung		UR _{A,M} [U/10 ⁶ Kfz · km]	UKR _{A,M} [€/1.000 Kfz · km]		UR _{A,M} [U/10 ⁶ Kfz · km]	UKR _{A,M} [€/1.000 Kfz · km]	
		Preisstand 2000		Preisstand 2010	Preisstand 2000		Preisstand 2010	
zwei- streifig	2VF0	549	0,20	13,4	14,6	0,13	1,0	0,6
	2VF1	1.473	0,26	14,0	15,5	1,96	15,7	9,7
	2VF2	2.765	0,32	18,7	21,0	0,22	3,2	3,5
	2VF3	777	0,31	3,7	3,6	0,25	4,8	6,0
	2VF4	3.030	0,67	29,3	33,6	0,50	17,7	20,3
	2VF10	26	0,00	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0
drei- streifig	3VF0	1.283	0,32	8,8	9,3	0,32	2,6	1,6
	3VF5	2.723	0,20	6,3	7,1	0,13	2,0	2,3
	3VF6	327	0,63	9,8	11,2	0,33	2,7	1,6
	3VF7	166	0,73	11,0	13,0	0,00	0,0	0,0
	3VF8	3.164	0,34	6,9	7,2	0,38	10,7	11,2
	3VF9	440	0,59	37,0	42,0	0,33	10,1	14,2
	3VF11	3	– 1)	– 1)	– 1)	– 1)	– 1)	– 1)
vier- streifig	4VF0	115	0,23	4,4	5,5	0,67	13,2	16,4
	4VF12	15	0,00	0,0	0,0	2,06	16,5	10,2
	4VF13	68	0,37	3,0	1,8	1,04	8,3	5,2
	4VF15	21	1,65	51,0	71,8	0,00	0,0	0,0
	4VF16	4	– 1)	– 1)	– 1)	– 1)	– 1)	– 1)

¹⁾ aufgrund der geringen Anzahl von Arbeitsstellen keine Berechnung von mittleren Unfallraten und Unfallkostenraten

Tab. 8-19: Mittlere Unfallraten und mittlere Unfallkostenraten für die betrachteten Tagesbaustellen nach Verkehrsführungen

Verkehrsführung		Anzahl der Arbeitsstellen	Zulaufbereich			Arbeitsstellenbereich		
			UR _{A,M} [U/10 ⁶ Kfz · km]	UKR _{A,M} [€/1.000 Kfz · km]		UR _{A,M} [U/10 ⁶ Kfz · km]	UKR _{A,M} [€/1.000 Kfz · km]	
RFB	Bezeichnung	Preisstand 2000		Preisstand 2010	Preisstand 2000		Preisstand 2010	
zwei-streifig	2VF0	11	– 1)	– 1)	– 1)	– 1)	– 1)	– 1)
	2VF1	376	0,47	14,4	20,3	0,00	0,0	0,0
	2VF2	493	0,85	16,6	20,6	0,81	25,1	35,3
	2VF3	6	– 1)	– 1)	– 1)	– 1)	– 1)	– 1)
	2VF4	1.028	1,54	19,9	20,9	2,18	25,1	24,7
	2VF10	16	0,00	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0
drei-streifig	3VF0	52	0,00	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0
	3VF5	163	2,27	26,2	25,8	0,00	0,0	0,0
	3VF6	492	1,15	18,0	20,4	0,86	15,9	20,8
	3VF7	7	– 1)	– 1)	– 1)	– 1)	– 1)	– 1)
	3VF8	558	0,60	4,8	3,0	1,12	9,0	5,6
	3VF9	381	3,30	42,1	43,5	1,76	14,1	8,7
	3VF11	1	– 1)	– 1)	– 1)	– 1)	– 1)	– 1)
vier-streifig	4VF0	6	– 1)	– 1)	– 1)	– 1)	– 1)	– 1)
	4VF12	3	– 1)	– 1)	– 1)	– 1)	– 1)	– 1)
	4VF13	9	– 1)	– 1)	– 1)	– 1)	– 1)	– 1)
	4VF14	3	– 1)	– 1)	– 1)	– 1)	– 1)	– 1)
	4VF15	36	0,00	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0
	4VF16	6	– 1)	– 1)	– 1)	– 1)	– 1)	– 1)
	4VF17	1	– 1)	– 1)	– 1)	– 1)	– 1)	– 1)

¹⁾ aufgrund der geringen Anzahl von Arbeitsstellen keine Berechnung von mittleren Unfallraten und Unfallkostenraten

Tab. 8-20: Mittlere Unfallraten und mittlere Unfallkostenraten für die betrachteten Nachtbaustellen nach Verkehrsführungen

8.3.4 Ableitung standardisierter Unfallkostenraten und Unfallraten

Auf Grundlage der in Ziffer 8.3.3 dargestellten Ergebnisse zu den mittleren richtungsbezogenen Unfallkostenraten für die Zulauf- und Arbeitsstellenbereiche von Arbeitsstellen kürzerer Dauer wurden – unter Hinzuziehung der Ergebnisse aus den Untersuchungen von KEMPER et al. (2012) bei Arbeitsstellen mit Sperrung mindestens eines Fahrstreifens auf zwei- und dreistreifigen Richtungsfahrbahnen – standardisierte Unfallkostenraten abgeleitet. Diese Ableitung erfolgte durch eine teilweise zusammenfassende Betrachtung von einzelnen Verkehrsführungen, die im Hinblick auf ihre Gestaltung – und damit den Verkehrsablauf und das Unfallgeschehen – als vergleichbar angesehen werden, sowie anhand von Plausibilitätsüberlegungen und Analogieschlüssen. Zusammengefasst betrachtet wurden beispielsweise für den Zulaufbereich jeweils alle Verkehrsführungen, die entweder identisch sind oder von den Verkehrsteilnehmern aufgrund ihrer Beschilderung als gleich angesehen werden. Dies sind z. B. Verkehrsführungen ohne Fahrstreifenreduktion, Verkehrsführungen mit Einziehung des Überholfahrstreifens oder Verkehrsführungen mit Einziehung des Hauptfahrstreifens. Für den Arbeitsstellenbereich wurden alle Verkehrsführungen mit gleicher Anzahl der Fahrstreifen in diesem Bereich zusammenfassend betrachtet.

Die Verkehrssicherheit in Arbeitsstellen kürzerer Dauer, ausgedrückt durch Unfallkostenraten und Unfallraten, ist von einer Vielzahl von Einflussgrößen abhängig. Neben Einrichtungsdauer der Arbeitsstelle, der Tageszeit (Tages- oder Nachtbaustelle) und den Längen der einzelnen Bereiche innerhalb einer Arbeitsstelle sowie dem DTV – diese Größen sind zur Berechnung der Unfallkosten und Unfallanzahl aus den standardisierten Unfallkostenraten bzw. Unfallraten erforderlich – sind dies vor allem die infrastrukturellen Randbedingungen. Eine Auflistung der möglichen Einflussgrößen ist in Kapitel 9.3.1 gegeben. Die vorgeschlagenen standardisierten Unfallkostenraten und Unfallraten sind jedoch nicht nach allen grundsätzlich möglichen Einflussgrößen differenziert, da hierzu aufgrund des empirisch betrachteten Kollektivs nicht alle Merkmale erfasst bzw. nur vereinzelt erfasst werden konnten oder es konnte aufgrund z. B. der zu kleinen Kollektivgröße keine Auswirkung auf die Unfallkostenraten und Unfallraten analysiert und bestimmt werden. Der Einfluss dieser Merkmale war somit anhand des Untersuchungskollektivs nicht ermittelbar.

Die vorgeschlagenen standardisierten Unfallkostenraten und Unfallraten werden nach der Verkehrsführung und der Anzahl der Fahrstreifen im Vorlauf zur Arbeitsstelle (vorhandene Richtungsfahrbahn) differenziert. Für die Innenbereiche erfolgt zusätzlich eine Anpassung in Abhängigkeit der Breite des Hauptfahrstreifens und des/der Überholfahrstreifen sowie in Abhängigkeit der zulässigen Höchstgeschwindigkeit.

Das vorgeschlagene standardisierte Bewertungsverfahren für die Verkehrssicherheit in Arbeitsstellen kürzerer ist in Kapitel 9.3.4 und für die Abschätzung der Anzahl der Unfälle in Kapitel 9.3.5, jeweils differenziert nach den Verkehrsführungen, angegeben.

9 Empfehlungen für eine standardisierte Bewertung der Verkehrsqualität und Verkehrssicherheit in Arbeitsstellen

Die Ergebnisse der durchgeführten Verkehrssicherheits- und Verkehrsablaufuntersuchungen sollen in erster Linie Empfehlungen für eine standardisierte Bewertung der Verkehrsqualität und Verkehrssicherheit in Arbeitsstellen liefern, die als Eingangsgrößen für das geplante Verkehrsanalyssystem (VAS) des Bundes dienen können. Der methodische Ansatz für das VAS wurde von GEISTEFELDT und HOHMANN (2014) entwickelt. Dabei wurden alle Eingangsgrößen festgelegt, die für die Anwendung des VAS im Rahmen der Baubetriebsplanung als relevant erachtet werden.

Anmerkung des Herausgebers: Die nachfolgende Darstellung beschreibt die Vorschläge der Autoren für das VAS, über deren Verwendung im VAS dessen Verantwortliche entscheiden. Es handelt sich somit hier nicht um eine abschließende Dokumentation der Berechnungsgrundlagen des VAS.

9.1 Kapazitäten

Für die Bewertung einer Arbeitsstelle hinsichtlich ihrer Staugefährdung werden Kapazitätswerte für alle Arbeitsstellenverkehrsführungen und Kombinationen der maßgebenden Randbedingungen benötigt. Dazu wurde als Ergebnis der vorliegenden Untersuchung für Arbeitsstellen längerer Dauer das folgende Modell entwickelt:

$$C_{Ri} = \frac{2.000}{1 + b_{SV}/100} \cdot f_{aB} \cdot f_{FT} \cdot f_s \cdot \sum_{i=1}^n f_{b,i} \quad (9-1)$$

Für Arbeitsstellen kürzerer Dauer wird folgendes Modell zur Anwendung empfohlen:

$$C_{Ri} = 1.650 \cdot f_{aB} \cdot f_{FSE} \cdot f_V \cdot f_s \cdot \sum_{i=1}^n f_{b,i} \quad (9-2)$$

Beide Modelle liefern richtungsbezogene Kapazitäten in der Einheit Kfz/h.

Die Erläuterung der in den beiden Modellen verwendeten Parameter sowie der weiteren analysierten, aber als nicht relevant bewerteten Einflussgrößen sind in Tabelle 9-1 und Tabelle 9-2 zusammengefasst. Weiterhin sind dort auch alle Einflussgrößen dargestellt, welche anhand des vorliegenden Untersuchungskollektivs nicht oder nicht ausreichend analysiert werden konnten. Ergänzende Erläuterungen sind direkt unter den Tabellen angegeben.

Einflussgröße	relevant	nicht relevant	nicht ermittelbar anhand des Untersuchungskollektivs	falls relevant		
				Faktor	Ausprägung	Wert
Lage der Arbeitsstelle innerhalb oder außerhalb von Ballungsräumen	x			f_{aB}	iB aB	1,00 0,95
Schwerverkehrsanteil	x			b_{SV}	0-30 %	im Modell berücksichtigt
Länge der Arbeitsstelle		x		-	-	-
Verkehrsführung	x			durch Parameter „Anzahl FS Bau“, „Überleitung“ und „Fahrbahnteilung“ berücksichtigt		
Überleitung von allen FS auf die Gegenfahrbahn		x ¹⁾		-	-	-
Fahrbahnteilung/Überleitung eines Teils der Fahrstreifen auf die Gegenfahrbahn	x			f_{FT}	nein	1,00
					ja, Richtungsverkehrsführung mit > 2 FS ²⁾	0,95
					ja, Richtungsverkehrsführung mit 2 FS	0,90
Verschwenkung von Fahrstreifen		x		-	-	-
Zulässige Höchstgeschwindigkeit		x		-	-	-
Längsneigung	x			f_s	< 2 % 2-4 % > 4 %	1,00 0,90 0,80 ³⁾
Anzahl der durchgehenden Fahrstreifen im Bauzustand	x			durch Addition der Faktoren für die einzelnen Fahrstreifenbreiten ($f_{b,i}$) berücksichtigt		
Anzahl der durchgehenden Fahrstreifen im Vorlauf zur Arbeitsstelle/Fahrstreifenreduktion		x ¹⁾		-	-	-
Breite der auch für Lkw freigegebenen Fahrstreifen	x			$f_{b,i,Lkw}$	$\geq 3,25$ m	1,00
					< 3,25 m	0,90
Breite der nur für Pkw freigegebenen Fahrstreifen	x			$f_{b,i,Pkw}$	$\geq 2,75$ m	1,00
					$2,60 \leq b_{FS} < 2,75$ m	0,95 ⁴⁾
					< 2,60 m	0,90
Tunnel			x	-	-	-
Streckenbeeinflussungsanlage			x	-	-	-
Modifiziertes Reißverschlussverfahren im Vorlauf			x ⁵⁾	-	-	-
Versetztes Fahren innerhalb der Arbeitsstelle			x	-	-	-
Temporäre Seitenstreifenfreigabe innerhalb der Arbeitsstelle			x	-	-	-

¹⁾ Anhand des Untersuchungskollektivs konnte für die Parameter „Überleitung von allen Fahrstreifen“ und „Fahrstreifenreduktion“ im Gegensatz zu früheren Untersuchungen kein Einfluss auf die Kapazität festgestellt werden. Im Verkehrsanalyzesystem sollten diese Parameter dennoch vorgehalten werden.

²⁾ Anhand des Untersuchungskollektivs konnte ausschließlich die Kapazität bei Überleitung eines Fahrstreifens auf die Gegenfahrbahn bei dreistreifigen Richtungsverkehrsführungen ermittelt werden (2+4-Verkehrsführung). Es ist möglich, dass die Überleitung von zwei Fahrstreifen (bei einer 1+5-Verkehrsführung) andere Auswirkungen auf die Kapazität hat.

³⁾ Gesetzter Wert, Arbeitsstellen mit Steigungen > 4 % waren nicht im Untersuchungskollektiv enthalten.

⁴⁾ Im Optimierungsverfahren ergibt sich für den Faktor ein Wert von 1,0. Aus Plausibilitätsgründen in Bezug auf die anderen beiden Breitenklassen wurde der Faktor auf 0,95 reduziert. Die Auswirkungen auf das Optimierungsergebnis sind gering.

⁵⁾ Da im Rahmen der Untersuchungen kein Einfluss einer Fahrstreifenreduktion auf die Kapazität festgestellt werden konnte, ist anzunehmen, dass das modifizierte Reißverschlussverfahren ebenfalls keine Auswirkungen auf die Kapazität hat.

Tab. 9-1: Einflussgrößen auf die Kapazität von Arbeitsstellen längerer Dauer

Einflussgröße	relevant	nicht relevant	nicht ermittelbar anhand des Untersuchungskollektivs	falls relevant		
				Faktor	Ausprägung	Wert
Lage der Arbeitsstelle innerhalb oder außerhalb von Ballungsräumen	x			f_{aB}	iB aB	1,00 0,84
Schwerverkehrsanteil		x		-	-	-
Verkehrsführung	x			durch „Anzahl FS Bau“ und „Seite des Fahrstreifeneinzugs“ berücksichtigt		
zulässige Höchstgeschwindigkeit		x		-	-	-
Längsneigung	x			f_s	< 2 % 2-4 % > 4 %	1,00 ¹⁾ 0,90 ¹⁾ 0,80 ¹⁾
Anzahl der durchgehenden Fahrstreifen im Bauzustand	x			durch Addition der Faktoren für die einzelnen Fahrstreifenbreiten ($f_{b,i}$) berücksichtigt		
Anzahl der durchgehenden Fahrstreifen im Vorlauf zur Arbeitsstelle		x		-	-	-
Sperrung des Seitenstreifens		x		-	-	-
Sperrung des Hauptfahrstreifens		x		-	-	-
Sperrung des ersten Überholfahrstreifens		x		-	-	-
Sperrung des zweiten Überholfahrstreifens		x		-	-	-
Sperrung des dritten Überholfahrstreifens		x		-	-	-
Seite des Fahrstreifeneinzugs	x			f_{FSE}	links rechts	1,00 0,92
Verringerung der Fahrstreifenbreite	x			$f_{b,i}$	nein ja	1,00 0,90 ¹⁾
Verschwenkung der Fahrstreifen unter Nutzung des Seitenstreifens	x			f_v	nein ja, mit TSF ³⁾ ja	1,00 1,00 0,90 ²⁾
Streckenbeeinflussungsanlage			x	-	-	-

¹⁾ Gesetzter Wert, abgeleitet aus den Kapazitäten von Arbeitsstellen längerer Dauer
²⁾ Gesetzter Wert, abgeleitet aus OBER-SUNDERMEIER (2003)
³⁾ Nutzung vorhandener Anlagen für die temporäre Seitenstreifenfreigabe (TSF) zur Überleitung des Verkehrs auf den Seitenstreifen

Tab. 9-2: Einflussgrößen auf die Kapazität von Arbeitsstellen kürzerer Dauer

9.2 q-v-Diagramme

Für die verkehrliche Bewertung einer Arbeitsstelle hinsichtlich der Fahrtzeiten im fließenden Verkehr werden die q-v-Beziehungen für alle Arbeitsstellenverkehrsführungen und Randbedingungen benötigt. Diese können als Ergebnis der vorliegenden Untersuchung für Arbeitsstellen längerer Dauer mit dem Verkehrsflussmodell nach BRILON und PONZLET (1995) und den in Tabelle 9-3 dargestellten Modellparametern nachgebildet werden. Dieser Ansatz ist kompatibel mit den q-v-Diagrammen für Strecken von Autobahnen nach dem HBS (FGSV, 2015).

$$v(q) = \frac{V_0}{1 + \frac{V_0}{L_0 \cdot (C_0 - q)}} \quad (9-3)$$

mit:

v = mittlere Pkw-Fahrtgeschwindigkeit [km/h]

q = Gesamtverkehrsstärke [Kfz/h]

V_0, L_0 = Modellparameter (siehe Tabelle 9-3)

$$C_0 = C + \frac{v_{\text{krit}} \cdot V_0}{L_0 \cdot (V_0 - v_{\text{krit}})} \quad (9-4)$$

C = Kapazität der Arbeitsstelle gemäß Gleichung (9-1)

v_{krit} = Geschwindigkeit bei der Verkehrsstärke $q = C$ (siehe Tabelle 9-3)

Die angegebenen Tabellenwerte gelten für alle Arbeitsstellentypen und sind nur abhängig von

- der Fahrstreifenanzahl,
- der zulässigen Höchstgeschwindigkeit,
- dem SV-Anteil und
- der Steigung.

Änderungen in der Geschwindigkeit und der Neigung der q-v-Beziehung bei freiem Verkehr ergeben sich durch die Anpassung des Parameters C_0 in Abhängigkeit von der Kapazität C gemäß Gleichung (9-1).

n _{FS} [-]	s [%]	b _{SV} [%]	v _{zul} = 60 km/h			v _{zul} = 80 km/h			v _{zul} = 100 km/h		
			V ₀ [km/h]	L ₀ [-]	v _{krit} [km/h]	V ₀ [km/h]	L ₀ [-]	v _{krit} [km/h]	V ₀ [km/h]	L ₀ [-]	v _{krit} [km/h]
1	≤ 2	≤ 5	93,2	0,131	55	100,7	0,145	70	-	-	-
		10	92,3	0,145	55	99,9	0,161	70	-	-	-
		20	90,8	0,175	55	98,7	0,195	70	-	-	-
		30	89,7	0,206	55	97,7	0,229	70	-	-	-
	2 < s ≤ 4	≤ 5	88,7	0,117	53	98,0	0,125	68	-	-	-
		10	88,4	0,125	53	98,0	0,131	68	-	-	-
		20	87,2	0,146	53	97,1	0,152	68	-	-	-
		30	86,2	0,169	53	96,3	0,174	68	-	-	-
	> 4	≤ 5	84,0	0,108	50	96,8	0,089	65	-	-	-
		10	84,3	0,111	50	98,1	0,087	65	-	-	-
		20	83,4	0,127	50	97,6	0,097	65	-	-	-
		30	83,9	0,134	50	99,9	0,093	65	-	-	-
2	≤ 2	≤ 5	94,3	0,084	55	97,2	0,212	70	115,9	0,427	75
		10	94,1	0,089	55	97,4	0,216	70	116,0	0,437	75
		20	93,7	0,100	55	97,8	0,224	70	116,3	0,459	75
		30	93,4	0,110	55	98,1	0,233	70	116,5	0,481	75
	2 < s ≤ 4	≤ 5	91,0	0,088	53	93,9	0,191	68	112,1	0,426	72
		10	91,7	0,088	53	94,8	0,178	68	112,7	0,411	72
		20	92,0	0,093	53	95,8	0,173	68	113,2	0,415	72
		30	93,2	0,094	53	97,5	0,158	68	114,2	0,400	72
	> 4	≤ 5	86,8	0,080	50	90,3	0,155	65	107,5	0,408	68
		10	87,4	0,081	50	91,2	0,147	65	108,0	0,401	68
		20	87,5	0,088	50	92,0	0,147	65	108,4	0,415	68
		30	89,4	0,085	50	94,5	0,127	65	109,6	0,391	68
3	≤ 2	≤ 5	93,0	0,076	55	100,6	0,137	75	119,0	0,292	80
		10	92,2	0,086	55	100,0	0,155	75	118,6	0,325	80
		20	91,8	0,097	55	100,1	0,167	75	118,6	0,351	80
		30	91,4	0,109	55	100,2	0,179	75	118,7	0,377	80
	2 < s ≤ 4	≤ 5	89,5	0,082	53	97,5	0,145	72	115,8	0,320	75
		10	89,8	0,084	53	98,0	0,142	72	116,1	0,319	75
		20	89,2	0,096	53	97,9	0,157	72	116,1	0,351	75
		30	88,8	0,108	53	97,8	0,172	72	116,0	0,383	75
	> 4	≤ 5	85,1	0,076	50	94,1	0,138	68	112,2	0,319	70
		10	85,3	0,078	50	94,5	0,138	68	112,4	0,323	70
		20	85,6	0,083	50	95,3	0,138	68	112,8	0,332	70
		30	85,8	0,089	50	95,9	0,139	68	113,2	0,343	70
4	≤ 2	≤ 5	91,0	0,069	55	96,9	0,195	75	116,4	0,345	85
		10	90,3	0,077	55	96,6	0,218	75	116,2	0,382	85
		20	89,1	0,096	55	96,1	0,269	75	115,8	0,464	85
		30	88,2	0,117	55	95,8	0,325	75	115,5	0,553	85
	2 < s ≤ 4	≤ 5	86,6	0,081	53	93,3	0,236	72	112,9	0,421	80
		10	86,0	0,091	53	93,1	0,264	72	112,7	0,467	80
		20	85,0	0,113	53	92,6	0,323	72	112,3	0,564	80
		30	84,2	0,137	53	92,3	0,389	72	112,1	0,670	80
	> 4	≤ 5	80,4	0,091	50	88,7	0,285	68	108,4	0,511	75
		10	79,9	0,102	50	88,5	0,318	68	108,2	0,564	75
		20	79,0	0,126	50	88,2	0,389	68	107,9	0,680	75
		30	78,3	0,153	50	87,9	0,466	68	107,7	0,806	75

Tab. 9-3: Modellparameter der q-v-Diagramme für Arbeitsstellen

9.3 Unfallkostenraten und Unfallraten

Für die Bewertung der Verkehrssicherheit von Arbeitsstellen längerer und kürzerer Dauer werden die Unfallkosten benötigt, die sich aus dem gesamten Unfallgeschehen während der Dauer der Einrichtung ergeben. Die Unfallkosten sollen über standardisierte Unfallkostenraten ermittelt werden.

Für die Einschätzung von Beeinträchtigungen des Verkehrsablaufs mit Staus durch Unfälle in Arbeitsstellen längerer und kürzerer Dauer wird die Anzahl der Unfälle benötigt, die während der Dauer der Einrichtung auftreten. Die Anzahl der Unfälle soll über standardisierte Unfallraten ermittelt werden.

Anmerkung des Herausgebers: Die nachfolgende Darstellung in Kapitel 9.3 beschreibt den Verfahrensvorschlag der Autoren für das VAS ohne die vorgeschlagenen standardisierten Unfallkostenraten und Unfallraten. Der Verfahrensvorschlag wurde bisher nicht in das VAS übernommen, sondern soll zuvor durch ergänzende Untersuchungen validiert werden.

9.3.1 Einflussgrößen auf die Verkehrssicherheit

Die Einflussgrößen auf die Verkehrssicherheit von Arbeitsstellen längerer Dauer, ausgedrückt durch Unfallkostenraten und Unfallraten, sind in Tabelle 9-4 zusammengefasst. Die Einflussgrößen für Arbeitsstellen kürzerer Dauer enthält Tabelle 9-5. Die vorgeschlagenen standardisierten Unfallkostenraten und Unfallraten berücksichtigen jedoch – wie in Kapitel 8.2.5 und Kapitel 8.3.4 erläutert – nicht alle Einflussgrößen, da einzelne Merkmale nicht bzw. nur vereinzelt anhand der vorliegenden Angaben erfasst werden konnten oder es konnte aufgrund z. B. der zu kleinen Kollektivgröße keine Auswirkung auf die Unfallkostenraten und Unfallraten analysiert und bestimmt werden.

Einflussgröße	relevant	nicht relevant	nicht ermittelbar anhand des Untersuchungskollektivs	falls relevant		
				Faktor	Ausprägung	
Dauer	x ¹⁾			-	-	
Jahreszeit			x	-	-	
Länge	x ¹⁾			-	-	
Längsneigung			x	-	-	
Abstand zur Arbeitsstelle davor			x	-	-	
Anzahl der Anschlussstellen Arbeitsstellenbereich			x	-	-	
Lage in Bezug zu Ballungsräumen			x	-	-	
DTV	x ¹⁾			-	-	
DTV _{SV}			x	-	-	
Verkehrsführung	x			in UKR bzw. UR berücksichtigt		
zul. Höchstgeschwindigkeit im Arbeitsstelleninnenbereich (überwiegender Längenteil)	x			f _{vzul}	100 km/h 80 km/h 60 km/h	
zul. Höchstgeschwindigkeit in der Überleitung bzw. Fahrstreifenverschwenkung am Beginn der Arbeitsstelle			x ²⁾	-	-	
zul. Höchstgeschwindigkeit in der Rückleitung bzw. Fahrstreifenverschwenkung am Ende der Arbeitsstelle			x ²⁾	-	-	
Anzahl der Fahrstreifen im Bauzustand	x			in Verkehrsführung berücksichtigt		
Anzahl der Fahrstreifen im Vorlauf zur Arbeitsstelle	x			in Verkehrsführung berücksichtigt		
Breite des Hauptfahrstreifens und des Überholfahrstreifens bzw. der Überholfahrstreifen im Arbeitsstelleninnenbereich	x			f _{BFS}	HFS < 3,25 m < 3,25 m < 3,25 m ≥ 3,25 m ≥ 3,25 m ≥ 3,25 m	ÜFS < 2,60 m < 2,75 m ≥ 2,75 m < 2,60 m < 2,75 m ≥ 2,75 m
Breite der Mittelrennung			x	-	-	
Art der Gegenverkehrstrennung im Arbeitsstelleninnenbereich		x ³⁾		-	-	
Besonderheiten der Arbeitsstellenausstattung bzw. der Verkehrsregelung			x	-	-	

1) Geht zusammen mit der UKR bzw. UR in die Berechnung der absoluten Unfallkosten bzw. der absoluten Unfallanzahl ein.
2) In der Regel auf 80 km/h beschränkt.
3) Überwiegend werden transportable Schutzeinrichtungen eingesetzt, sodass eine Unterscheidung nach Art der Gegenverkehrstrennung nicht relevant ist.

Tab. 9-4: Einflussgrößen auf die Unfallkostenrate (UKR) und Unfallrate (UR) von Arbeitsstellen längerer Dauer

Einflussgröße	relevant	nicht relevant	nicht ermittelbar anhand des Untersuchungskollektivs	falls relevant	
				Faktor	Ausprägung
Dauer	x ¹⁾			–	–
Jahreszeit			x	–	–
Tageszeit	x			in UKR bzw. UR berücksichtigt	Tagesbaustelle Nachtbaustelle
Länge	x ¹⁾			–	–
Längsneigung			x	–	–
Lage in Bezug zu Ballungsräumen			x	–	–
DTV	x ¹⁾			–	–
DTV _{SV}			x	–	–
Verkehrsführung	x			in UKR bzw. UR berücksichtigt	
zul. Höchstgeschwindigkeit im Arbeitsstellenbereich			x	–	–
zul. Höchstgeschwindigkeit im Vorlauf zur Arbeitsstelle			x	–	–
Anzahl der Fahrstreifen im Arbeitsstellenbereich vor Einrichtung der Arbeitsstelle	x			in Verkehrsführung berücksichtigt	
Anzahl der Fahrstreifen im Bauzustand	x			in Verkehrsführung berücksichtigt	
Anzahl der Fahrstreifen im Vorlauf zur Arbeitsstelle	x			in Verkehrsführung berücksichtigt	
Besonderheiten der Arbeitsstellenausstattung bzw. der Verkehrsregelung			x	–	–

¹⁾ Geht zusammen mit der UKR bzw. UR in die Berechnung der absoluten Unfallkosten bzw. der absoluten Unfallanzahl ein.

Tab. 9-5: Einflussgrößen auf die Unfallkostenrate (UKR) und Unfallrate (UR) von Arbeitsstellen kürzerer Dauer

9.3.2 Unfallkosten einer Arbeitsstelle längerer Dauer

Die Unfallkosten einer Arbeitsstelle längerer Dauer ergeben sich aus den Unfallkosten bei der Fahrtrichtungen zu:

$$UK_{AID} = UK_{ARI1} + UK_{ARI2} \quad (9-5)$$

mit:

$$UK_{AID} = \text{Unfallkosten der Arbeitsstelle längerer Dauer} \quad [€]$$

$$UK_{ARI1} = \text{Unfallkosten der Fahrtrichtung 1} \quad [€]$$

$$UK_{ARI2} = \text{Unfallkosten der Fahrtrichtung 2} \quad [€]$$

Bei den Fahrtrichtungen von Arbeitsstellen längerer Dauer sind solche mit beeinflusstem und unbeeinflusstem Verkehr zu unterscheiden. Letztere kommen bei 2+1-, 2+2-, 3+2-, 3+3-, 4+3- und 4+4-Verkehrsführungen vor.

Ändert sich innerhalb der gemeldeten Arbeitsstellenlänge (bezogen auf die erste und letzte Bake) in einer Fahrtrichtung aufgrund von zu- und abfließendem Verkehr an Anschlussstellen abschnittsweise die Verkehrsbelastung, ist als durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke der gesamten betrachteten Fahrtrichtung der längengewichtete Mittelwert der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärken der einzelnen Abschnitte anzusetzen.

Fahrtrichtung mit unbeeinflusstem Verkehr

Zur Ermittlung der Unfallkosten einer Fahrtrichtung mit unbeeinflusstem Verkehr sollten die Längen der einzelnen Teilbereiche (Zulauf, Verschwenkung/Überleitung, Innenbereich und Rückverschwenkung/-leitung) der Gegenrichtung zu Grunde gelegt werden. Sind diese nicht bekannt, kann die Ermittlung der Unfallkosten näherungsweise mit der gemeldeten Arbeitsstellenlänge und pauschalen Standardlängen der einzelnen Teilbereiche erfolgen.

1. Fall: Längen aller Teilbereiche bekannt

Die Unfallkosten einer Fahrtrichtung mit unbeeinflusstem Verkehr ergeben sich für den Fall, dass die Längen aller Teilbereiche der Gegenrichtung mit beeinflusstem Verkehr bekannt sind, zu:

$$UK_{ARi} = UKR_{RFB} \cdot (L_{Zu} + L_{VÜ} + L_{In} + L_{RR}) \cdot DTV_{ARi} \cdot t_A \cdot 10^{-3} \quad (9-6)$$

mit:

UK_{ARi} = Unfallkosten der betrachteten Fahrtrichtung mit unbeeinflusstem Verkehr [€]

UKR_{RFB} = Unfallkostenrate für die Richtungsfahrbahn mit unbeeinflusstem Verkehr nach Tabelle 9-6 [€/((1.000 Kfz · km))]

L_{Zu} = Länge des Zulaufs der Gegenrichtung mit beeinflusstem Verkehr [km]

$L_{VÜ}$ = Länge der Verschwenkung bzw. Überleitung der Gegenrichtung mit beeinflusstem Verkehr [km]

L_{In} = Länge des Innenbereichs der Gegenrichtung mit beeinflusstem Verkehr [km]

L_{RR} = Länge der Rückverschwenkung bzw. Rückleitung der Gegenrichtung mit beeinflusstem Verkehr [km]

DTV_{ARi} = durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke in der betrachteten Fahrtrichtung [Kfz/d]

t_A = Einrichtungszeitraum (Dauer) der Arbeitsstelle in Tagen [d]

Verkehrsführung (unbeeinflusster Verkehr)		V_{zul} [km/h]	UKR_{RFB} [€/((1.000 Kfz · km))] Preisstand 2010
2+1 2+2	2 Fahrstreifen mit Seitenstreifen	frei bzw. 130	<i>Anmerkung des Herausgebers: Die Werte werden nicht veröffentlicht.</i>
		120	
		≤ 100	
	2 Fahrstreifen ohne Seitenstreifen	frei bzw. 130	
		120	
		≤ 100	
3+2 3+3	3 Fahrstreifen	frei bzw. 130	
		120	
		≤ 100	
4+3 4+4	4 Fahrstreifen	frei bzw. 130	
		120	
		≤ 100	

Tab. 9-6: Vorgeschlagene standardisierte mittlere richtungsbezogene Unfallkostenraten für unbeeinflussten Verkehr in Arbeitsstellen längerer Dauer

2. Fall: Nur gemeldete Arbeitsstellenlänge liegt vor

Für den Fall, dass nur die gemeldete Länge der Arbeitsstelle vorliegt, ergeben sich die Unfallkosten einer Fahrtrichtung mit unbeeinflusstem Verkehr zu:

$$UK_{ARI} = UKR_{RFB} \cdot (L_{ARI,g} + 0,800 + L_{VÜ,St} - 0,135) \cdot DTV_{ARI} \cdot t_A \cdot 10^{-3} \quad (9-7)$$

mit:

UK_{ARI} = Unfallkosten der betrachteten Fahrtrichtung mit unbeeinflusstem Verkehr [€]

UKR_{RFB} = Unfallkostenrate für die Richtungsfahrbahn mit unbeeinflusstem Verkehr nach Tabelle 9-6 [€/((1.000 Kfz · km))]

$L_{ARI,g}$ = gemeldete Arbeitsstellenlänge (bezogen auf die erste und letzte Bake) [km]

$L_{VÜ,St}$ = Standardlänge der Verschwenkung bzw. Überleitung der Gegenrichtung mit beeinflusstem Verkehr nach Tabelle 9-7 [km]

DTV_{ARI} = durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke in der betrachteten Fahrtrichtung [Kfz/d]

t_A = Einrichtungszeitraum (Dauer) der Arbeitsstelle in Tagen [d]

Fahrtrichtung mit beeinflusstem Verkehr

Zur Ermittlung der Unfallkosten einer Fahrtrichtung mit beeinflusstem Verkehr sollten die Längen der einzelnen Teilbereiche (Zulauf, Verschwenkung/Überleitung, Innenbereich und Rückverschwenkung/-überleitung) der betrachteten Richtung zu Grunde gelegt werden. Sind diese nicht bekannt, kann die Ermittlung der Unfallkosten näherungsweise mit der gemeldeten Arbeitsstellenlänge und pauschalen Standardlängen der einzelnen Teilbereiche erfolgen.

1. Fall: Längen aller Teilbereiche bekannt

Die Unfallkosten einer Fahrtrichtung mit beeinflusstem Verkehr ergeben sich für den Fall, dass die Längen aller Teilbereiche der betrachteten Richtung bekannt sind, zu:

$$UK_{ARI} = (UKR_{Zu} \cdot L_{Zu} + UKR_{VÜ} \cdot L_{VÜ} + UKR_{In} \cdot L_{In} + UKR_{RR} \cdot L_{RR}) \cdot DTV_{ARI} \cdot t_A \cdot 10^{-3} \quad (9-8)$$

mit:

UK_{ARI} = Unfallkosten der betrachteten Fahrtrichtung mit beeinflusstem Verkehr [€]

UKR_{Zu} = Unfallkostenrate für den Zulauf nach Tabelle 9-8 [€/((1.000 Kfz · km))]

L_{Zu} = Länge des Zulaufs [km]

$UKR_{VÜ}$ = Unfallkostenrate für die Verschwenkung bzw. Überleitung nach Tabelle 9-8 [€/((1.000 Kfz · km))]

$L_{VÜ}$ = Länge der Verschwenkung bzw. Überleitung [km]

UKR_{In} = Unfallkostenrate für den Innenbereich [€/((1.000 Kfz · km))]

$$= UKR_{In,B} \cdot f_{BFS} \cdot f_{Vzul}$$

$UKR_{In,B}$ = Basis-Unfallkostenrate für den Innenbereich nach Tabelle 9-8 [€/((1.000 Kfz · km))]

f_{BFS}	= Faktor zur Berücksichtigung der Fahrstreifenbreiten nach Tabelle 9-9	[-]
f_{Vzul}	= Faktor zur Berücksichtigung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit nach Tabelle 9-10	[-]
L_{In}	= Länge des Innenbereichs	[km]
UKR_{RR}	= Unfallkostenrate für die Rückverschwenkung bzw. Rückleitung nach Tabelle 9-8	[€/ (1.000 Kfz · km)]
L_{RR}	= Länge der Rückverschwenkung bzw. Rückleitung	[km]
DTV_{ARi}	= durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke in der betrachteten Fahrtrichtung	[Kfz/d]
t_A	= Einrichtungszeitraum (Dauer) der Arbeitsstelle in Tagen	[d]

2. Fall: Nur gemeldete Arbeitsstellenlänge liegt vor

Für den Fall, dass nur die gemeldete Länge der Arbeitsstelle vorliegt, ergeben sich die Unfallkosten einer Fahrtrichtung mit unbeeinflusstem Verkehr zu:

$$UK_{ARi} = (UKR_{Zu} \cdot 0,800 + UKR_{VÜ} \cdot L_{VÜ,St} + UKR_{In} \cdot (L_{ARi,g} - 2 \cdot 0,135) + UKR_{RR} \cdot 0,135) \cdot DTV_{ARi} \cdot t_A \cdot 10^{-3} \quad (9-9)$$

mit:

UK_{ARi}	= Unfallkosten der betrachteten Fahrtrichtung mit beeinflusstem Verkehr	[€]
UKR_{Zu}	= Unfallkostenrate für den Zulauf nach Tabelle 9-8	[€/ (1.000 Kfz · km)]
$UKR_{VÜ}$	= Unfallkostenrate für die Verschwenkung bzw. Überleitung nach Tabelle 9-8	[€/ (1.000 Kfz · km)]
$L_{VÜ,St}$	= Standardlänge der Verschwenkung bzw. Überleitung nach Tabelle 9-7	[km]
UKR_{In}	= Unfallkostenrate für den Innenbereich	[€/ (1.000 Kfz · km)]
	= $UKR_{In,B} \cdot f_{BFS} \cdot f_{Vzul}$	
$UKR_{In,B}$	= Basis-Unfallkostenrate für den Innenbereich nach Tabelle 9-8	[€/ (1.000 Kfz · km)]
f_{BFS}	= Faktor zur Berücksichtigung der Fahrstreifenbreiten nach Tabelle 9-9	[-]
f_{Vzul}	= Faktor zur Berücksichtigung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit nach Tabelle 9-10	[-]
$L_{ARi,g}$	= gemeldete Arbeitsstellenlänge	[km]
UKR_{RR}	= Unfallkostenrate für die Rückverschwenkung bzw. Rückleitung nach Tabelle 9-8	[€/ (1.000 Kfz · km)]
DTV_{ARi}	= durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke in der betrachteten Fahrtrichtung	[Kfz/d]
t_A	= Einrichtungszeitraum (Dauer) der Arbeitsstelle in Tagen	[d]

Verkehrsführung (beeinflusster Verkehr)			Fahrstreifenanzahl und Führung in betrachteter Richtung im Arbeitsstelleninnenbereich	L _{V,St} [km]	
ohne Überleitung	zweistreifige RFB	1+1	1 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr	0,435	
		2+1			
		2+2	2 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr	0,135	
	dreistreifige RFB	3+2	2 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr	0,535	
		3+3	3 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr	0,135	
	vierstreifige RFB	4+3	3 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr	0,535	
4+4		4 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr	0,135		
mit Überleitung	zweistreifige RFB	2+0	1 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, nicht übergeleitet	0,100	
			1 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, übergeleitet	0,435	
		3+0	2 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, nicht übergeleitet	0,135	
			2 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, z. T. übergeleitet	0,135	
		4+0	2 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, nicht übergeleitet	0,135	
			2 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, übergeleitet	0,135	
		dreistreifige RFB	4+0	2 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, nicht übergeleitet	0,535
				2 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, übergeleitet	0,535
	4+1		2 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, z. T. übergeleitet	0,535	
			3 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, nicht übergeleitet	0,135	
	4+2		3 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, z. T. übergeleitet	0,135	
			2 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, übergeleitet	0,535	
	5+0		3 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, nicht übergeleitet	0,135	
			3 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, z. T. übergeleitet	0,135	
	6+0		3 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, nicht übergeleitet	0,135	
			3 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, übergeleitet	0,135	
	vierstreifige RFB	6+2	4 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, nicht übergeleitet	0,135	
			4 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, z. T. übergeleitet	0,135	

Tab. 9-7: Standardlänge der Verschwenkung bzw. Überleitung für beeinflussten Verkehr in Arbeitsstellen längerer Dauer

Verkehrsführung (beeinflusster Verkehr)			Fahrstreifenanzahl und Führung in betrachteter Richtung im Arbeitsstelleninnenbereich			Unfallkostenrate [€/ (1.000 Kfz · km)] Preisstand 2010			
						Zulauf	Verschwenkung bzw. Überleitung	Innenbereich ¹⁾	Rückverschwenkung bzw. Rückleitung
						UKR _{Zu}	UKR _{VÜ}	UKR _{In,B}	UKR _{RR}
ohne Überleitung	zwei- streifige RFB	1+1	1 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr						
		2+1							
		2+2							2 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr
	drei- streifige RFB	3+2	2 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr						
		3+3	3 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr						
		4+3	3 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr						
vier- streifige RFB	4+4	4 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr							
	zwei- streifige RFB	2+0	1 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, nicht übergeleitet	<i>Anmerkung des Herausgebers: Die Werte werden nicht veröffentlicht.</i>					
			1 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, übergeleitet						
3+0		2 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, nicht übergeleitet							
3+1		2 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, z. T. übergeleitet							
4+0		2 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, nicht übergeleitet							
		2 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, übergeleitet							
mit Überleitung	4+0		2 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, nicht übergeleitet						
			2 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, übergeleitet						
	4+1	2 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, z. T. übergeleitet							
	4+2		3 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, nicht übergeleitet						
			3 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, z. T. übergeleitet						
	5+0		2 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, übergeleitet						
			3 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, nicht übergeleitet						
	5+1		3 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, z. T. übergeleitet						
			3 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, nicht übergeleitet						
	6+0		3 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, nicht übergeleitet						
		3 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, übergeleitet							
vier- streifige RFB	6+2		4 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, nicht übergeleitet						
			4 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, z. T. übergeleitet						

¹⁾ Basis-Unfallkostenrate für den Arbeitsstelleninnenbereich (UKR_{In,B}) gilt für Fahrstreifenbreiten B_{HFS} ≥ 3,25 m (Hauptfahrstreifen) und 2,60 m ≤ B_{ÜFS} < 2,75 m (Überholfahrstreifen) sowie V_{Zul} = 80 km/h

Tab. 9-8: Vorgeschlagene standardisierte mittlere richtungsbezogene Unfallkostenraten für beeinflussten Verkehr in Arbeitsstellen längerer Dauer

Fahrstreifenbreite		f_{BFS} [-]
B_{HFS} [m]	$B_{ÜFS}$ [m]	
≥ 3,00 und < 3,25	≥ 2,50 und < 2,60	<i>Anmerkung des Herausgebers: Die Werte werden nicht veröffentlicht.</i>
	≥ 2,60 und < 2,75	
	≥ 2,75	
≥ 3,25	≥ 2,50 und < 2,60	
	≥ 2,60 und < 2,75	
	≥ 2,75	

Tab. 9-9: Faktor zur Berücksichtigung der Fahrstreifenbreiten im Innenbereich bei Arbeitsstellen längerer Dauer

Fahrstreifenbreite		f_{Vzul} [-]			
B_{HFS} [m]	$B_{ÜFS}$ [m]	$V_{zul} = 60$ km/h	$V_{zul} = 80$ km/h	$V_{zul} = 100$ km/h	
≥ 3,00 und < 3,25	≥ 2,50 und < 2,60	<i>Anmerkung des Herausgebers: Die Werte werden nicht veröffentlicht.</i>			- 1)
	≥ 2,60 und < 2,75				- 1)
	≥ 2,75				- 1)
≥ 3,25	≥ 2,50 und < 2,60				- 1)
	≥ 2,60 und < 2,75				- 1)
	≥ 2,75				- 1)

¹⁾ Fahrstreifenbreiten für eine Beschränkung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit auf mehr als 80 km/h ungeeignet

Tab. 9-10: Faktor zur Berücksichtigung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit im Innenbereich bei Arbeitsstellen längerer Dauer in Abhängigkeit von den Fahrstreifenbreiten

9.3.3 Anzahl der Unfälle in einer Arbeitsstelle längerer Dauer

Im Hinblick auf die Abschätzung von Beeinflussungen des Verkehrsablaufs durch Unfälle (Stau) ist eine richtungsgetrennte Betrachtung sinnvoll. Unabhängig davon kann die Anzahl der Unfälle in einer Arbeitsstelle längerer Dauer insgesamt bestimmt werden. Diese ergibt sich aus den Unfallanzahlen beider Fahrtrichtungen zu:

$$n_{U,AID} = n_{U,ARI1} + n_{U,ARI2} \quad (9-10)$$

mit:

$$n_{U,AID} = \text{Anzahl der Unfälle in der Arbeitsstelle} \quad [U]$$

$$n_{U,ARI1} = \text{Anzahl der Unfälle in der Richtung 1} \quad [U]$$

$$n_{U,ARI2} = \text{Anzahl der Unfälle in der Richtung 2} \quad [U]$$

Bei den Fahrtrichtungen von Arbeitsstellen längerer Dauer sind solche mit beeinflusstem und unbeeinflusstem Verkehr zu unterscheiden. Letztere kommen bei 2+1-, 2+2-, 3+2-, 3+3-, 4+3- und 4+4-Verkehrsführungen vor.

Aufgrund der zu erwartenden unterschiedlichen Ausprägung der Beeinträchtigung des Verkehrsablaufs wird nach Unfällen mit Personenschaden und Unfällen mit Sachschaden differenziert. Zunächst ist die Anzahl aller Unfälle zu ermitteln und anschließend die anteilige Anzahl der Unfälle mit Personenschaden und mit Sachschaden.

Fahrtrichtung mit unbeeinflusstem Verkehr

Zur Ermittlung der Anzahl der Unfälle in einer Fahrtrichtung mit unbeeinflusstem Verkehr sollten die Längen der einzelnen Teilbereiche (Zulauf, Verschwenkung/Überleitung, Innenbereich und Rückverschwenkung/-leitung) der Gegenrichtung zu Grunde gelegt werden. Sind diese nicht bekannt, kann die Ermittlung der Unfallanzahl näherungsweise mit der gemeldeten Arbeitsstellenlänge und pauschalen Standardlängen der einzelnen Teilbereiche erfolgen.

1. Fall: Längen aller Teilbereiche bekannt

Die Anzahl der Unfälle in einer Fahrtrichtung mit unbeeinflusstem Verkehr ergibt sich für den Fall, dass die Längen aller Teilbereiche der Gegenrichtung mit beeinflusstem Verkehr bekannt sind, zu:

$$n_{U,ARI} = UR_{RFB} \cdot (L_{Zu} + L_{VÜ} + L_{In} + L_{RR}) \cdot DTV_{ARi} \cdot t_A \cdot 10^{-6} \quad (9-11)$$

mit:

$$n_{U,ARI} = \text{Anzahl der Unfälle in der betrachteten Fahrtrichtung mit unbeeinflusstem Verkehr} \quad [U]$$

$$UR_{RFB} = \text{Unfallrate für die Richtungsfahrbahn mit unbeeinflusstem Verkehr nach Tabelle 9-11} \quad [U/(10^6 \text{ Kfz} \cdot \text{km})]$$

$$L_{Zu} = \text{Länge des Zulaufs der Gegenrichtung mit beeinflusstem Verkehr} \quad [\text{km}]$$

$$L_{VÜ} = \text{Länge der Verschwenkung bzw. Überleitung der Gegenrichtung mit beeinflusstem Verkehr} \quad [\text{km}]$$

$$L_{In} = \text{Länge des Innenbereichs der Gegenrichtung mit beeinflusstem Verkehr} \quad [\text{km}]$$

$$L_{RR} = \text{Länge der Rückverschwenkung bzw. Rückleitung der Gegenrichtung mit beeinflusstem Verkehr} \quad [\text{km}]$$

$$DTV_{ARi} = \text{durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke in der betrachteten Fahrtrichtung} \quad [\text{Kfz/d}]$$

$$t_A = \text{Einrichtungszeitraum (Dauer) der Arbeitsstelle in Tagen} \quad [d]$$

2. Fall: Nur gemeldete Arbeitsstellenlänge liegt vor

Für den Fall, dass nur die gemeldete Länge der Arbeitsstelle vorliegt, ergibt sich die Unfallanzahl in einer Fahrtrichtung mit unbeeinflusstem Verkehr zu:

$$n_{U,ARI} = UR_{RFB} \cdot (L_{A,g} + 0,800 + L_{VÜ,St} - 0,135) \cdot DTV_{ARi} \cdot t_A \cdot 10^{-6} \quad (9-12)$$

mit:

$$n_{U,ARI} = \text{Anzahl der Unfälle in der Fahrtrichtung mit unbeeinflusstem Verkehr} \quad [U]$$

$$UR_{RFB} = \text{Unfallrate für die Richtungsfahrbahn mit unbeeinflusstem Verkehr nach Tabelle 9-11} \quad [U/(10^6 \text{ Kfz} \cdot \text{km})]$$

$$L_{A,g} = \text{gemeldete Arbeitsstellenlänge} \quad [\text{km}]$$

$$L_{VÜ,St} = \text{Standardlänge der Verschwenkung bzw. Überleitung der Gegenrichtung mit beeinflusstem Verkehr nach Tabelle 9-7} \quad [\text{km}]$$

DTV_{ARI} = durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke in der betrachteten Fahrtrichtung [Kfz/d]

t_A = Einrichtungszeitraum (Dauer) der Arbeitsstelle in Tagen [d]

Fahrtrichtung mit beeinflusstem Verkehr

Zur Ermittlung der Anzahl der Unfälle in einer Fahrtrichtung mit beeinflusstem Verkehr sollten die Längen der einzelnen Teilbereiche (Zulauf, Verschwenkung/Überleitung, Innenbereich und Rückverschwenkung/-leitung) der betrachteten Richtung zu Grunde gelegt werden. Sind diese nicht bekannt, kann die Ermittlung der Unfallanzahl näherungsweise mit der gemeldeten Arbeitsstellenlänge und pauschalen Standardlängen der einzelnen Teilbereiche erfolgen.

1. Fall: Längen aller Teilbereiche bekannt

Die Anzahl der Unfälle in einer Fahrtrichtung mit beeinflusstem Verkehr ergibt sich für den Fall, dass die Längen aller Teilbereiche der betrachteten Richtung bekannt sind, zu:

$$n_{U,ARI} = (UR_{Zu} \cdot L_{Zu} + UR_{VÜ} \cdot L_{VÜ} + UR_{In} \cdot L_{In} + UR_{RR} \cdot L_{RR}) \cdot DTV_{ARI} \cdot t_A \cdot 10^{-6} \quad (9-13)$$

mit:

$n_{U,ARI}$ = Anzahl der Unfälle in der betrachteten Fahrtrichtung mit beeinflusstem Verkehr [U]

UR_{Zu} = Unfallrate für den Zulauf nach Tabelle 9-12 [U/(10⁶ Kfz · km)]

L_{Zu} = Länge des Zulaufs [km]

$UR_{VÜ}$ = Unfallrate für die Verschwenkung bzw. Überleitung nach Tabelle 9-12 [U/(10⁶ Kfz · km)]

$L_{VÜ}$ = Länge der Verschwenkung bzw. Überleitung [km]

UR_{In} = Unfallrate für den Innenbereich [U/(10⁶ Kfz · km)]

$$= UR_{In,B} \cdot f_{BFS} \cdot f_{Vzul}$$

$UR_{In,B}$ = Basis-Unfallrate für den Innenbereich nach Tabelle 9-12 [U/(10⁶ Kfz · km)]

f_{BFS} = Faktor zur Berücksichtigung der Fahrstreifenbreiten nach Tabelle 9-9 [-]

f_{Vzul} = Faktor zur Berücksichtigung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit nach Tabelle 9-10 [-]

L_{In} = Länge des Innenbereichs [km]

UR_{RR} = Unfallrate für die Rückverschwenkung bzw. Rückleitung nach Tabelle 9-12 [U/(10⁶ Kfz · km)]

L_{RR} = Länge der Rückverschwenkung bzw. Rückleitung [km]

DTV_{ARI} = durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke in der betrachteten Fahrtrichtung [Kfz/d]

t_A = Einrichtungszeitraum (Dauer) der Arbeitsstelle in Tagen [d]

2. Fall: Nur gemeldete Arbeitsstellenlänge liegt vor

Für den Fall, dass nur die gemeldete Länge der Arbeitsstelle vorliegt, ergibt sich die Anzahl der Unfälle in einer Fahrtrichtung mit unbeeinflusstem Verkehr zu:

$$n_{U,ARI} = (UR_{Zu} \cdot 0,800 + UR_{VÜ} \cdot L_{VÜ,St} + UR_{In} \cdot (L_{ARI,g} - 2 \cdot 0,135) + UR_{RR} \cdot 0,135) \cdot DTV_{ARI} \cdot t_A \cdot 10^{-6} \quad (9-14)$$

mit:

$n_{U,ARI}$	= Anzahl der Unfälle in der betrachteten Fahrtrichtung mit beeinflusstem Verkehr	[U]
UR_{Zu}	= Unfallrate für den Zulauf nach Tabelle 9-12	[U/(10 ⁶ Kfz · km)]
$UR_{VÜ}$	= Unfallrate für die Verschwenkung bzw. Überleitung nach Tabelle 9-12	[U/(10 ⁶ Kfz · km)]
$L_{VÜ,St}$	= Standardlänge der Verschwenkung bzw. Überleitung nach Tabelle 9-7	[km]
UR_{In}	= Unfallrate für den Innenbereich	[U/(10 ⁶ Kfz · km)]
	= $UR_{In,B} \cdot f_{BFS} \cdot f_{Vzul}$	
$UR_{In,B}$	= Basis-Unfallrate für den Innenbereich nach Tabelle 9-12	[€/(1.000 Kfz · km)]
f_{BFS}	= Faktor zur Berücksichtigung der Fahrstreifenbreiten nach Tabelle 9-9	[-]
f_{Vzul}	= Faktor zur Berücksichtigung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit nach Tabelle 9-10	[-]
L_{In}	= Länge des Innenbereichs	[km]
UR_{RR}	= Unfallrate für die Rückverschwenkung bzw. Rückleitung nach Tabelle 9-12	[U/(10 ⁶ Kfz · km)]
L_{RR}	= Länge der Rückverschwenkung bzw. Rückleitung	[km]
DTV_{ARI}	= durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke in der betrachteten Fahrtrichtung	[Kfz/d]
t_A	= Einrichtungszeitraum (Dauer) der Arbeitsstelle in Tagen	[d]

Verkehrsführung (unbeeinflusster Verkehr)		V _{zul} [km/h]	UR _{RFB} [U/(10 ⁶ Kfz · km)]
2+1 2+2	2 Fahrstreifen mit Seitenstreifen	frei bzw. 130	<i>Anmerkung des Herausgebers: Die Werte werden nicht veröffentlicht.</i>
		120	
		≤ 100	
	2 Fahrstreifen ohne Seitenstreifen	frei bzw. 130	
		120	
		≤ 100	
3+2 3+3	3 Fahrstreifen	frei bzw. 130	
		120	
		≤ 100	
4+3 4+4	4 Fahrstreifen	frei bzw. 130	
		120	
		≤ 100	

Tab. 9-11: Vorgeschlagene standardisierte mittlere richtungsbezogene Unfallraten für unbeeinflussten Verkehr in Arbeitsstellen längerer Dauer

Verkehrsführung (beeinflusster Verkehr)			Fahrstreifenanzahl und Führung in betrachteter Richtung im Arbeitsstelleninnenbereich		Unfallrate [U/(10 ⁶ Kfz · km)]				
					Zulauf	Verschwenkung bzw. Überleitung	Innenbereich ¹⁾	Rückverschwenkung bzw. Rückleitung	
					UR _{Zu}	UR _{VÜ}	UR _{In,B}	UR _{RR}	
ohne Über- leitung	zweistrei- fige RFB	1+1	1 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr						
		2+1							
		2+2							2 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr
	dreistrei- fige RFB	3+2							2 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr
		3+3							3 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr
	vierstrei- fige RFB	4+3							3 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr
		4+4							4 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr
mit Über- leitung	zweistrei- fige RFB	2+0	1 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, nicht übergeleitet						
			1 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, übergeleitet						
		3+0	2 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, nicht übergeleitet						
		3+1		2 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, z. T. übergeleitet					
				2 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, nicht übergeleitet					
		4+0	2 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, übergeleitet						
	dreistrei- fige RFB	4+0	2 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, nicht übergeleitet						
			2 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, übergeleitet						
		4+1		2 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, z. T. übergeleitet					
				3 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, nicht übergeleitet					
		4+2		3 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, z. T. übergeleitet					
				2 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, übergeleitet					
		5+0	3 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, nicht übergeleitet						
		5+1		3 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, z. T. übergeleitet					
				3 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, nicht übergeleitet					
		6+0	3 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, übergeleitet						
	vierstrei- fige RFB	6+2		4 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, nicht übergeleitet					
				4 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, z. T. übergeleitet					
				4 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, übergeleitet					

*Anmerkung des Herausgebers:
Die Werte werden nicht veröffentlicht.*

¹⁾ Basis-Unfallrate für den Arbeitsstelleninnenbereich (UR_{In,B}) gilt für Fahrstreifenbreiten B_{HFS} ≥ 3,25 m (Hauptfahrstreifen) und 2,60 m ≤ B_{UF5} < 2,75 m (Überholfahrstreifen) sowie V_{Zul} = 80 km/h.

Tab. 9-12: Vorgeschlagene standardisierte mittlere richtungsbezogene Unfallraten für beeinflussten Verkehr in Arbeitsstellen längerer Dauer

Die Anzahl der Unfälle mit Personenschaden in einer Fahrtrichtung einer Arbeitsstelle längerer Dauer ergibt sich aus der Anzahl aller Unfälle in einer Fahrtrichtung zu:

$$n_{U(P),ARI} = n_{U,ARI} \cdot f_{UP} \quad (9-15)$$

mit:

$$n_{U(P),ARI} = \text{Anzahl der Unfälle mit Personenschaden in der betrachteten Fahrtrichtung} \quad [U(P)]$$

$$n_{U,ARI} = \text{Anzahl der Unfälle in der betrachteten Fahrtrichtung} \quad [U]$$

$$f_{UP} = \text{Anteilsfaktor der Unfälle mit Personenschaden nach Tabelle 9-13 bzw. Tabelle 9-14} \quad [-]$$

Verkehrsführung (unbeeinflusster Verkehr)		V_{zul} [km/h]	f_{UP} [-]
2+1 2+2	2 Fahrstreifen mit Seitenstreifen	frei bzw. 130	<i>Anmerkung des Herausgebers: Die Werte werden nicht veröffentlicht.</i>
		120	
		≤ 100	
	2 Fahrstreifen ohne Seitenstreifen	frei bzw. 130	
		120	
		≤ 100	
3+2 3+3	3 Fahrstreifen	frei bzw. 130	
		120	
		≤ 100	
4+3 4+4	4 Fahrstreifen	frei bzw. 130	
		120	
		≤ 100	

Tab. 9-13: Anteilsfaktor der Unfälle mit Personenschaden für unbeeinflussten Verkehr in Arbeitsstellen längerer Dauer

Verkehrsführung (beeinflusster Verkehr)			Fahrstreifenanzahl und Führung in betrachteter Richtung im Arbeitsstelleninnenbereich		f _{UP} [-]			
					Zulauf	Verschwenkung bzw. Überleitung	Innenbereich	Rückverschwenkung bzw. Rückleitung
ohne Überleitung	zweistreifige RFB	1+1	1 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr		<i>Anmerkung des Herausgebers: Die Werte werden nicht veröffentlicht.</i>			
		2+1						
		2+2	2 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr					
	dreistreifige RFB	3+2	2 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr					
		3+3	3 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr					
	vierstreifige RFB	4+3	3 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr					
4+4		4 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr						
mit Überleitung	zweistreifige RFB	2+0	1 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, nicht übergeleitet					
			1 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, übergeleitet					
		3+0	2 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, nicht übergeleitet					
			2 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, z. T. übergeleitet					
		4+0	2 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, nicht übergeleitet					
			2 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, übergeleitet					
	dreistreifige RFB	4+0	2 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, nicht übergeleitet					
			2 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, übergeleitet					
		4+1	2 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, z. T. übergeleitet					
			3 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, nicht übergeleitet					
		4+2	3 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, z. T. übergeleitet					
			2 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, übergeleitet					
		5+0	3 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, nicht übergeleitet					
			3 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, z. T. übergeleitet					
	6+0	3 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, nicht übergeleitet						
		3 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, übergeleitet						
	vierstreifige RFB	6+2	4 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, nicht übergeleitet					
			4 Fahrstreifen, beeinflusster Verkehr, z. T. übergeleitet					

Tab. 9-14: Anteilfaktor der Unfälle mit Personenschaden für beeinflussten Verkehr in Arbeitsstellen längerer Dauer

Die Anzahl der Unfälle mit Sachschaden in einer Fahrtrichtung ergibt sich zu:

$$n_{U(S),ARi} = n_{U,ARi} - n_{U(P),ARi} \quad (9-16)$$

mit:

$$n_{U(S),ARi} = \text{Anzahl der Unfälle mit Sachschaden in der betrachteten Fahrtrichtung} \quad [U(S)]$$

$$n_{U,ARi} = \text{Anzahl der Unfälle in der betrachteten Fahrtrichtung} \quad [U]$$

$$n_{U(P),ARi} = \text{Anzahl der Unfälle mit Personenschaden in der betrachteten Fahrtrichtung} \quad [U(P)]$$

9.3.4 Unfallkosten einer Arbeitsstelle kürzerer Dauer

Die Ermittlung der Unfallkosten von Arbeitsstellen kürzerer Dauer bezieht sich ausschließlich auf stationäre Arbeitsstellen. Dabei wird zwischen Tages- und Nachtbaustellen unterschieden. Als Tagesbaustellen sind Arbeitsstellen kürzerer Dauer definiert, deren Einrichtungszeitraum von April bis September zwischen 6 und 21 Uhr und von Oktober bis März zwischen 8 und 18 Uhr liegt. Nachtbaustellen sind dementsprechend Arbeitsstellen kürzerer Dauer mit einem Einrichtungszeitraum von April bis September zwischen 21 und 6 Uhr bzw. von Oktober bis März zwischen 18 und 8 Uhr.

Die Unfallkosten einer Arbeitsstelle kürzerer Dauer ergeben sich zu:

$$UK_{AKD} = (UKR_{ZB} \cdot 2,0 + UKR_{AB} \cdot L_{AKD,g}) \cdot DTV_{RFB} \cdot \frac{\sum p_{tA}}{100} \cdot 10^{-3} \quad (9-17)$$

mit:

$$UK_{AKD} = \text{Unfallkosten der betrachteten Arbeitsstelle kürzerer Dauer} \quad [€]$$

$$UKR_{ZB} = \text{Unfallkostenrate für den Zulaufbereich nach Tabelle 9-15} \quad [€/(1.000 \text{ Kfz} \cdot \text{km})]$$

$$UKR_{AB} = \text{Unfallkostenrate für den Arbeitsstellenbereich nach Tabelle 9-15} \quad [€/(1.000 \text{ Kfz} \cdot \text{km})]$$

$$L_{AKD,g} = \text{gemeldete Arbeitsstellenlänge (ab fahrbarer Abstelltafel)} \quad [\text{km}]$$

$$DTV_{RFB} = \text{durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke der betrachteten Fahrtrichtung} \quad [\text{Kfz/d}]$$

$$\sum p_{tA} = \text{Summe der Anteilswerte der stündlichen Verkehrsstärken am DTV}_{RFB} \text{ während des Einrichtungszeitraums (Dauer) der Arbeitsstelle} \quad [\%]$$

Verkehrsführung		Unfallkostenrate [€/(1.000 Kfz · km)] Preisstand 2010			
RFB	Bezeichnung	Tagesbaustelle		Nachtbaustelle	
		Zulaufbereich	Arbeitsstellenbereich	Zulaufbereich	Arbeitsstellenbereich
		UKR _{ZB}	UKR _{AB}	UKR _{ZB}	UKR _{AB}
zweistreifige RFB	2VF0	<i>Anmerkung des Herausgebers: Die Werte werden nicht veröffentlicht.</i>			
	2VF1				
	2VF2				
	2VF3				
	2VF4				
	2VF10				
dreistreifige RFB	3VF0				
	3VF5				
	3VF6				
	3VF7				
	3VF8				
	3VF9				
vierstreifige RFB	3VF11				
	4VF0				
	4VF12				
	4VF13				
	4VF14				
	4VF15				
	4VF16				
4VF17					

Tab. 9-15: Vorgeschlagene standardisierte mittlere Unfallkostenraten für Arbeitsstellen kürzerer Dauer

9.3.5 Anzahl der Unfälle in einer Arbeitsstelle kürzerer Dauer

Die Anzahl der Unfälle in Arbeitsstellen kürzerer Dauer bezieht sich ausschließlich auf stationäre Arbeitsstellen. Dabei wird zwischen Tages- und Nachtbaustellen unterschieden. Als Tagesbaustellen sind Arbeitsstellen kürzerer Dauer definiert, deren Einrichtungszeitraum von April bis September zwischen 6 und 21 Uhr und von Oktober bis März zwischen 8 und 18 Uhr liegt. Nachtbaustellen sind dementsprechend Arbeitsstellen kürzerer Dauer mit einem Einrichtungszeitraum von April bis September zwischen 21 und 6 Uhr bzw. von Oktober bis März zwischen 18 und 8 Uhr.

Es wird aufgrund der zu erwartenden unterschiedlichen Ausprägung der Beeinträchtigung des Verkehrsablaufs nach Unfällen mit Personenschaden und Unfällen mit Sachschaden differenziert. Zunächst ist die Anzahl aller Unfälle zu ermitteln und anschließend die anteilige Anzahl der Unfälle mit Personenschaden und bzw. mit Sachschaden.

Die Anzahl der Unfälle in einer Arbeitsstelle kürzerer Dauer ergibt sich zu:

$$n_{U,AKD} = (UR_{ZB} \cdot 2,0 + UR_{AB} \cdot L_{AKD,g}) \cdot DTV_{RFB} \cdot \frac{\sum p_{tA}}{100} \cdot 10^{-6} \quad (9-18)$$

mit:

$n_{U,AkD}$ = Anzahl der Unfälle in der betrachteten Arbeitsstelle kürzerer Dauer [U]

UR_{ZB} = Unfallrate für den Zulaufbereich nach Tabelle 9-16 [U/(10⁶ Kfz · km)]

UR_{AB} = Unfallrate für den Arbeitsstellenbereich nach Tabelle 9-16 [U/(10⁶ Kfz · km)]

$L_{AkD,g}$ = gemeldete Arbeitsstellenlänge (ab fahrbarer Absperrtafel) [km]

DTV_{RFB} = durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke der betrachteten Fahrtrichtung [Kfz/d]

Σp_{tA} = Summe der Anteilswerte der stündlichen Verkehrsstärken am DTV_{RFB} während des Einrichtungszeitraums (Dauer) der Arbeitsstelle [%]

Verkehrsführung		Unfallrate [€/ (10 ⁶ Kfz · km)]			
RFB	Bezeichnung	Tagesbaustelle		Nachtbaustelle	
		Zulaufbereich	Arbeitsstellenbereich	Zulaufbereich	Arbeitsstellenbereich
		UR_{ZB}	UR_{AB}	UR_{ZB}	UR_{AB}
zweistreifige RFB	2VF0	<i>Anmerkung des Herausgebers: Die Werte werden nicht veröffentlicht.</i>			
	2VF1				
	2VF2				
	2VF3				
	2VF4				
	2VF10				
dreistreifige RFB	3VF0				
	3VF5				
	3VF6				
	3VF7				
	3VF8				
	3VF9				
vierstreifige RFB	3VF11				
	4VF0				
	4VF12				
	4VF13				
	4VF14				
	4VF15				
	4VF16				
4VF17					

Tab. 9-16: Vorgeschlagene standardisierte mittlere Unfallraten für Arbeitsstellen kürzerer Dauer

Die Anzahl der Unfälle mit Personenschaden in einer Arbeitsstelle kürzerer Dauer ergibt sich aus der Anzahl aller Unfälle zu:

$$n_{U(P),AkD} = n_{U,AkD} \cdot f_{UP} \quad (9-19)$$

mit:

$n_{U(P),AkD}$ = Anzahl der Unfälle mit Personenschaden in der betrachteten Arbeitsstelle kürzerer Dauer [U(P)]

$n_{U,AkD}$ = Anzahl der Unfälle in der betrachteten Arbeitsstelle kürzerer Dauer [U]

f_{UP} = Anteilsfaktor der Unfälle mit Personenschaden nach Tabelle 9-17 [-]

Verkehrsführung		f_{UP} [-]			
RFB	Bezeichnung	Tagesbaustelle		Nachtbaustelle	
		Zulaufbereich	Arbeitsstellenbereich	Zulaufbereich	Arbeitsstellenbereich
zweistreifige RFB	2VF0	<i>Anmerkung des Herausgebers: Die Werte werden nicht veröffentlicht.</i>			
	2VF1				
	2VF2				
	2VF3				
	2VF4				
	2VF10				
dreistreifige RFB	3VF0				
	3VF5				
	3VF6				
	3VF7				
	3VF8				
	3VF9				
	3VF11				
vierstreifige RFB	4VF0				
	4VF12				
	4VF13				
	4VF14				
	4VF15				
	4VF16				
	4VF17				

Tab. 9-17: Anteilsfaktor der Unfälle mit Personenschaden für Arbeitsstellen kürzerer Dauer

Die Anzahl der Unfälle mit Sachschaden in einer Arbeitsstelle kürzerer Dauer ergibt sich zu:

$$n_{U(S),AkD} = n_{U,AkD} - n_{U(P),AkD} \quad (9-20)$$

mit:

$n_{U(S),A}$ = Anzahl der Unfälle mit Sachschaden in der betrachteten Arbeitsstelle kürzerer Dauer [U(S)]

$n_{U,AkD}$ = Anzahl der Unfälle in der betrachteten Arbeitsstelle kürzerer Dauer [U]

$n_{U(P),AkD}$ = Anzahl der Unfälle mit Personenschaden in der betrachteten Arbeitsstelle kürzerer Dauer [U(P)]

10 Zusammenfassung

Im Vorfeld der Arbeitsstelleneinrichtung stellen die Bewertung des Verkehrsablaufs und der Verkehrssicherheit ein wichtiges Mittel zur Minimierung der Beeinträchtigungen des Verkehrsablaufs und zur sicheren Durchführung einer Arbeitsstelle im Rahmen der Baubetriebsplanung dar. Bislang werden die verkehrlichen Auswirkungen einer Arbeitsstelle längerer Dauer mit einem überschlägigen Bewertungsverfahren nach dem Leitfaden zum Arbeitsstellenmanagement auf Bundesautobahnen (BMVBS, 2011a) ermittelt, das noch weitgehend mit der Verfahren der Richtlinien zur Baubetriebsplanung auf Bundesautobahnen (RBAP, BMV, 1996) übereinstimmt. Die zu erwartenden Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit werden dabei nicht berücksichtigt. Auch ein einheitliches Verfahren zur Bewertung von Arbeitsstellen kürzerer Dauer existiert bisher nicht. Zukünftig soll das sogenannte Verkehrsanalyse-System (VAS) für die Baubetriebsplanung eingesetzt werden, welches eine ganzheitliche und standardisierte Bewertung des Verkehrsablaufs und der Verkehrssicherheit ermöglichen soll. In der vorliegenden Untersuchung wurden hierfür benötigte Kapazitätswerte, q-v-Diagramme, Unfallraten und Unfallkostenraten für Arbeitsstellen längerer und kürzerer Dauer unter unterschiedlichen Randbedingungen auf der Grundlage umfassender empirischer Erhebungen ermittelt.

Ausgangspunkt der Untersuchungen war eine statistische Auswertung der häufigsten Verkehrsführungen von Arbeitsstellen auf Bundesautobahnen in den Jahren 2003 bis 2012, die als Grundlage für die Auswahl eines geeigneten Untersuchungskollektivs diente. Darüber hinaus wurden nationale und internationale Quellen zum Verkehrsablauf und zur Verkehrssicherheit in Arbeitsstellen längerer und kürzerer Dauer analysiert sowie die theoretischen Grundlagen zur Ermittlung von Verkehrsablauf- und Unfallkenngrößen dokumentiert.

Die empirische Grundlage der Verkehrsablaufuntersuchungen sowohl für Arbeitsstellen längerer als auch kürzerer Dauer bildeten Verkehrsdaten von Dauerzählstellen im Zulauf zu Arbeitsstellen. Hierzu wurde für ca. 500 Arbeitsstellen längerer Dauer in Nordrhein-Westfalen, Hessen, Bayern, Rheinland-Pfalz und Niedersachsen sowie 1.200 Arbeitsstellen kürzerer Dauer in Nordrhein-Westfalen überprüft, ob Zählstellen im Zulauf zu den Arbeitsstellen oder innerhalb der Arbeitsstellen verfügbar waren. Die Daten der geeigneten Zählstellen wurden daraufhin auf Plausibilität und das Ausmaß der Überlastungen überprüft. Für eine Kapazitätsanalyse waren 66 Richtungsverkehrsführungen von Arbeitsstellen längerer Dauer und 156 Arbeitsstellen kürzerer Dauer geeignet. In die Analyse des Zusammenhangs zwischen der Verkehrsstärke und der Geschwindigkeit innerhalb von Arbeitsstellen konnten 28 Richtungsverkehrsführungen einbezogen werden.

Die Ermittlung der Kapazitäten an Arbeitsstellen längerer Dauer orientierte sich an der Methodik zur Herleitung der Kapazitätswerte im Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS; FGSV, 2015). Zum einen erfolgte eine Analyse der Kapazität im q-v-Diagramm in Stunden-Intervallen durch Anpassung des Verkehrsflussmodells nach VAN AERDE (1995). Zum anderen wurden stochastische Verfahren zur Ermittlung von Verteilungsfunktionen der Kapazität in 5-Minuten-Intervallen angewandt. Auf der Grundlage vergleichender Analysen der Kapazitätsverteilung und der Kapazität im q-v-Diagramm wurde das 5. Perzentil der Verteilungsfunktion als Nennwert der Kapazität für die Ableitung standardisierter Kapazitätswerte zugrunde gelegt. Zusätzlich wurde das 99. Perzentil der in Stunden-Intervallen gemessenen Verkehrsstärken als obere Vertrauensgrenze der Kapazitätsschätzung angesetzt. Insgesamt konnten so für 40 Arbeitsstellen längerer Dauer Kapazitäten bestimmt werden. An den anderen Arbeitsstellen des Untersuchungskollektivs

traten in der Regel nicht genug Zusammenbrüche auf, um aussagekräftige Schätzwerte der Kapazität zu erhalten.

Mit dieser Datengrundlage wurden – in Anlehnung an das RBAP-Verfahren – mithilfe von Optimierungsverfahren die Grundkapazität und Abminderungsfaktoren für verschiedene Randbedingungen ermittelt. Als mögliche Einflussgrößen wurden das Vorhandensein von Fahrstreifenreduktionen, Fahrstreifenüberleitungen und Fahrbahnteilungen, die Fahrstreifenbreiten, die zulässige Höchstgeschwindigkeit, die Lage der Arbeitsstelle innerhalb oder außerhalb von Ballungsräumen sowie der Schwerverkehrsanteil und die Längsneigung in drei Steigungsklassen analysiert. Als maßgebende Einflussgrößen wurden schließlich

- die Lage der Autobahn innerhalb oder außerhalb von Ballungsräumen,
- das Vorhandensein einer Fahrbahnteilung, d. h. einer getrennten Führung der Fahrstreifen auf einer Richtungsfahrbahn, abhängig von der Fahrstreifenanzahl,
- die Fahrstreifenbreiten, unterteilt in drei Breitenklassen,
- die Längsneigung, unterteilt in drei Steigungsklassen, sowie
- der SV-Anteil

identifiziert. Im Gegensatz zu dem in den RBAP und im Leitfaden vorgegebenen Verfahren werden zur Umrechnung der Kapazität von Pkw-E/h in Kfz/h keine steigungsabhängigen Geländefaktoren, sondern ein von der Steigung unabhängiger Pkw-Gleichwert angewendet, welcher ebenfalls mit Optimierungsverfahren ermittelt wurde. Die Steigung wird ebenso wie die übrigen Einflussgrößen mit einem Abminderungsfaktor berücksichtigt. Im Ergebnis wird ein Modell zur Ermittlung der Kapazität in Kfz/h in Abhängigkeit von den maßgebenden Einflussgrößen angegeben. Die bisher im RBAP-Verfahren sowie im Leitfaden und weiteren Untersuchungen berücksichtigten Einflüsse einer Fahrstreifenreduktion und einer Fahrstreifenüberleitung auf die Kapazität von Arbeitsstellen konnten anhand des Untersuchungskollektivs nicht bestätigt werden. Ein Vergleich mit den Kapazitätsmodellen aus früheren Untersuchungen zeigte, dass sich die Modelle sowohl hinsichtlich der Modellansätze als auch hinsichtlich der berücksichtigten Einflussgrößen unterscheiden. Dennoch sind die ermittelten Kapazitäten durchaus vergleichbar. Tendenziell liefert das entwickelte Kapazitätsmodell bei niedrigen SV-Anteilen etwas höhere Kapazitäten als die bisher vorhandenen Modelle. Der größte Unterschied im Vergleich zu früheren Untersuchungen ist die Berücksichtigung der Fahrbahnteilung als Einflussgröße im Kapazitätsmodell. Obwohl auch bei früheren Untersuchungen bei Arbeitsstellen mit Fahrbahnteilung häufig geringere Kapazitäten ermittelt wurden als bei Arbeitsstellen ohne Fahrbahnteilung, wurde dies bisher nie auf die Fahrbahnteilung zurückgeführt. Gründe für einen Einfluss der Fahrbahnteilung können strategische Fahrstreifenwechsel im Zulauf zur Arbeitsstelle aufgrund unterschiedlicher Präferenzen der Verkehrsteilnehmer hinsichtlich der Fahrstreifenwahl und ungleichmäßige Fahrstreifenaufteilungen aufgrund von Anschlussstellen innerhalb der Arbeitsstelle, die nur über den rechten Fahrstreifen erreichbar sind, sein. Anhand der Untersuchungen konnte weiterhin festgestellt werden, dass der Einfluss der Fahrbahnteilung auf die Kapazität bei zweistreifigen Richtungsverkehrsführungen etwas größer ist als bei dreistreifigen Richtungsverkehrsführungen. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass im Untersuchungskollektiv nur 1+3- und 2+4-, jedoch keine 1+5-Verkehrsführungen vorlagen. Vierstreifige Richtungsverkehrsführungen mit Fahrbahnteilung (z. B. 2+6) konnten ebenfalls nicht untersucht werden.

Die Analyse des Zusammenhangs zwischen der Verkehrsstärke und der Geschwindigkeit im Arbeitsstelleninnenbereich orientierte sich an der Methodik zur Herleitung der q-v-Dia-

gramme im HBS (FGSV, 2015). Ziel war die Ermittlung von standardisierten q-v-Diagrammen für den Zustand des fließenden Verkehrs. Hierfür wurden für alle 28 Arbeitsstellen des Untersuchungskollektivs auf der Grundlage des Verkehrsflussmodells nach BRILON und PONZLET (1995) die Geschwindigkeit im freien Verkehr $v(q = 0)$ und die Neigung der q-v-Beziehung im freien Verkehr $v'(q = 0)$ ermittelt. Als relevante Einflussgrößen auf die Geschwindigkeit wurden auf dieser Grundlage und anhand von Plausibilitätsüberlegungen die Anzahl der Fahrstreifen, die zulässige Höchstgeschwindigkeit, der SV-Anteil und die Steigung festgelegt. Anhand der ermittelten Kenngrößen $v(q = 0)$ und $v'(q = 0)$ sowie der festgelegten kritischen Geschwindigkeit bei Erreichen der Kapazität v_{krit} erfolgte eine Optimierung der Modellparameter V_0 und L_0 . Im Gegensatz zu den q-v-Diagrammen des HBS (FGSV, 2015), die für eine feste Anzahl an Kapazitätswerten für alle Kombinationen der maßgebenden Streckenparameter angegeben werden, ergibt sich durch die Berücksichtigung des SV-Anteils als Eingangsgröße in dem entwickelten Kapazitätsmodell für Arbeitsstellen eine unbegrenzte Zahl möglicher Kapazitätswerte. Aus diesem Grund wird der Parameter C_0 in Abhängigkeit von der Kapazität C nach dem Kapazitätsmodell und den Parametern V_0 , L_0 und v_{krit} berechnet und konnte nicht im Rahmen des Optimierungsprozesses unabhängig angepasst werden. Für die Modellparameter V_0 und L_0 sowie die kritische Geschwindigkeit bei Erreichen der Kapazität v_{krit} werden im Ergebnis der Modelloptimierung Tabellenwerte angegeben.

Die Ermittlung der Kapazität an Arbeitsstellen kürzerer Dauer konnte nicht in derselben Form erfolgen wie bei Arbeitsstellen längerer Dauer. Während bei Arbeitsstellen längerer Dauer regelmäßig Zusammenbrüche des Verkehrsflusses auftreten, ruft eine Arbeitsstelle kürzerer Dauer in der Regel nur einen Verkehrszusammenbruch zum Zeitpunkt der Einrichtung der Arbeitsstelle hervor. Zudem entspricht die Verkehrsstärke vor dem Zusammenbruch in der Regel nicht der Kapazität, sondern der Verkehrsnachfrage unmittelbar vor der Einrichtung der Arbeitsstelle. Aus diesem Grund wurde an Arbeitsstellen kürzerer Dauer die Verkehrsstärke im Stauabfluss analysiert. Insgesamt konnte in 111 Fällen die mittlere Verkehrsstärke im Stauabfluss als Schätzwert der Kapazität bestimmt werden. Auf der Grundlage statistischer Betrachtungen und Regressionsanalysen wurden

- die Lage der Autobahn innerhalb oder außerhalb von Ballungsräumen und
- die Seite des Fahrstreifeneinzugs

als maßgebliche Einflussgrößen auf die Kapazität identifiziert. Die ebenfalls analysierten Einflussgrößen SV-Anteil, Wochentag und Tageszeit hatten hingegen keinen anhand des Untersuchungskollektivs nachweisbaren Einfluss auf die Kapazität. Ergänzend wurden für Verkehrsführungen mit einer Verengung von Fahrstreifen oder Verschwenkungen der Autobahn sowie für Steigungsstrecken, die im Rahmen der empirischen Untersuchungen nicht beobachtet werden konnten, auf Grundlage von Analogieschlüssen die Auswirkungen auf die Kapazität geschätzt. Im Ergebnis wird ein Modell zur Ermittlung der Kapazität in Kfz/h in Abhängigkeit von den maßgebenden Einflussgrößen angegeben. Ein Vergleich mit früheren Untersuchungen zeigte sowohl in den Modellansätzen als auch hinsichtlich der berücksichtigten Einflussgrößen Unterschiede. Dennoch sind die ermittelten Kapazitäten durchaus vergleichbar. Tendenziell liefert das entwickelte Kapazitätsmodell bei niedrigen SV-Anteilen etwas geringere Kapazitäten. Dadurch, dass im entwickelten Modell der SV-Anteil keinen Einfluss hat, ändert sich dies jedoch bei zunehmenden SV-Anteilen.

Neben der Auswertung der Daten von Dauerzählstellen wurden Verkehrsmessungen in 14 Richtungsverkehrsführungen von Arbeitsstellen längerer Dauer durchgeführt, um Parameter des Verkehrsablaufs im Arbeitsstelleninnenbereich erheben zu können. Darüber hinaus sollte anhand von Simulationsstudien der Einfluss von hohen SV-Anteilen und Steigungen

auf die Kapazität an Arbeitsstellen längerer Dauer untersucht werden. Die Ergebnisse der Verkehrsmessungen dienten dabei als Kalibrierungsgrößen für die mikroskopische Simulation des Verkehrsablaufs in Arbeitsstellen.

Im Rahmen der Simulationsstudien konnte der empirisch ermittelte Einfluss von starken Steigungen auf die Kapazität von Arbeitsstellen in seiner Größenordnung reproduziert werden. Die ebenfalls analysierten Auswirkungen hoher SV-Anteile auf die Kapazität waren in der Simulation allerdings geringer als in der Empirie. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass das verwendete Simulationsprogramm BABSIM – wie alle einschlägigen mikroskopischen Simulationsmodelle – kein arbeitsstellenspezifisches Fahrverhaltensmodell enthält, mit dem z. B. die Vermeidung von Überholvorgängen auf schmalen Behelfsfahrstreifen nachgebildet werden kann. Die zur Verfügung stehenden Parameter zur Nachbildung des Überholverhaltens auf der freien Strecke reichen für eine zufriedenstellende Anpassung dieser spezifischen Fahrzeuginteraktionen im Arbeitsstelleninnenbereich nicht aus.

Bei den Untersuchungen zur Verkehrssicherheit wurden ebenfalls Arbeitsstellen längerer Dauer und Arbeitsstellen kürzerer Dauer betrachtet. Die Bezugsebene der Untersuchungen stellten arbeitsstellenbezogene Daten dar. Hierzu gehören Angaben zur Einrichtung einer Arbeitsstelle, zur örtlichen und zeitlichen Lokalisierung der Arbeitsstelle sowie zur Verkehrsführung. Alle arbeitsstellenbezogenen Daten wurden in eine Arbeitsstellendatenbank aufgenommen. Grundlegend für die Ermittlung der Unfallkenngrößen waren die Unfälle in den Arbeitsstellen bzw. in einzelnen Bereichen innerhalb der Arbeitsstellen mit Angabe zu Unfalldatum und -uhrzeit, Unfallort (auf Autobahnen über den Betriebs-km und die Fahrtrichtung), Unfallkategorie sowie Anzahl der Verunglückten nach Verletzungsschwere (bei Unfällen mit Personenschaden). Diese Angaben wurden in eine Unfalldatenbank aufgenommen. Die zur Ermittlung der relevanten Unfallkenngrößen – hier Unfallraten und Unfallkostenraten – erforderlichen Angaben zur Fahrleistung in der jeweiligen Arbeitsstelle wurden auf Grundlage der Daten von Dauerzählstellen der Bundesanstalt für Straßenwesen bestimmt.

Bei Arbeitsstellen längerer Dauer erfolgte eine Betrachtung des Unfallgeschehens in den Teilbereichen Zulauf, Überleitung bzw. Verschwenkung, Innenbereich und Rückleitung bzw. Rückverschwenkung. Für diese Bereiche wurden, aufbauend auf einer Analyse der Unfall- und der Verunglücktenstruktur sowie der Berechnung der Unfallkosten, differenzierte richtungsbezogene Unfallkostenraten bestimmt. Dabei erfolgte eine gesonderte Betrachtung unterschiedlicher Verkehrsführungen. Zusätzlich zu den Unfallkostenraten wurden jeweils auch die Unfallraten bestimmt. Diese können als Kenngröße der Häufigkeit von unfallbedingten Störungen des Verkehrsablaufs herangezogen werden.

Insgesamt wurden 175 Arbeitsstellen längerer Dauer in die Unfallanalyse einbezogen. Für alle Arbeitsstellen lagen die Daten zu Unfällen mit Personenschaden (Kategorien 1-3) vor. Da für einige Arbeitsstellen jedoch keine Angaben zu den Unfällen mit leichtem Sachschaden (Kategorie 5) verfügbar waren, wurden die Unfallraten und Unfallkostenraten nur für ein reduziertes Kollektiv von 141 Arbeitsstellen längerer Dauer ermittelt. Mit diesen 141 Arbeitsstellen wurden sechs unterschiedliche Verkehrsführungen ohne Überleitung und zehn unterschiedliche Verkehrsführungen mit Überleitung einbezogen.

Auf der Grundlage der mittleren richtungsbezogenen Unfallkostenraten wurden – unter Hinzuziehung der Ergebnisse aus früheren Untersuchungen – standardisierte Unfallkostenraten für die definierten Bereiche in Arbeitsstellen längerer Dauer vorgeschlagen. Diese Ableitung erfolgte zum einen durch eine teilweise zusammenfassende Betrachtung von Teilbereichen verschiedener Verkehrsführungen, die im Hinblick auf ihre Gestaltung – und damit den Verkehrsablauf und das Unfallgeschehen – als vergleichbar angesehen wurden

(z. B. der zweistreifige Zulauf bei 2+2-, 3+0-, 3+1- und 4+0-Verkehrsführungen). Zum anderen wurden Werte für Verkehrsführungen, die im betrachteten Kollektiv der 141 Arbeitsstellen nur in einem geringen Umfang oder gar nicht repräsentiert waren, anhand von Plausibilitätsüberlegungen und Analogieschlüssen gesetzt. Die Ableitung standardisierter Unfallraten erfolgte analog.

Bei Arbeitsstellen kürzerer Dauer wurden Tagesbaustellen und Nachtbaustellen gesondert betrachtet. Für diese erfolgte jeweils eine Analyse des Unfallgeschehens im Zulaufbereich sowie im Arbeitsstellenbereich selbst. Insgesamt wurden 20.745 Arbeitsstellen kürzerer Dauer in die Auswertung einbezogen, davon 16.991 Tagesbaustellen und 3.754 Nachtbaustellen. Bei 42 Tagesbaustellen und 107 Nachtbaustellen lag eine Vollsperrung vor, sodass diese Arbeitsstellen nicht weiter betrachtet wurden. Mit den betrachteten Arbeitsstellen kürzerer Dauer wurden sechs unterschiedliche Verkehrsführungen auf zweistreifigen Richtungsfahrbahnen, sieben Verkehrsführungen auf dreistreifigen Richtungsfahrbahnen und fünf Verkehrsführungen auf vierstreifigen Richtungsfahrbahnen einbezogen.

Auf der Grundlage der mittleren (richtungsbezogenen) Unfallkostenraten für die Zulauf- und Arbeitsstellenbereiche von Arbeitsstellen kürzerer Dauer wurden – unter Hinzuziehung der Ergebnisse aus früheren Untersuchungen – ebenfalls standardisierte Unfallkostenraten und Unfallraten abgeleitet. Diese Ableitung erfolgte durch eine teilweise zusammenfassende Betrachtung von einzelnen Verkehrsführungen, die im Hinblick auf ihre Gestaltung – und damit den Verkehrsablauf und das Unfallgeschehen – als vergleichbar angesehen werden, sowie anhand von Plausibilitätsüberlegungen und Analogieschlüssen.

Die Verkehrssicherheit wird über die Unfallkosten, die sich mit den Unfallkostenraten aus der Fahrleistung, als Produkt der Verkehrsstärke (DTV) und der Länge, ergeben, bewertet. Bei Arbeitsstellen längerer Dauer sind als wesentliche Einflussgrößen auf die Verkehrssicherheit – über ihre Länge und die Differenzierung nach den Teilbereichen Zulauf, Überleitung/Verschwenkung, Innenbereich und Rückleitung/Rückverschwenkung hinaus – die Verkehrsführung sowie zusätzlich die Fahrstreifenbreite und die zulässige Höchstgeschwindigkeit im Innenbereich zu nennen. Hier wirken sich geringere Breiten des Hauptfahrstreifens von unter 3,25 m negativ aus. Dieser kann in Kombination mit geringen Breiten des Überholfahrstreifens von unter 2,60 m auch nicht durch eine niedrigere zulässige Höchstgeschwindigkeit von 60 km/h anstelle der in der Regel nach den RSA anzuordnenden 80 km/h kompensiert werden, auch wenn sich die zulässige Höchstgeschwindigkeit von 60 km/h bei sonst gleichen Breiten dagegen positiv auswirkt. Die Unfallkostenraten und Unfallraten im Innenbereich sind insgesamt jedoch deutlich niedriger als in den übrigen Bereichen. Der Zulauf sowie die Verschwenkungen bzw. Überleitungen stellen bei den meisten Verkehrsführungen die unsichersten Bereiche einer Arbeitsstelle längerer Dauer dar. Infolgedessen ist eine Arbeitsstelle bei ansonsten gleichen Randbedingungen bzgl. DTV, Verkehrsführung sowie Fahrstreifenbreite und zulässiger Höchstgeschwindigkeit im Innenbereich mit zunehmender Länge relativ gesehen sicherer, da der Einfluss des Innenbereichs mit niedrigeren Unfallkostenraten gegenüber dem Einfluss der übrigen Bereiche mit höheren Unfallkostenraten – und konstanten Längen – zunimmt. Dies ist jedoch dahingehend einzuschränken, dass im Rahmen dieser Untersuchung überwiegend (zu rund 85 %) Arbeitsstellen längerer Dauer mit Längen bis zu 10 km betrachtet wurden, weniger als 1 % der betrachteten Arbeitsstellen waren länger als 15 km. Inwieweit sich sehr große Arbeitsstellenlängen auf das Unfallgeschehen auswirken, kann somit nicht abschließend beurteilt werden.

Bei Arbeitsstellen kürzerer Dauer ist als wesentliche arbeitsstellenseitige Einflussgröße auf die Verkehrssicherheit – über ihre Länge ab der fahrbaren Absperrtafel hinaus – die Ver-

kehrsführung zu nennen. Hier sind Verkehrsführungen mit Sperrung des Hauptfahrstreifens oder Sperrung des Hauptfahrstreifens und des ersten Überholfahrstreifens tendenziell unsicherer als solche mit Sperrung des Überholfahrstreifens oder mehrerer Überholfahrstreifen. Die Unfallkostenraten und Unfallraten im Zulaufbereich sind insbesondere bei Reduzierung der Fahrstreifenanzahl in der Arbeitsstelle höher als im Arbeitsstellenbereich selbst. Nachtbaustellen sind nicht generell unsicherer als Tagesbaustellen, dies hängt vielmehr von der Verkehrsführung ab.

Mit den Ergebnissen der Untersuchung liegen Vorschläge für standardisierte Kapazitätswerte, q-v-Diagramme, Unfallraten und Unfallkostenraten für Arbeitsstellen längerer und kürzerer Dauer auf Autobahnen vor, die in das Verkehrsanalyzesystem zur Bewertung der Auswirkungen von Arbeitsstellen auf den Verkehrsablauf und die Verkehrssicherheit einfließen können. Der Schwerpunkt der Anwendung des Verkehrsanalyzesystems liegt dabei vorerst im Variantenvergleich verschiedener Verkehrsführungen von Arbeitsstellen längerer Dauer. Die Berechnungen mit dem Verkehrsanalyzesystem liefern somit eine Entscheidungshilfe für die Wahl einer geeigneten Verkehrsführung unter Berücksichtigung der einbezogenen Bewertungskriterien. Die Ergebnisse der Untersuchung können auch darüber hinaus eine wichtige Grundlage für die optimierte Planung von Arbeitsstellen darstellen.

Literatur

ABRAMS, C. M.; WANG, J.J.: Planning and Scheduling Work Zone Traffic Control. Report FHWA-IP-81-6, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, 1981.

ADAC: Enge Fahrstreifen in Autobahn-Baustellen. ADAC – Zur Sache, ADAC e. V., Ressort Verkehr, München, 2015.

VAN AERDE, M.: A Single Regime Speed-Flow-Density Relationship for Freeways and Arterials. Proceedings of the 74th TRB Annual Meeting. Transportation Research Board, Washington D.C., 1995.

AL-KAISY, A.; HALL, F.: Examination of Effect of Driver Population at Freeway Reconstruction Zones. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1776, Washington D.C., 2001.

AULBACH, J.: Lichttechnische Gestaltung von Arbeitsstellen. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 679, Bonn, 1994.

BAIER, M. M.; KLEMPES-KOHNEN, A.; BARK, A.; BERGMANN, A.: Ermittlung und Zuordnung von Unfallkostenraten für Wirtschaftlichkeitsberechnungen. AP 6 „Unfallgeschehen“ zur Erarbeitung neuer Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil: Wirtschaftlichkeitsberechnungen (RAS-W), mit Aktualisierung der Nutzen- und Kostenkomponenten, Entwurf des Schlussberichts zum Forschungsprojekt 23.0009/2006 im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, Darmstadt/Aachen, 2015.

BAIER, M. M.; MESEBERG, H.-H.; KEMPER, D.: Empfehlungen zum Einsatz von Pfeilbaken in Arbeitsstellen längerer Dauer auf Autobahnen. Straßenverkehrstechnik, Heft 6/2007, Kirschbaum-Verlag, Bonn, 2010.

BANKS, J. H.: The Two-Capacity Phenomenon: Some Theoretical Issues. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1320, Washington D.C., 1991.

BARK, A.; KUTSCHERA, R.; BAIER, R.; KLEMPES-KOHNEN, A.: Handbuch der Verkehrssicherheit von Straßen. Schlussbericht zum Forschungsprojekt FE 03.389/2005/FGB im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Gießen/Aachen, 2008.

BECKMANN, A; ZACKOR, H.: Untersuchung und Eichung von Verfahren zur aktuellen Abschätzung von Staudauer und Staulängen infolge von Tages- und Dauerbaustellen auf Autobahnen. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 808, Bonn, 2001.

BMV: Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen (RSA). Bundesministerium für Verkehr (Hrsg.), Bonn, 1995.

BMV: Richtlinien zur Baubetriebsplanung auf Bundesautobahnen (RBAP). Bundesministerium für Verkehr (Hrsg.), Bonn, 1996.

BMV: Technische Lieferbedingungen für transportable Schutzeinrichtungen, Ausgabe 1997. Bundesministerium für Verkehr (Hrsg.), 1997.

BMVBS: Allgemeines Rundschreiben (ARS) Straßenbau Nr. 17/2009: Arbeitsstellen an Autobahnen – Regelungen für Nachtbaustellen. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn, 8. Dezember 2009.

- BMVBS: Leitfaden zum Arbeitsstellenmanagement auf Bundesautobahnen. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.), Bonn, 2011a.
- BMVBS: Ausführungshinweise zum Leitfaden zum Arbeitsstellenmanagement auf Bundesautobahnen. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.), Bonn, 2011b.
- BMVBS: Allgemeines Rundschreiben Straßenbau (ARS), Nr. 04/2011, Leitfaden zum Arbeitsstellenmanagement auf Bundesautobahnen. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 16.05.2011, Bonn, 2011c.
- BRILON, W.; GROSSMANN, M.; BLANKE, H.: Verfahren für die Berechnung der Leistungsfähigkeit und Qualität des Verkehrsablaufes auf Straßen. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 669, Bonn, 1993.
- BRILON, W.; PONZLET, M.: Application of Traffic Flow Models. Proceedings of the Workshop in Traffic and Granular Flow, World Scientific, Singapore, 1995.
- BRILON, W.; ZURLINDEN, H.: Überlastungswahrscheinlichkeiten und Verkehrsleistung als Bemessungskriterium für Straßenverkehrsanlagen. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 870, Bonn, 2003.
- BRILON, W.; GEISTEFELDT, J.; REGLER, M.: Reliability of Freeway Traffic Flow: A Stochastic Concept of Capacity. Proceedings of the 16th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, College Park, Maryland, 2005a.
- BRILON, W.; HARDING, J.; ERLEMANN, K.; SEIFAHRT, S.: Fortentwicklung und Bereitstellung eines bundeseinheitlichen Simulationsmodells für Bundesautobahnen. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 918, Bonn, 2005b.
- BRILON, W.; GEISTEFELDT, J.; REGLER, M.: Entwicklung von Zielgrößen für die Verkehrsbeflussung auf Bundesfernstraßen in Hessen. Schlussbericht zum Forschungsauftrag des Hessischen Landesamtes für Straßen- und Verkehrswesen – Verkehrszentrale Hessen, Lehrstuhl für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum, 2006.
- BRILON, W.; HARDING, J.; HARTMANN, D.; ERLEMANN, K.: Weiterentwicklung des bundeseinheitlichen Simulationsmodells für Bundesautobahnen. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 974, Bonn, 2007.
- BRILON, W.; GEISTEFELDT, J.: Überprüfung der Bemessungswerte des HBS für Autobahnabschnitte außerhalb der Knotenpunkte. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1033, Bonn, 2010.
- BRÜHNING, E.; VÖLKER, R.: Das Unfallrisiko im Straßenverkehr – Kenngrößen und ihre statistische Behandlung. Zeitschrift für Verkehrssicherheit 28, Heft 3, S. 106-117, 1982.
- DINER, E.: Auswirkungen von Arbeitsstellen in dichter Folge auf Verkehrssicherheit und Verkehrsablauf am Beispiel des Ausbauprojektes BAB 1 zwischen Hamburg und Bremen. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau der RWTH Aachen, 2011 (unveröffentlicht).
- DURTH, W., KLOTZ, S., STÖCKERT, R.: Sicherheit und Wirtschaftlichkeit von AkD („Tagesbaustellen“) auf Bundesautobahnen. Schlussbericht zum Forschungsprojekt FE 03.285/1995/FR im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Darmstadt, 1999.
- EDIE, L. C.: Car-Following and Steady State Theory for Non-Congested Traffic. Port of New York Authority, New York, 1961.

- EMDE, W.; HAMESTER, H.: Unfallgeschehen an Autobahnbaustellen, Informationen Verkehrsplanung und Straßenwesen der Universität der Bundeswehr München, Heft 14, München-Neubiberg, 1983.
- FGSV: Hinweise zur Methodik der Untersuchung von Straßenverkehrsunfällen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln, 1991.
- FGSV: Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln, 2001.
- FGSV: Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation – Grundlagen und Anwendung. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln, 2006.
- FGSV: Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln, 2008.
- FGSV: Begriffsbestimmungen, Teil: Verkehrsplanung, Straßenentwurf und Straßenbetrieb. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln, 2012.
- FGSV: Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln, 2015.
- FISCHER, L.; BRANNOLTE, U.: Sicherheitsbewertung von Maßnahmen zur Trennung des Gegenverkehrs in Arbeitsstellen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Unterreihe Verkehrstechnik, Heft V 142, Bergisch Gladbach, 2006.
- FITSCHEN, A.; KOSSMANN, I.: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2006. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Unterreihe Verkehrstechnik, Heft V 166, Bergisch Gladbach, 2008.
- GEISTEFELDT, J.: Schätzung von Reisezeiten auf Autobahnen unter Verwendung eines erweiterten Verkehrsflussmodells. Tagungsband zur HEUREKA '05 – Optimierung in Verkehr und Transport. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln, 2005.
- GEISTEFELDT, J.: Verkehrsablauf und Verkehrssicherheit auf Autobahnen mit vierstreifigen Richtungsfahrbahnen. Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum, Heft 30, Bochum, 2007.
- GEISTEFELDT, J.: Überprüfung der verkehrstechnischen Bemessungswerte des HBS für Autobahnen. Straßenverkehrstechnik, Heft 10/2009, Kirschbaum-Verlag, Bonn, 2009.
- GEISTEFELDT, J.; BRILON, W.: A Comparative Assessment of Stochastic Capacity Estimation Methods. In: Transportation and Traffic Theory 2009: Golden Jubilee, Proceedings of the 18th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, Hong Kong, 2009.
- GEISTEFELDT, J.: Ermittlung von Wunschgeschwindigkeiten für die mikroskopische Verkehrsflusssimulation. Tagungs-CD-ROM zur HEUREKA '11 – Optimierung in Verkehr und Transport. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln, 2011.
- GEISTEFELDT, J.: Neue Erkenntnisse zur Kapazität von Autobahnen. In: Festschrift zu Ehren von Prof. Prof. E. h. Dr.-Ing. Werner Brilon. Schriftenreihe Lehrstuhl für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum, Heft 38, Bochum, 2013.
- GEISTEFELDT, J.; HOHMANN, S.: Verfahren für die Bewertung des Verkehrsablaufs auf Autobahnen als Ganzjahresanalyse für unterschiedliche Randbedingungen. Schlussbericht zum Forschungsprojekt FE 01.0174/2011/HRB im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bochum, 2014.

- GREBE, N.; HANKE, H.: Verkehrssicherheit an kurzfristigen und beweglichen Arbeitsstellen auf Auto-bahnen. Straßenverkehrstechnik, Heft 3/1991, Kirschbaum-Verlag, Bonn, 1991.
- GREENBERG, H.: An Analysis of Traffic Flow. Operations Research, Vol. 7, No. 1, 1959.
- GREENSHIELDS, B. D.: A study of traffic capacity. Proceedings Highway Research Board, Vol. 14, 1934.
- HALL, F. L.; AGYEMANG-DUAH, K.: Freeway Capacity Drop and the Definition of Capacity. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1320, Washington D.C., 1991.
- HALL, F. L.; BRILON, W.: Comparison of Uncongested Speed-Flow Relationships Using Data from German Autobahns and North American Freeways. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1457, Washington D.C., 1994.
- HANKO, W.: Wie sicher können Autobahnbaustellen sein? Feste Baustellen von längerer Dauer auf Autobahnen, Tagungsband, Innsbruck, 1995.
- HEIKOOP, H.; HENKENS, N.: Recent developments and history of the Dutch HCM. Transportation Research Procedia, Volume 15, International Symposium on Enhancing Highway Performance (ISEHP), Berlin, 2016.
- HOFFMANN, G.; EICHHORN, J.; FRANZ, G.-M.; SCHWENCKE, K.-R.; ZMECK, D.: Auswirkungen von Reparatur-Baumaßnahmen auf der Bundesautobahn Stadtring Berlin auf den Verkehrsablauf und das Unfallgeschehen. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 329, Bonn, 1981.
- HOOGENDOORN, S.P.: Unified approach to estimating free speed distributions. Transportation Research B 39 (8), pp. 709-727, 2005.
- JIANG, Y.: Traffic Capacity, Speed and Queue-Discharge Rate of Indiana's Four-Lane Freeway Work Zones. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1657, Washington D.C., 1999.
- KAPLAN, E. L.; MEIER, P.: Nonparametric estimation from incomplete observations. Journal of the American Statistical Association, Vol. 53, Alexandria, 1958.
- KELLER, H.; SACHSE, T.: Einfluss des Bezugsintervalls in Fundamentaldiagrammen auf die zutreffende Beschreibung der Leistungsfähigkeit von Straßenabschnitten. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 614, 1992.
- KELLERMANN, G. (1997): Stau an Baustellen – ein vereinfachtes Berechnungsverfahren. Straße und Autobahn, Heft 7/1997, Kirschbaum-Verlag, Bonn.
- KEMPER, D.: Vergleichende Betrachtung der Sicherheit und Wirtschaftlichkeit von Arbeitsstellen kürzerer Dauer auf Autobahnen bei Tag und Nacht, Dissertation am Institut für Straßenwesen, Aachener Mitteilungen Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau, Heft 52, 2010.
- KEMPER, D.; OESER, M.; BAIER, M. M.; KLEMP-S-KOHNEN, A.; KATHMANN, T.; ROGGEN-DORF, S.: Auswirkungen einer Überkopfsignalisierung auf Verkehrsablauf und Sicherheit bei Arbeitsstellen kürzerer Dauer. Schlussbericht zum Forschungsprojekt FE 82.358/2008 im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, Aachen, 2012.
- KEMPER, D.; SÜMMERMANN, A.; OESER, M.; BAIER, M. M.; KLEMP-S-KOHNEN, A.: Sicherheitsbewertung von Arbeitsstellen mit Gegenverkehrstrennung, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Unterreihe Verkehrstechnik, Heft V 301, Bergisch Gladbach, 2018.

KLEIN, A.: Arbeitsstellen kürzerer Dauer in Baden-Württemberg – Modifizierte Absicherungen. Straßenbetriebsdienst 2003, Kolloquium am 9. und 10. September 2003, Karlsruhe.

KIM, T.; LOVELL, D. J.; PARACHA, J.: A New Methodology to Estimate Capacity for Freeway Work Zones. Proceedings of the 79th TRB Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington D.C., 2001.

KOCKELKE, W.; ROSSBANDER, E.: Untersuchungen zum Verkehrsverhalten und zur Verkehrssicherheit auf Autobahnbaustellen; Schriftenreihe Forschungsberichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bereich Unfallforschung, Heft 186, Bergisch Gladbach, 1988.

KRAMMES, R. A.; LOPEZ, G. O.: Updated Capacity Values for Short-Term Freeway Work Zone Lane Closures. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1442, Washington D.C., 1994.

LAUBE, M.: Verkehrsverhalten und Unfallgeschehen im Bereich von Autobahnbaustellen. Conference Paper, Zürich, 2001.

LEMKE, K.: Verkehrsablauf in Tunneln und dessen Auswirkungen auf die Wahl des Tunnelquerschnitts. Schriftenreihe Lehrstuhl für Verkehrswesen und Verkehrsmanagement, Ruhr-Universität Bochum, Heft 22, Bochum, 2000.

LEMKE, K.: Sicherheitswirkung 2- und 3-streifiger Regelquerschnitte auf BAB. Straßenverkehrstechnik, Heft 8/2007, Kirschbaum-Verlag, Bonn, 2007.

LEUTZBACH, W.: Einführung in die Theorie des Verkehrsflusses. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1972.

LOCHRANE, T.; AL-DEEK, H.; DANIEL, D.; BARED, J.: Living Laboratory for Freeway Operations: Case Study for Collecting Driver Behavior Data through Freeway Work Zones. Paper presented at the 93th TRB Annual Meeting, Washington D.C., 2014.

LOCHRANE, T.; AL-DEEK, H.; DANIEL, D.; KRAUSE, C.: A Multidimensional Psycho-Physical Car-Following Framework for Modeling Work Zone and Non-Work Zone Driver Behavior. Paper presented at the 94th TRB Annual Meeting, Washington D.C., 2015.

LORENZ, M. R.; ELEFTERIADOU, L.: A Probabilistic Approach to Defining Freeway Capacity and Breakdown. Proceedings of the 4th International Symposium on Highway Capacity, Transportation Research Board, Washington D.C., 2000.

MANN, H. B.; WHITNEY, D. R.: On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. Annals of mathematical Statistics, Volume 18, No. 1, 1947.

MATHEWS, D. H.: Traffic Management for major road works on dual-carriageways. PTRC 12th Summer Annual Meeting, Proceedings of Seminar L, 1984.

MAZE, T.; SCHROCK, S. D.; KAMYAB, A.: Capacity of Freeway Work Zone Lane Closures. Mid-Continent Transportation Symposium 2000 Proceedings, Iowa State University, Ames, 2000.

MESEBERG, H.-H.: Wirksamkeit vertikaler Leitelemente für Straßenarbeitsstellen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Unterreihe Verkehrstechnik, Heft V 49, Bergisch Gladbach, 1997.

NADLER, F., HANKO, W., SCHREFEL, J.: Verkehrssicherheit im Bereich von Baustellen auf Autobahnen. Straßenforschungsvorhaben Nr. 659 gefördert vom Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten, Straßenforschung Heft 372, Wien, 1988.

MINDERHOUD, M. M.; BOTMA, H.; BOVY, P. H. L.: Assessment of roadway capacity estimation methods. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1572, Washington D.C., 1997.

NORKAUER, A.: Beurteilung von Maßnahmen zur Staureduktion bei Arbeitsstellen kürzerer Dauer auf Bundesautobahnen. Veröffentlichungen des Institutes für Straßen und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe (TH), Heft 53, Karlsruhe, 2004.

OBB: Verkehrs- und Unfallgeschehen auf Straßen des überörtlichen Verkehrs in Bayern – Jahresbericht 2008. Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern (Hrsg.), München, 2009.

OBER-SUNDERMEIER, A.: Entwicklung eines Verfahrens zur Stauprognose an Engpässen auf Autobahnen unter besonderer Berücksichtigung von Arbeitsstellen. Schriftenreihe Verkehr, Heft 15, Universität Kassel, 2003.

OECD: Verkehrsführung und Verkehrssicherheit im Bereich von Baustellen. Bericht einer Arbeitsgruppe der OECD. Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement, Bundesamt für Straßenbau, Bern, 1990.

PERSAUD, B.; YAGAR, S.; BROWNLEE, R.: Exploration of the Breakdown Phenomenon in Freeway Traffic. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1634, Washington D.C., 1998.

PONZLET, M.: Dynamik der Leistungsfähigkeit von Autobahnen – Auswirkungen von systematischen und umfeldbedingten Schwankungen des Geschwindigkeitsverhaltens und deren Beschreibung in Verkehrsflussmodellen. Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum, Heft 16, 1996.

REGLER, M.: Verkehrsablauf und Kapazität auf Autobahnen. Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum, Heft 28, 2004.

RESSEL, W.: Untersuchungen zum Verkehrsablauf im Bereich der Leistungsfähigkeit an Baustellen auf Autobahnen. Informationen Verkehrsplanung und Straßenwesen, Heft 37, München, 1994.

RIJKSWATERSTAAT: Capaciteitswaarden Infrastructuur Autosnelwegen. Handboek versie 4, Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving (Hrsg.), 2015.

RUTISHAUSER G.; MÖGERLE, R.; KAUL, H.; KELLER, R.: Leistungsfähigkeit beim Fahrstreifenabbau auf Hochleistungsstraßen (FA 42/90). Bundesamt für Straßenbau, Heft 337, Bern, 1994.

SARASUA, W. A.; DAVIS, W. J.; CLARKE, D. B.; KOTTAPALLY, J.; MULUKUTLA, P.: Evaluation of Interstate Highway Capacity for Short-Term Work Zone Lane Closures. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1877, Washington D.C., 2004.

SCHMUCK, A.; BECKER, H.: Untersuchungen über Einflüsse auf baustellenbedingte geschwindigkeitsabhängige Anteile an den Straßennutzerkosten. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 421, Bonn, 1984.

SCHÖNBORN, H. D.; SCHULTE, W.: RSA Handbuch, Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen. Band 1: RSA mit Kommentar, 4. Auflage, Kirschbaum-Verlag, Stand 09.05.2012.

- SCHULZE, C.; EXNER, R.; SCHLAG, B.: Visuelle Leitwirkung von Pfeil- und Schraffenbaken – Simulatorstudie und Befragung. Straßenverkehrstechnik, Heft 9/2010, Kirschbaum-Verlag, Bonn, 2010.
- SPACEK, P., LAUBE, M., SANTEL, G.: Baustellen an Hochleistungsstrassen – Verkehrstechnische Maßnahmen zur Verbesserung der Sicherheit und des Verkehrsflusses. Schriftenreihe des Eidgenössischen Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Nr. 1124, Bundesamt für Straßen, Bern, 2005.
- SPARMANN, U.: Spurwechselforgänge auf zweispurigen BAB-Richtungsfahrbahnen. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 263, Bonn, 1978.
- STÖCKERT, R.: Auswirkungen von Arbeitsstellen kürzerer Dauer auf Autobahnen auf Sicherheit und Wirtschaftlichkeit des Verkehrsablaufs. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12: Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik, Nr. 457, VDI Verlag, Düsseldorf, 2001.
- STÖCKERT, R.; KLOTZ, S.: Sicherheit und Wirtschaftlichkeit von Arbeitsstellen kürzerer Dauer („Tagesbaustellen“) auf Bundesautobahnen. Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Straßenwesen, Darmstadt, 1999.
- SÜMMERMANN, A.: Verkehrssicherheits- und Verkehrsablaufuntersuchungen in Arbeitsstellen längerer Dauer auf Autobahnen in Deutschland. Dissertation an der Fakultät für Bauingenieurwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2012.
- SÜMMERMANN, A.; STEINAUER, B.: Neue Methoden zur Erhöhung der Verkehrssicherheit und Leistungsfähigkeit in Arbeitsstellen längerer Dauer. Straßenverkehrstechnik, Heft 8/2010, Kirschbaum-Verlag, Bonn, 2010.
- VSS: Signalisation von Baustellen auf Autobahnen und Autostrassen, Schweizer Norm 640 885c, Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (Hrsg.), Zürich, 1999.
- TRB: Highway Capacity Manual (HCM). Transportation Research Board (Hrsg.), 2000.
- TRB: Highway Capacity Manual (HCM). Transportation Research Board (Hrsg.), 2010.
- UNDERWOOD, R.T.: Speed, Volume and Density Relationships. Bureau of Highway Traffic, Yale University, 1960.
- VOLKENHOFF, T.; QUERDEL, C.; STEINAUER, B.: Das modifizierte Reißverschlussverfahren. Straßenverkehrstechnik, Heft 5/2010, Kirschbaum-Verlag, Bonn, 2010.
- WEINSPACH, K.: Verkehrssicherheit und Verkehrsablauf im Bereich von Baustellen auf Betriebsstrecken der Bundesautobahnen. Straße und Autobahn, Heft 7/1988, Kirschbaum-Verlag, Bonn, 1988.
- WIEDEMANN, R.: Simulation des Straßenverkehrsflusses. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, Heft 8, 1974.
- WOLTERECK, G.: Möglichkeiten und Grenzen beim Management von Tagesbaustellen. Workshop „Optimierung des Managements von Tagesbaustellen und Eigenregiearbeiten – weniger Staus auf Autobahnen“, München, 2001.
- YEOM, C.; HAJBABAIE, A.; SCHROEDER, B.; VAUGHAN, C.; XUAN, X.; ROUPHAIL, N.: Innovative Work Zone Capacity Models from Nationwide Field And Archival Sources. Paper presented at the 94th TRB Annual Meeting, Washington D.C., 2015.
- YOUSIF, S.: Motorway roadworks: effects on traffic operations. Highways and Transportations, GB, 2002.

ZIMMERMANN, M.; RIFFEL, S.; CHLOND, B.; WEISS, C.: Verbesserung des Verkehrsablaufs und der Verkehrssicherheit in Arbeitsstellen längerer Dauer auf Autobahnen durch neuartige Methoden. Schlussbericht zum Forschungsprojekt FE 03.0478/2011/OGB im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, Karlsruhe, 2016.

ZURLINDEN, H.: Ganzjahresanalyse des Verkehrsflusses auf Straßen. Schriftenreihe Lehrstuhl für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum, Heft 26, Bochum, 2003.

Bilder

Bild 1-1: Ablaufdiagramm Untersuchungskonzept	14
Bild 2-1: Darstellung der Verkehrsführungen für Arbeitsstellen längerer Dauer auf Autobahnen mit zwei- oder dreistreifigen Richtungsfahrbahnen (nach SCHÖNBORN und SCHULTE, 2012)	18
Bild 2-2: Verkehrsführungen für Arbeitsstellen kürzerer Dauer auf Autobahnen mit zwei- oder dreistreifigen Richtungsfahrbahnen (nach OBER-SUNDERMEIER, 2003)	18
Bild 2-3: Verkehrsführungen für Arbeitsstellen kürzerer Dauer mit den in Nordrhein-Westfalen verwendeten Bezeichnungen	19
Bild 2-4: Anzahl und Anteil der gemeldeten Verkehrsführungen von Arbeitsstellen längerer Dauer auf Bundesautobahnen im Zeitraum 2003 bis 2012 ($n_A = 6.720$).....	24
Bild 2-5: Längen gemeldeter Verkehrsführungen von Arbeitsstellen längerer Dauer auf Bundesautobahnen im Zeitraum 2003 bis 2012 ($n_A = 6.720$).....	24
Bild 2-6: Verteilung der gemeldeten Arbeitsstellen kürzerer Dauer auf die Einrichtungszeit am Beispiel des Landes Hessen (links: Anzahl der gemeldeten Arbeitsstellen kürzerer Dauer, rechts: Einrichtungszeitfenster)	26
Bild 3-1: Prinzipskizze des Fundamentaldiagramms	28
Bild 3-2: q-v-Diagramm am Beispiel einer dreistreifigen Richtungsfahrbahn (5-Minuten-Intervalle).....	29
Bild 3-3: Beispiel für die Anpassung des VAN AERDE-Modells an Daten in Stunden-Intervallen im q-v-Diagramm.....	36
Bild 3-4: q-v-Diagramm sowie Product-Limit- und Maximum-Likelihood-Schätzung der Verteilungsfunktion der Kapazität am Beispiel einer dreistreifigen Richtungsverkehrsführung einer Arbeitsstelle	41
Bild 3-5: Schematische Darstellung des Geschwindigkeitsniveaus über die Zeit im Bereich einer Arbeitsstelle (RESSEL, 1994).....	43
Bild 4-1: Jahresganglinientypen des Kfz-Verkehrs (FITSCHEN und KOSSMANN, 2008).....	57
Bild 4-2: Berücksichtigung der Jahresganglinie des Kfz-Verkehrs und der zeitlichen Lage der Arbeitsstelle (KEMPER et al., 2018)	57
Bild 4-3: Zeichen „Versetzt Fahren“ (links) und „Versetzt Fahren“ in Kombination mit „Überholverbot“ (rechts).....	68
Bild 4-4: Absicherung nach RSA 95 (links) sowie mit Einzug des linken Fahrstreifens (rechts)	69
Bild 5-1: Anzahl der untersuchten Arbeitsstellen in Abhängigkeit von der Verkehrsführung	72
Bild 5-2: Geschwindigkeitsganglinie für eine ausgewählte Zählstelle im Bereich einer Arbeitsstelle.....	74

Bild 5-3: Anpassung des VAN AERDE-Modells für die Arbeitsstellen NW_2012_636a und NW_2012_636b an das q-v-Diagramm in Stunden-Intervallen	76
Bild 5-4: Product-Limit-Schätzung (P-L) und Maximum-Likelihood-Schätzung (M-L) der Verteilungsfunktion der Kapazität für die Arbeitsstellen NW_2012_636a und NW_2012_636b.....	77
Bild 5-5: Vergleich der Kapazität am Scheitelpunkt der VAN AERDE-Modellfunktion in Stunden-Intervallen mit dem 5. Perzentil der Verteilungsfunktion der Kapazität in 5-Minuten-Intervallen am Beispiel der Arbeitsstelle BY_2014_001	77
Bild 5-6: Darstellung der ermittelten Kapazitäten in Abhängigkeit von der kleinsten Fahrstreifenbreite unter Berücksichtigung der Lage innerhalb oder außerhalb von Ballungsräumen (iB/aB), des Vorhandenseins einer Überleitung (ÜL) und/oder Fahrbahnteilung (FT) und Fahrstreifenreduktion (FSR) für alle analysierten Arbeitsstellen mit zweistreifiger Richtungsverkehrsführung.....	81
Bild 5-7: Darstellung der ermittelten Kapazitäten in Abhängigkeit von der zulässigen Höchstgeschwindigkeit unter Berücksichtigung der Lage innerhalb oder außerhalb von Ballungsräumen (iB/aB) und des Vorhandenseins einer Überleitung (ÜL) und/oder Fahrbahnteilung (FT) für alle analysierten Arbeitsstellen mit dreistreifiger Richtungsverkehrsführung.....	81
Bild 5-8: Darstellung der ermittelten Kapazitäten in Abhängigkeit vom SV-Anteil unter Berücksichtigung der Lage innerhalb oder außerhalb von Ballungsräumen (iB/aB), des Vorhandenseins einer Überleitung (ÜL) und/oder Fahrbahnteilung (FT) und Fahrstreifenreduktion (FSR) für alle analysierten Arbeitsstellen mit zweistreifiger Richtungsverkehrsführung	82
Bild 5-9: Darstellung der ermittelten Kapazitäten in Abhängigkeit von der Steigung unter Berücksichtigung der Lage innerhalb oder außerhalb von Ballungsräumen (iB/aB), des Vorhandenseins einer Überleitung (ÜL) und/oder Fahrbahnteilung (FT) und Fahrstreifenreduktion (FSR) für alle analysierten Arbeitsstellen mit zweistreifiger Richtungsverkehrsführung	83
Bild 5-10: Gegenüberstellung der empirisch ermittelten Kapazitäten (C_N) mit den Werten nach dem Verfahren im Leitfaden zum Arbeitsstellenmanagement auf Bundesautobahnen (BMVBS, 2011b) (C_{RBAP}) für alle analysierten Arbeitsstellen mit zwei- und dreistreifigen Richtungsverkehrsführungen (gestrichelte Linien kennzeichnen eine Abweichung von 10 %)	86
Bild 5-11: Gegenüberstellung der empirisch ermittelten Kapazitäten (C_N) mit den nach dem neuen Modell ermittelten Kapazitäten (C_{mod}) für alle analysierten Arbeitsstellen mit zwei- und dreistreifigen Richtungsverkehrsführungen (gestrichelte Linien kennzeichnen eine Abweichung von 10 %).....	95
Bild 5-12: Anpassung des Warteschlangenmodells nach BRILON und PONZLET (1995) an Verkehrsdaten aus dem Arbeitsstelleninnenbereich am Beispiel der Arbeitsstelle NW 2010_024_qv.....	97
Bild 5-13: Mittelwerte und Spannweiten der Geschwindigkeiten (links) und Neigungen der q-v-Beziehung im freien Verkehr (rechts) für alle fünf für das Untersuchungskollektiv definierten Typen	99

Bild 5-14: q-v-Beziehungen innerhalb von Arbeitsstellen am Beispiel einer Arbeitsstelle mit zweistreifiger Richtungsverkehrsführung innerhalb von Ballungsräumen mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h mit breiten Fahrstreifen und ohne Fahrbahnteilung	101
Bild 5-15: Anzahl der Arbeitsstellen kürzerer Dauer in den Jahren 2010 bis 2012 in Nordrhein-Westfalen differenziert nach Verkehrsführungen gemäß Tabelle 5-11 und Tabelle 5-12.....	105
Bild 5-16: Anzahl der geprüften und hinsichtlich der Kapazität analysierbaren Arbeitsstellen differenziert nach Verkehrsführungen.....	106
Bild 5-17: Beispiel für die Ermittlung des mittleren Stauabflusses q_{Stau} an einer Arbeitsstelle kürzerer Dauer anhand von Zählstellendaten	108
Bild 5-18: Einfluss des Schwerverkehrs auf die Kapazität unter Berücksichtigung der Lage im Netz, der Tageszeit und des Wochentags im Mittel über alle einstreifigen (oben) bzw. zweistreifigen (unten) Verkehrsführungen an Arbeitsstellen kürzerer Dauer	112
Bild 5-19: Einfluss des Schwerverkehrs auf die Kapazität unter Berücksichtigung der Lage im Netz, der Tageszeit und des Wochentags für verschiedene zweistreifige Verkehrsführungen an Arbeitsstellen kürzerer Dauer	113
Bild 5-20: Einfluss des Schwerverkehrs auf die Kapazität unter Berücksichtigung der Lage im Netz, der Tageszeit und des Wochentags für verschiedene einstreifige Verkehrsführungen an Arbeitsstellen kürzerer Dauer	114
Bild 5-21: Beispiel einer Boxplotdarstellung	115
Bild 5-22: Streuung der Kapazitäten in Arbeitsstellen kürzerer Dauer für verschiedene Kombinationen von Einflussparametern bei verschiedenen einstreifigen Verkehrsführungen	116
Bild 5-23: Streuung der Kapazitäten in Arbeitsstellen kürzerer Dauer für verschiedene Kombinationen von Einflussparametern bei verschiedenen zweistreifigen Verkehrsführungen	117
Bild 5-24: Streuung der Kapazitäten in Arbeitsstellen kürzerer Dauer für verschiedene Kombinationen von Einflussparametern im Mittel über alle einstreifigen (oben) bzw. zweistreifigen (unten) Verkehrsführungen.....	117
Bild 5-25: Streuung der Kapazitäten in Arbeitsstellen kürzerer Dauer für alle einstreifigen Verkehrsführungen in Abhängigkeit von der Lage im Netz.....	118
Bild 5-26: Streuung der Kapazitäten in Arbeitsstellen kürzerer Dauer für alle zweistreifigen Verkehrsführungen für die Parameterkombination $iB/WT/t$	118
Bild 5-27: Gegenüberstellung der empirisch ermittelten Kapazitäten (C_{emp}) und der mit dem Regressionsmodell mit zwei unabhängigen Variablen berechneten Kapazitäten (C_{mod}).....	121
Bild 5-28: Darstellung der Streuung der Kapazitäten für die vier maßgebenden Parameterkombinationen.....	123
Bild 6-1: Messaufbau für die Messungen 1 und 2	130

Bild 6-2: Blick von der Übersichtskamera für die Messungen 1 und 2 in Richtung Norden.....	131
Bild 6-3: Messaufbau für die Messung 3	131
Bild 6-4: Blick von der Übersichtskamera für die Messung 3 in Richtung Süden.....	132
Bild 6-5: Messaufbau für die Messungen 4 und 5	132
Bild 6-6: Blick von der Übersichtskamera für die Messungen 4 und 5 in Richtung Osten	133
Bild 6-7: Messaufbau für die Messungen 6 und 7	133
Bild 6-8: Blick von der Übersichtskamera für die Messungen 6 und 7 in Richtung Norden.....	133
Bild 6-9: Messaufbau für die Messungen 8 und 9	134
Bild 6-10: Blick von der Übersichtskamera für die Messungen 8 und 9 in Richtung Osten	134
Bild 6-11: Messaufbau für die Messungen 10 und 11	135
Bild 6-12: Blick von der Übersichtskamera für die Messungen 10 und 11 in Richtung Süden.....	135
Bild 6-13: Messaufbau für die Messungen 12 und 13	136
Bild 6-14: Blick von einer Übersichtskamera für die Messungen 12 und 13 in Richtung Osten	136
Bild 6-15: Messaufbau für die Messung 14	137
Bild 6-16: Blick von der Übersichtskamera für die Messung 14 in Richtung Norden.....	137
Bild 6-17: q-v-Diagramme der Messungen 1 und 2 (5-Minuten-Intervalle).....	138
Bild 6-18: Geschwindigkeitsverteilungen der Messung 2 bei lokaler und streckenbezogener Erfassung.....	139
Bild 6-19: q-v-Diagramme der Messungen 4 und 5 (5-Minuten-Intervalle).....	139
Bild 6-20: Geschwindigkeitsverteilungen der Messungen 4 und 5	139
Bild 6-21: Wunschgeschwindigkeitsverteilungen der Messungen 4 und 5.....	140
Bild 6-22: q-v-Diagramme der Messungen 6 und 7 (5-Minuten-Intervalle).....	140
Bild 6-23: Geschwindigkeitsverteilungen der Messungen 6 und 7	140
Bild 6-24: Wunschgeschwindigkeitsverteilungen der Messungen 6 und 7.....	141
Bild 6-25: q-v-Diagramme des rechten und linken Fahrstreifens der Messung 8 (5-Minuten-Intervalle).....	141
Bild 6-26: Geschwindigkeitsverteilung auf dem rechten und linken Fahrstreifen der Messung 8	142
Bild 6-27: Wunschgeschwindigkeitsverteilung auf dem rechten und linken Fahrstreifen der Messung 8.....	142
Bild 6-28: q-v-Diagramme der Messungen 12 und 13 (5-Minuten-Intervalle).....	142

Bild 6-29: Fahrstreifenaufteilungen der Messungen 1, 2 und 3 (5-Minuten-Intervalle) ...	143
Bild 6-30: Fahrstreifenaufteilungen der Messungen 4 und 5 (5-Minuten-Intervalle)	143
Bild 6-31: Fahrstreifenaufteilungen der Messungen 6, 7 und 9 (5-Minuten-Intervalle) ...	144
Bild 6-32: Fahrstreifenaufteilungen der Messungen 12 und 13 (5-Minuten-Intervalle) ...	145
Bild 6-33: Fahrstreifenaufteilungen der Messungen 14 und 11 (5-Minuten-Intervalle) ...	145
Bild 7-1: Prinzipskizze der Bereiche mit unterschiedlichen Parametersätzen im Simulationsnetz und Darstellung der Lage der zur Kalibrierung verwendeten Messquerschnitte	148
Bild 7-2: Kalibrierte Fahrstreifenaufteilung für das zweistreifige Simulationsnetz	149
Bild 7-3: Kalibrierte Fahrstreifenaufteilung für das dreistreifige Simulationsnetz	150
Bild 7-4: Kapazitäten der neun analysierten Simulationsszenarien für das zwei- (links) und dreistreifige (rechts) Simulationsnetz	152
Bild 8-1: Übersicht über die Datengrundlage für die Untersuchungen der Verkehrs- sicherheit	154
Bild 8-2: Einteilung einer Arbeitsstelle längerer Dauer in Teilbereiche (Sektionen)	156
Bild 8-3: Aufteilung des Untersuchungskollektivs der betrachteten Arbeitsstellen längerer Dauer in Abhängigkeit von den verfügbaren Unfalldaten	159

Tabellen

Tab. 2-1: Mindestbreite von Behelfsfahrstreifen in Abhängigkeit von der Länge einer Arbeitsstelle nach RSA (BMV, 1995)	20
Tab. 2-2: Kennwerte zur Länge der häufigsten Verkehrsführungen von Arbeitsstellen längerer Dauer auf Bundesautobahnen im Zeitraum 2003 bis 2012.....	23
Tab. 3-1: Längsneigungsabhängiger Geländefaktor f_G (BMVBS, 2011b)	35
Tab. 3-2: Richtwerte für die Ermittlung der Kapazität C_{PE} eines Fahrstreifens an Arbeitsstellen (BMVBS, 2011b)	35
Tab. 3-3: Beurteilung der Größe S_{Diff} hinsichtlich der verkehrlichen Auswirkung einer Arbeitsstelle (BMVBS, 2011b).....	35
Tab. 3-4: Kapazitätswerte für verschiedene Verkehrsführungsarten (jeweils baustellenzugewandte Seite) in Abhängigkeit vom Güterverkehrsanteil (nach RESSEL, 1994)	43
Tab. 3-5: Maximale Verkehrsstärken im Bereich von Arbeitsstellen bei zweistreifigen Richtungsfahrbahnen (nach SCHÖNBORN und SCHULTE, 2012)	44
Tab. 3-6: Korrekturfaktoren zur Berechnung der Kapazität eines Engpasses bei Tagesbaustellen bei einer Grundleistungsfähigkeit von 1.830 Pkw-E/h (nach STÖCKERT und KLOTZ, 1999)	44
Tab. 3-7: Faktoren für die Ermittlung der Kapazität von Arbeitsstellen nach OBER-SUNDERMEIER (2003)	45
Tab. 3-8: Abminderung der Kapazität nach BRILON et al. (2006) für Verkehrsführungen im Bereich von Arbeitsstellen ohne Fahrstreifenreduktion	46
Tab. 3-9: Zusammenstellung von Kapazitätswerten für Arbeitsstellen aus verschiedenen deutschen Literaturquellen	48
Tab. 3-10: Zusammenstellung von Kapazitätswerten für Arbeitsstellen aus verschiedenen internationalen Literaturquellen	53
Tab. 4-1: Vergleich der Unfallkostenraten in Arbeitsstellen längerer Dauer mit Gegenverkehrstrennung auf Basis eines Kollektivs von 126 Arbeitsstellen zum Preisstand 2010 (KEMPER et al., 2018).....	65
Tab. 4-2: Mittlere Unfallraten $UR_{A,M}$ und mittlere Unfallkostenraten $UKR_{A,M}$ (Preisstand 2000) im Zulaufbereich von Tagesbaustellen (KEMPER et al., 2012)	67
Tab. 4-3: Mittlere Unfallraten $UR_{A,M}$ und mittlere Unfallkostenraten $UKR_{A,M}$ (Preisstand 2000) im Zulaufbereich von Nachtbaustellen (KEMPER et al., 2012)	67
Tab. 5-1: Parameter der Untersuchungsstellen der Kapazitätsanalysen	73
Tab. 5-2: Ergebnisse der deterministischen und stochastischen Kapazitätsanalyse (Klammerwerte kennzeichnen eine schlechte Anpassung des VAN AERDE-Modells bzw. der Verteilungsfunktion).....	78
Tab. 5-3: Vergleich der empirisch ermittelten Kapazitäten (C_N) mit den Kapazitäten nach dem Verfahren im Leitfaden zum Arbeitsstellenmanagement auf Bundesautobahnen (BMVBS, 2011b) (C_{RBAP})	85

Tab. 5-4: Ergebnisse der Optimierung für das Modell mit Geländefaktoren, die konstanten Werte sind grau hinterlegt.....	89
Tab. 5-5: Ergebnisse der Optimierung für das Modell mit einem Abminderungsfaktor für die Steigung, die konstanten Werte sind grau hinterlegt.....	90
Tab. 5-6: Differenz zwischen der empirisch ermittelten Kapazität C_N und der Modellkapazität C_{mod} für alle Arbeitsstellen mit Überleitung	90
Tab. 5-7: Differenz zwischen der empirisch ermittelten Kapazität C_N und der Modellkapazität C_{mod} für alle Arbeitsstellen mit Fahrbahnteilung	91
Tab. 5-8: Ergebnisse für alle durchgeführten Anpassungsschritte (AS), die konstant gehaltenen oder gesetzten Werte sind grau hinterlegt.....	92
Tab. 5-9: Vergleich der empirisch ermittelten Kapazitäten (C_N) mit den nach dem neuen Modell ermittelten Kapazitäten (C_{mod}).....	94
Tab. 5-10: Parameter der Untersuchungsstellen und Ergebnisse der Analysen der q-v-Diagramme	98
Tab. 5-11: Verkehrsführungen für Arbeitsstellen kürzerer Dauer an zweistreifigen Richtungsfahrbahnen	103
Tab. 5-12: Verkehrsführungen für Arbeitsstellen kürzerer Dauer an dreistreifigen Richtungsfahrbahnen	104
Tab. 5-13: Umfang des Untersuchungskollektivs von Arbeitsstellen kürzerer Dauer unterteilt nach der Verkehrsführung (Codierung gemäß Tabelle 5-11 und Tabelle 5-12)	109
Tab. 5-14: Umfang des Untersuchungskollektivs von Arbeitsstellen kürzerer Dauer unterteilt nach Verkehrsführung (Codierung gemäß Tabelle 5-11 und Tabelle 5-12) und Tageszeit (t = Tag, n = Nacht)	110
Tab. 5-15: Umfang des Untersuchungskollektivs von Arbeitsstellen kürzerer Dauer unterteilt nach Verkehrsführung (Codierung gemäß Tabelle 5-11 und Tabelle 5-12) und Wochentag (WT = Werktag, WE = Wochenende)	110
Tab. 5-16: Umfang des Untersuchungskollektivs von Arbeitsstellen kürzerer Dauer unterteilt nach Verkehrsführung (Codierung gemäß Tabelle 5-11 und Tabelle 5-12) und Lage innerhalb oder außerhalb von Ballungsräumen (iB bzw. aB)	111
Tab. 5-17: Umfang des Untersuchungskollektivs für die möglichen Parameterkombinationen	111
Tab. 5-18: Eingangsgrößen für das multiple lineare Regressionsmodell	119
Tab. 5-19: Ergebnisse der multiplen linearen Regression bei Berücksichtigung von sechs unabhängigen Variablen (Attribute mit signifikantem Einfluss auf die Kapazität sind grau hinterlegt) und einem Konfidenzniveau von 95 %	120
Tab. 5-20: Ergebnisse der multiplen linearen Regression bei Berücksichtigung der zwei unabhängigen Variablen mit signifikantem Einfluss auf die Kapazität und einem Konfidenzniveau von 95 %	120

Tab. 5-21: Mann-Whitney-U-Tests zur Prüfung der Übereinstimmung der Verteilungen der Kapazitäten bei Verkehrsführung 2 und 4 am Beispiel der Parameterkombination iB/WT/t.....	122
Tab. 5-22: Mann-Whitney-U-Tests zur Prüfung der Übereinstimmung der Verteilungen der Kapazitäten bei Verkehrsführung 2 und 6 am Beispiel der Parameterkombination iB/WT/t.....	122
Tab. 5-23: Mann-Whitney-U-Tests zur Prüfung der Übereinstimmung der Verteilungen der Kapazitäten innerhalb und außerhalb von Ballungsräumen am Beispiel von Verkehrsführung 2.....	122
Tab. 5-24: Mann-Whitney-U-Tests zur Prüfung der Übereinstimmung der Verteilungen der Kapazitäten tagsüber und nachts am Beispiel von Verkehrsführung 6.....	122
Tab. 5-25: Kapazitäten pro Fahrstreifen für Verkehrsführungen mit Links- und Rechts-einzug innerhalb und außerhalb von Ballungsräumen auf der Grundlage verschiedener Erhebungsmethoden.....	123
Tab. 5-26: Kapazitäten im fließenden Verkehr $C_{\text{fließend}}$ und im Stau C_{Stau} für fünf ausgewählte Arbeitsstellen.....	125
Tab. 5-27: Vergleich der Kapazitäten des entwickelten Modells mit (Modell-)Kapazitäten aus früheren Untersuchungen.....	126
Tab. 6-1: Übersicht der Kurzzeitmessungen an Arbeitsstellen längerer Dauer.....	130
Tab. 7-1: Ergebnisse der Kalibrierung hinsichtlich der Kapazität am Engpass.....	149
Tab. 7-2: Anpassungen der Simulationsparameter in BABSIM (veränderte Werte sind grau hinterlegt).....	150
Tab. 7-3: Parameter der angepassten Wunschgeschwindigkeitsverteilungen in BABSIM.....	151
Tab. 7-4: Abweichungen der in der Simulation ermittelten Kapazitäten zum Ausgangswert von $s = 0\%$ bei unterschiedlichen Steigungen und SV-Anteilen für das zweistreifige Netz (grau hinterlegte Werte sind Ausgangswerte).....	152
Tab. 7-5: Abweichungen der in der Simulation ermittelten Kapazitäten zum Ausgangswert von $s = 0\%$ bei unterschiedlichen Steigungen und SV-Anteilen für das dreistreifige Netz (grau hinterlegte Werte sind Ausgangswerte).....	152
Tab. 7-6: Abweichungen der in der Simulation ermittelten Kapazitäten zum Ausgangswert von $b_{SV} = 10\%$ bei unterschiedlichen Steigungen und SV-Anteilen für das zweistreifige Netz (grau hinterlegte Werte sind Ausgangswerte).....	153
Tab. 7-7: Abweichungen der in der Simulation ermittelten Kapazitäten zum Ausgangswert von $b_{SV} = 10\%$ bei unterschiedlichen Steigungen und SV-Anteilen für das dreistreifige Netz (grau hinterlegte Werte sind Ausgangswerte).....	153
Tab. 8-1: Arbeitsstellen längerer Dauer nach Jahren (Ende der Einrichtung) und Ländern.....	158
Tab. 8-2: Arbeitsstellen längerer Dauer nach Verkehrsführungen.....	158
Tab. 8-3: Verunglücktenstruktur der Unfälle mit schwerem Personenschaden auf Autobahnen insgesamt und in den betrachteten 175 Arbeitsstellen.....	160

Tab. 8-4: Unfallkostensätze für Unfälle in den betrachteten Arbeitsstellen längerer Dauer	160
Tab. 8-5: Mittlere querschnittsbezogene Unfallraten und mittlere querschnittsbezogene Unfallkostenraten für den gesamten Arbeitsstellenbereich der 141 Arbeitsstellen längerer Dauer mit Unfällen der Kategorien 1-6 nach Verkehrsführung	161
Tab. 8-6: Mittlere querschnittsbezogene Unfallraten und mittlere querschnittsbezogene Unfallkostenraten für den Innenbereich der 141 Arbeitsstellen längerer Dauer mit Unfällen der Kategorien 1-6 nach Verkehrsführung	162
Tab. 8-7: Mittlere richtungsbezogene Unfallraten und mittlere richtungsbezogene Unfallkostenraten für den Zulauf der 141 Arbeitsstellen längerer Dauer mit Unfällen der Kategorien 1-6 nach Verkehrsführung sowie Fahrstreifenanzahl und -führung in der betrachteten Richtung (Preisstand 2010)	163
Tab. 8-8: Mittlere richtungsbezogene Unfallraten und mittlere richtungsbezogene Unfallkostenraten für die Überleitung bzw. Verschwenkung der 141 Arbeitsstellen längerer Dauer mit Unfällen der Kategorien 1-6 nach Verkehrsführung sowie Fahrstreifenanzahl und -führung in der betrachteten Richtung (Preisstand 2010)	164
Tab. 8-9: Mittlere richtungsbezogene Unfallraten und mittlere richtungsbezogene Unfallkostenraten für den Innenbereich der 141 Arbeitsstellen längerer Dauer mit Unfällen der Kategorien 1-6 nach Verkehrsführung sowie Fahrstreifenanzahl und -führung in der betrachteten Richtung (Preisstand 2010)	165
Tab. 8-10: Mittlere richtungsbezogene Unfallraten und mittlere richtungsbezogene Unfallkostenraten für die Rückleitung bzw. Rückverschwenkung der 141 Arbeitsstellen längerer Dauer mit Unfällen der Kategorien 1-6 nach Verkehrsführung sowie Fahrstreifenanzahl und -führung in der betrachteten Richtung (Preisstand 2010)	166
Tab. 8-11: Ableitung der standardisierten richtungsbezogenen Unfallkostenraten für den Zulauf in Arbeitsstellen längerer Dauer auf Basis der Unfallanalysen (Preisstand 2010)	169
Tab. 8-12: Ableitung der standardisierten mittleren richtungsbezogenen Unfallkostenraten für die Verschwenkung bzw. Überleitung in Arbeitsstellen längerer Dauer auf Basis der Unfallanalysen (Preisstand 2010)	170
Tab. 8-13: Ableitung der standardisierten mittleren richtungsbezogenen Unfallkostenraten für den Innenbereich in Arbeitsstellen längerer Dauer auf Basis der Unfallanalysen (Preisstand 2010)	171
Tab. 8-14: Ableitung der standardisierten mittleren richtungsbezogenen Unfallkostenraten für die Rückverschwenkung bzw. Rückleitung in Arbeitsstellen längerer Dauer auf Basis der Unfallanalysen (Preisstand 2010)	172
Tab. 8-15: Anzahl und mittlere fahrtrichtungsbezogene Unfallkostenraten im Innenbereich nach Breite des Hauptfahrstreifens und zulässiger Höchstgeschwindigkeit (Preisstand 2010) der Arbeitsstellen längerer Dauer	173
Tab. 8-16: Anzahl der betrachteten Tagesbaustellen nach Verkehrsführungen und Anzahl der Unfälle im Zulauf- und Arbeitsstellenbereich	178
Tab. 8-17: Anzahl der betrachteten Nachtbaustellen nach Verkehrsführungen und Anzahl der Unfälle im Zulauf- und Arbeitsstellenbereich	179

Tab. 8-18: Unfallkostensätze für Unfälle in den betrachteten Arbeitsstellen kürzerer Dauer (entsprechen pauschalen durchschnittlichen Kostensätzen für Unfälle auf Autobahnen insgesamt)	180
Tab. 8-19: Mittlere Unfallraten und mittlere Unfallkostenraten für die betrachteten Tagesbaustellen nach Verkehrsführungen	180
Tab. 8-20: Mittlere Unfallraten und mittlere Unfallkostenraten für die betrachteten Nachtbaustellen nach Verkehrsführungen	181
Tab. 9-1: Einflussgrößen auf die Kapazität von Arbeitsstellen längerer Dauer	184
Tab. 9-2: Einflussgrößen auf die Kapazität von Arbeitsstellen kürzerer Dauer	185
Tab. 9-3: Modellparameter der q-v-Diagramme für Arbeitsstellen	187
Tab. 9-4: Einflussgrößen auf die Unfallkostenrate (UKR) und Unfallrate (UR) von Arbeitsstellen längerer Dauer	189
Tab. 9-5: Einflussgrößen auf die Unfallkostenrate (UKR) und Unfallrate (UR) von Arbeitsstellen kürzerer Dauer	190
Tab. 9-6: Vorgeschlagene standardisierte mittlere richtungsbezogene Unfallkostenraten für unbeeinflussten Verkehr in Arbeitsstellen längerer Dauer	191
Tab. 9-7: Standardlänge der Verschwenkung bzw. Überleitung für beeinflussten Verkehr in Arbeitsstellen längerer Dauer	192
Tab. 9-8: Vorgeschlagene standardisierte mittlere richtungsbezogene Unfallkostenraten für beeinflussten Verkehr in Arbeitsstellen längerer Dauer	195
Tab. 9-9: Faktor zur Berücksichtigung der Fahrstreifenbreiten im Innenbereich bei Arbeitsstellen längerer Dauer	196
Tab. 9-10: Faktor zur Berücksichtigung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit im Innenbereich bei Arbeitsstellen längerer Dauer in Abhängigkeit von den Fahrstreifenbreiten	196
Tab. 9-11: Vorgeschlagene standardisierte mittlere richtungsbezogene Unfallraten für unbeeinflussten Verkehr in Arbeitsstellen längerer Dauer	200
Tab. 9-12: Vorgeschlagene standardisierte mittlere richtungsbezogene Unfallraten für beeinflussten Verkehr in Arbeitsstellen längerer Dauer	201
Tab. 9-13: Anteilfaktor der Unfälle mit Personenschaden für unbeeinflussten Verkehr in Arbeitsstellen längerer Dauer	202
Tab. 9-14: Anteilfaktor der Unfälle mit Personenschaden für beeinflussten Verkehr in Arbeitsstellen längerer Dauer	203
Tab. 9-15: Vorgeschlagene standardisierte mittlere Unfallkostenraten für Arbeitsstellen kürzerer Dauer	205
Tab. 9-16: Vorgeschlagene standardisierte mittlere Unfallraten für Arbeitsstellen kürzerer Dauer	206
Tab. 9-17: Anteilfaktor der Unfälle mit Personenschaden für Arbeitsstellen kürzerer Dauer	207

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Unterreihe „Verkehrstechnik“

2022

V 352: Abriebe von Fahrbahnoberflächen

Düring, Schmidt, Johannsen

€ 19,00

V 353: Nutzung der C2X-basierten ÖV-Priorisierung an signalisierten Knotenpunkten

Gay, Grimm, Otto, Partzsch, Gersdorf, Gierisch, Löwe, Schütze

€ 16,00

V 354: Anwendung der Methode BIM in Konformität mit den Regelwerken der FGSV und des IT-Ko

Radenberg, Müller, König, Hagedorn, Geistefeldt, Hohmann, Heinrichs, Stiehler, Kortemeyer

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

V 355: Pilotversuch des Rechtsabbiegens von Rad Fahrenden bei Rot

Niestegge, Schüller, Hantschel, Schröter, Gerike

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

V 356: Entwicklung von Einsatzkriterien für Fußgängerschutzanlagen mit unterschiedlichen Grundstellungen

Medicus, Schmotz, Gerike, Reinartz, Baier

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

V 357: Qualifizierung der in Deutschland verwendeten Fahrzeug-Rückhaltesysteme mit verbessertem Schutz für Motorradfahrer nach den aktuellen europäischen Spezifikationen

Klöckner, Gärtner

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

V 358: Nutzenpotenziale von eCall im Verkehrsmanagement

Schaarschmidt, van Driel, Reinthaler, Nitsche, Aleksa

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

V 359: Management von Neophyten – Ein Überblick über die aktuelle Situation auf Straßenbegleitflächen

Bartels

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

V 360: Wirksamkeit von Tunnelwänden als Träger photokatalytischer Oberflächen – Hauptstudie

Stephan, Ehm, Kamaruddin

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

V 361: Nachhaltigkeitsbewertung von Streckenzügen der Straßeninfrastruktur

Hess, Lohmeier, Mielecke, Kunz

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

V 362: Simulation des hochautomatisierten Fahrens auf Autobahnen mit kollektiver Streckenbeeinflussung

Hilgers, Krabbe, Haug, Grimm, Kutter, Tempelhahn, Schwietering, Füg

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

V 363: PERTA – Passive Sicherheit in der Straßenausstattung

Tomasch, Radeschnig, Dünser, Sinz, Gstrein

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

V 364: Verkehrsträgerübergreifender Austausch von Erneuerbarer Energie

Chvanova, Haller, Leprich, U. Mayr, C. Mayr, Oßwald, Altröck, Gemmer, Michaels, Wagner

€ 23,50

V 365: Bundesweite Verkehrsdaten 2019

Schneider, Pelzer, Gallus, Dick, Lensing

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

2023

V 366: Akzeptanz und Verkehrssicherheit des Radverkehrs im Mischverkehr auf Hauptverkehrsstraßen

Schüller, Niestegge, Hantschel, Kühn, Gerike, Huber

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

V 367: In Situ-Messungen von Reflexionseigenschaften von Fahrbahnoberflächen

Schulze

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

V 368: Methoden zur Bewertung der Verbindungsqualität in Straßennetzen

Friedrich, Bawidamann, Peter, Waßmuth

€ 20,00

V 369: Verkehrsablauf an signalisierten Knotenpunkten mit hohem Radverkehrsaufkommen

Fritz, Grigoropoulos, Kath, Baier, Reinartz, Schuckließ, Junghans, Lücken, Leonhardt

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

V 370: Wissenschaftliche Begleitung des digitalen Testfelds auf der A9 zwischen München und Nürnberg

Vierkötter, Mischnick, Spangler, Gerstenberger, Windmann, Nedkov, Emmermann, Haspel

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

V 371: Begleitende Systemevaluation der Maßnahme: Sicheres Ausleiten bei BAG-Standkontrollen

Fehn, Margreiter, Spangler, Bogenberger, Emmermann, Bengler, Vierkötter, Nedkov, Feldges, Holst

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

V 372: Autonome Systeme für Straßenbetriebsdienste (AETAS BAB)

Lüpges, Kleer, Holldorb, Zielke

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

V 373: Modellanalyse Schadstoffimmissionen – Auswirkungen des Verkehrs auf die Luftqualität in drei Ballungsräumen

Jakobs, Schneider, Toenges-Schuller, Düring, Hoffmann

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

V 374: Kriterien für die Beurteilung des Gefährdungspotenzials für Motorradfahrer durch scharfkantige Konstruktionsteile in Fahrzeug-Rückhaltesystemen

Kathmann, von Heel, Schimmelpfennig, Reglitz, Kammel, Goergen

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

V 375: Virtuelle Anprallprüfungen an Fahrzeug-Rückhaltesystemen mit der Finite-Elemente-Simulation

Fröhlich, Schwedhelm, Kübler, Balzer-Hebborn, Yu

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

V 376: Innovative Datenerfassung und -nutzung im Straßenbetriebsdienst

Hess, Best, Lohmeier, Temme

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

2024

V 377: Verfahren für die Bewertung des Verkehrsablaufs auf Autobahnen als Ganzjahresanalyse für unterschiedliche Randbedingungen

Geistefeldt, Hohmann

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

V 378: Verkehrsablauf und Verkehrssicherheit an Arbeitsstellen auf Autobahnen unter unterschiedlichen Randbedingungen

Geistefeldt, von der Heiden, Oeser, Kemper, Diner, Baier, Klemps-Kohnen

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


Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG

Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen · Tel.+(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.



ISSN 0943-9331
ISBN 978-3-95606-783-9
<https://doi.org/10.60850/bericht-v378>

www.bast.de