

Entwicklung einer Fahrstreifenreduktions- beeinflussungsanlage für Baustellen auf BAB

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Verkehrstechnik Heft V 302

bast

Entwicklung einer Fahrstreifenreduktions- beeinflussungsanlage für Baustellen auf BAB

von

Thomas Heinrich
Frank W. Maier
Markos Papageorgiou
Ioannis Papamichail
Christin Schober
Ioannis Stamatakis

TRANSVER GmbH Verkehrsforschung und Beratung
München

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 302

bast

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

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

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

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

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

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

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

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE-Nr. 03.0533/2015/FRB:
Entwicklung einer Fahrstreifenreduktionsbeeinflussungsanlage für Baustellen auf BAB

Fachbetreuung:
Jessica Kleine

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

Redaktion
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

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

ISSN 0943-9331
ISBN 978-3-95606-371-8

Bergisch Gladbach, April 2018

Kurzfassung – Abstract

Entwicklung einer Fahrstreifenreduktionsbeeinflussungsanlage für Baustellen auf BAB

Durch den zunehmenden Sanierungsbedarf der Straßeninfrastruktur und die bevorstehende Einführung der neuen Technischen Regeln für Arbeitsstellen (ASR A5.2), welche einen größeren seitlichen Sicherheitsabstand zwischen Arbeitsbereich und Verkehrsbereich vorschreiben, werden zunehmend Fahrstreifenreduktionen erforderlich.

Aufgabe war deshalb die Entwicklung einer Fahrstreifenreduktionsbeeinflussungsanlage (FBA), mit dem Ziel, die Kapazität der Engstellen bestmöglich auszunutzen.

Die entwickelte FBA besteht im Wesentlichen aus den beiden Komponenten Fahrstreifenwechselbeeinflussung und Geschwindigkeitsbeeinflussung zur Zuflussdosierung, die auch unabhängig voneinander eingesetzt werden können.

Das Steuerungsverfahren basiert auf einem Regelkreis, der im Gegensatz zu klassischen Schwellenwertverfahren die Signalisierung unter Berücksichtigung der Reaktionen der Verkehrsteilnehmer und vorgegebener Grenzen so lange anpasst, bis das gewünschte Ziel erreicht und beibehalten wird.

Die Wirkung der Geschwindigkeitsbeeinflussung zur Zuflussdosierung konnte in der Mikrosimulation gezeigt werden. Voraussetzung ist, dass eine Geschwindigkeitsbegrenzung auf 40 km/h oder niedriger möglich ist, da bei einer Geschwindigkeitsbegrenzung auf minimal 60 km/h die erforderliche Drosselung des Zuflusses auf Werte unterhalb der Kapazität der Engstelle nicht erreicht werden kann. Die Signalisierung der Geschwindigkeitsbeeinflussung ist StVO- und RSA-konform möglich.

Im Gegensatz dazu konnte die Wirkung der Fahrstreifenwechselsignalisierung in der Mikrosimulation nicht untersucht werden, da die Reaktion der Fahrer auf die Anzeigen als erforderliche Eingangsgröße für die Mikrosimulation nicht bekannt ist.

Es wurden mehrere Anzeigenkonzepte entworfen und mit Experten und Verkehrsteilnehmern diskutiert.

Es wird empfohlen, die FBA zu implementieren, um die Verständlichkeit, die Akzeptanz und die Befolgung der verschiedenen Anzeigenkonzepte durch

die Verkehrsteilnehmer und somit die Wirksamkeit der FBA in der Realität zu untersuchen.

Development of a Lane Reduction Control system for roadworks on highways

Due to the growing demand for road infrastructure renovations and the upcoming new Technical Regulations for Roadworks (ASR A5.2), which require a greater safety distance between the construction site and the traffic, the installation of lane-drops at highways will be increasingly required before roadwork sections.

Hence, the task of this project was to design a Lane Reduction Control System (LRCS) aiming to facilitate the inflow and manage the capacity of the bottleneck in the best way possible.

The developed control algorithm mainly consists of two components, the Lane Changing Control (LCC) and the Variable Speed Limit Control (VSLC) for inflow reduction, which can also be implemented independently from each other.

This is a closed-loop control system, which, in contrast to conventional thresholding methods, adapts the signaling according to the road-users' behavior and the predefined threshold values, until the algorithm reaches and maintains its objectives.

The effects of the VSLC could be shown in microsimulation, under the precondition that a speed limit as low as 40 km/h can be applied, with the reason being that using higher speed limits cannot keep the in-coming flow within the capacity of the bottleneck. The signalization of the VSLC can be implemented according to the StVO and RSA regulations.

In contrast to the VSLC, the LCC could not be investigated through microsimulation techniques, due to the fact that the reaction of the road-users to the respective signals, which is required as an input variable, is not known beforehand.

A number of signal layouts were designed and discussed both with experts and road-users.

As an outcome, it is suggested that the LRCS should be implemented in a test-field, so as to investigate the clarity, the acceptance and the compliance of the proposed signal layouts by the drivers and therefore the overall effectiveness of the LRCS in reality.

Summary

Development of a lane reduction control system for roadworks on highways

1 Task description

The increase of vehicular traffic for both passenger and freight transportation in the past 20 years in Germany has exceeded forecasts and traffic demand is expected to grow more. The biggest share of traffic is observed at the federal motorway network. In addition, vehicles were mainly given access to motorways in former west federal states in the years between 1965 and 1985, resulting in a growing demand for road infrastructure renovation in those areas. The high number of heavy goods vehicles cause exceptional damage to the road superstructure and bridges.

In addition, the upcoming new Technical Regulations for Roadworks (ASR A5.2) requires a greater safety distance between the construction site and the traffic.

The increasing demand for roadworks along with the need for more space will be leading to more construction sites requiring lane-drops. Due to this situation, more bottlenecks with a low capacity will be produced, which together with the increasing traffic volumes will result in more congestion and consequently more travel time losses, as well as a higher risk for road accidents at the tail-end of the congestion.

Hence, the task of this project was to design a Lane Reduction Control System (LRCS) aiming to facilitate

the inflow and manage the capacity of the bottleneck in the best way possible in order to prevent congestion or at least reduce its spatial and temporal extent. This work involves both the development of the control algorithm and the design of the required detection and signalization system.

2 Methodology

For the development of the LRCS the steps described below were followed:

In Work-Package (WP) 1, which served as a base for the following WPs, the relevant literature was reviewed.

In WP 2, empirical data for one of the investigated roadworks with a lane-drop (motorway A3, direction north, upstream from Leverkusen interchange) were obtained. The data were then used to build and calibrate a microsimulation model in AIMSUN.

In WP 3 the control algorithm was developed and assessed using simulation techniques.

In WP 4 a detection and signalization system was designed. The relevant energy supply and data transmission aspects were taken into consideration.

3 Results

The developed control algorithm mainly consists of two components, the Lane Changing Control (LCC) and the Variable Speed Limit Control (VSLC) for inflow reduction, which can also be implemented independently from each other (Figure 1).

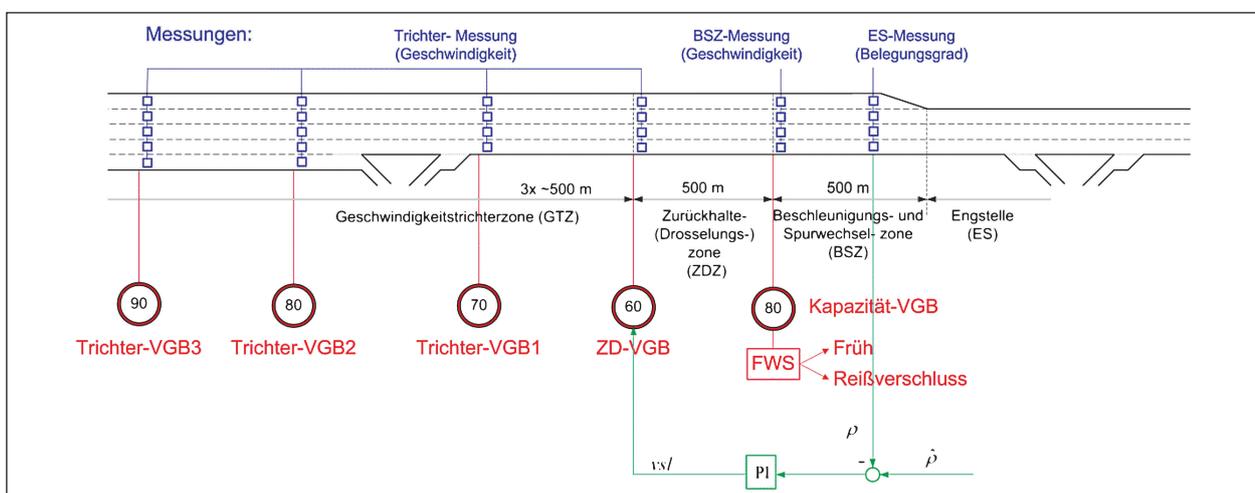


Fig. 1: Control system

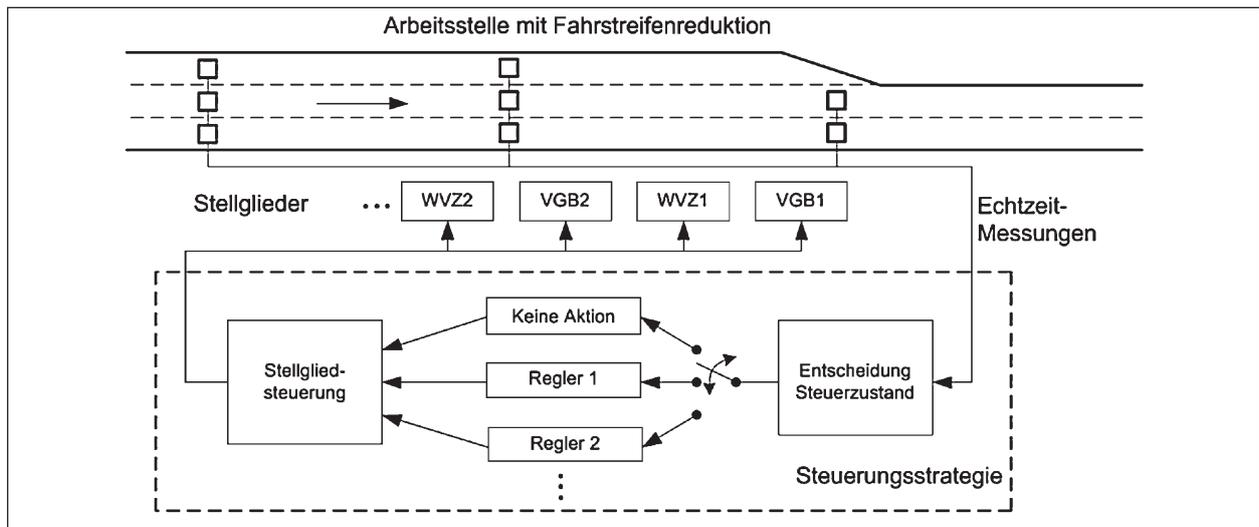


Fig. 2: Closed-loop control algorithm

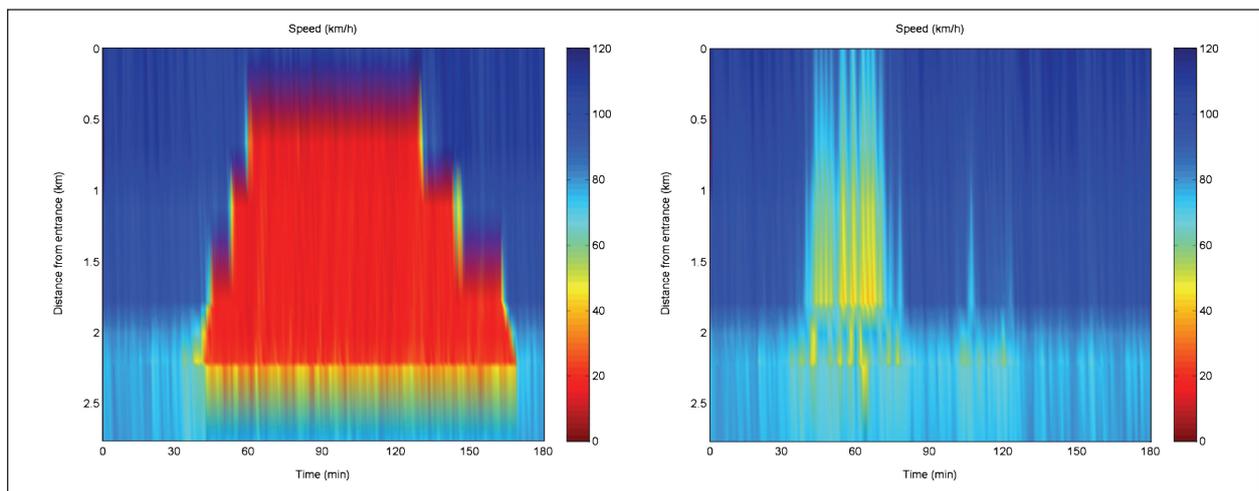


Fig. 3: Simulation-based speed contour plots with (right) and without (left) VSLC

This is a closed-loop control system, which, in contrast to conventional thresholding methods, adapts the signaling according to the road-users' behavior and the predefined threshold values (e.g. speed limit of 40 km/h), until the algorithm reaches and maintains its objectives (e.g. optimal traffic density at the bottleneck) (Figure 2).

The effects of the VSLC could be shown in microsimulation (Figure 3), under the precondition that a speed limit as low as 40 km/h can be applied, with the reason being that using higher speed limits (e.g. 60 km/h) cannot keep the in-coming flow within the capacity of the bottleneck (Figure 4). The signalization of the VSLC can be implemented according to the StVO and RSA regulations.

In contrast to the VSLC, the LCC could not be investigated through microsimulation techniques, due to the fact that the reaction of the road-users to

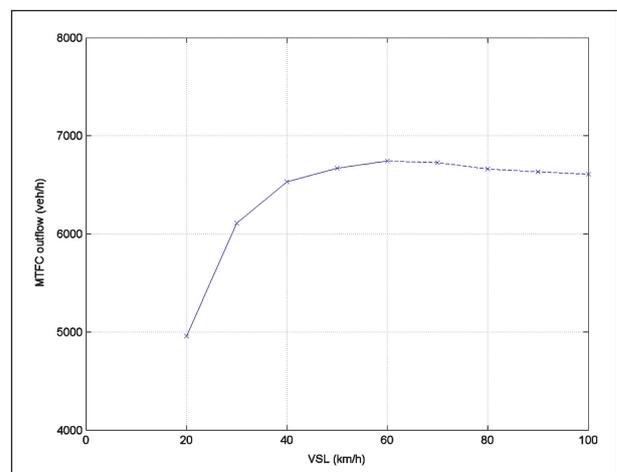


Fig. 4: Inflow restriction

the respective signals, which is required as an input variable, is not known beforehand.

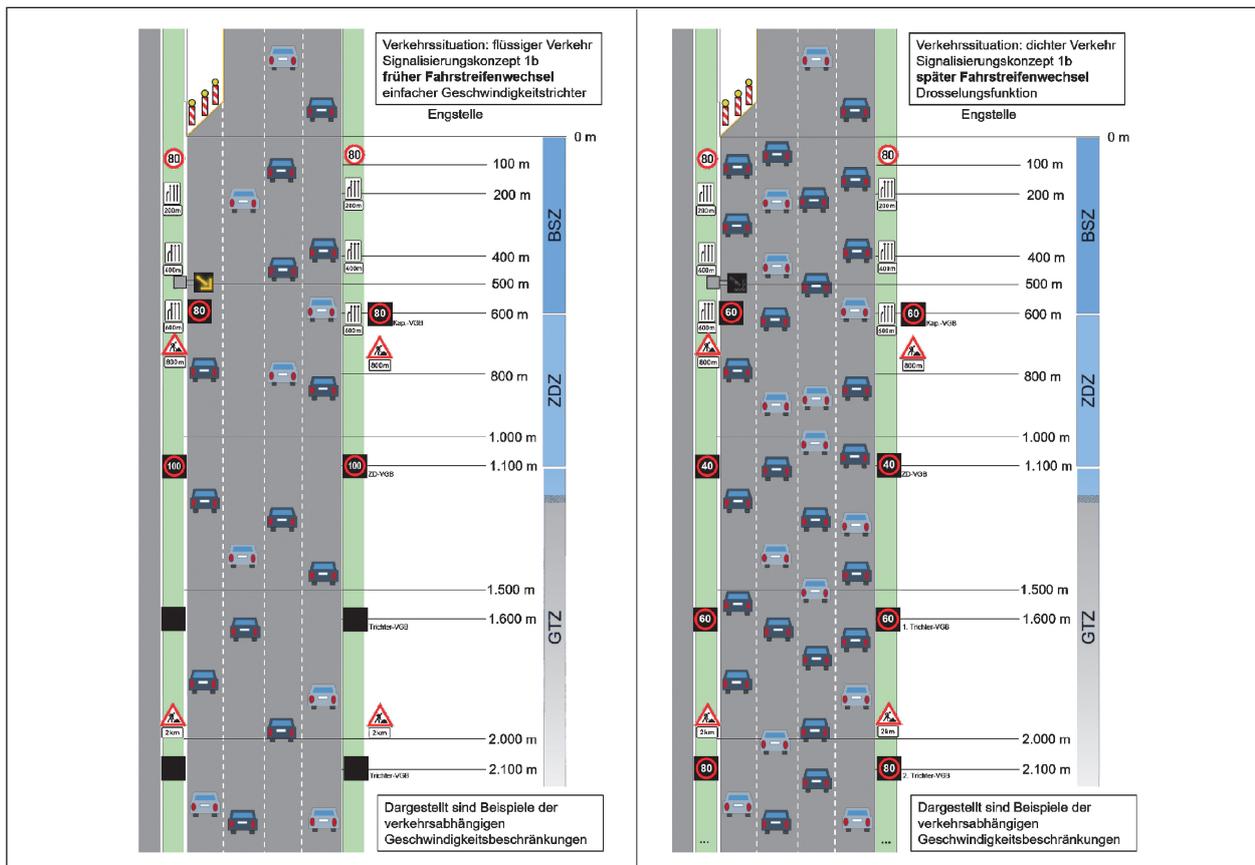


Fig. 5: Signal layout 1b (blinking merge signal) for early (left) und late merge (right)

A number of signal layouts were designed and discussed both with experts and road-users (Figure 5). The road-users survey revealed that many drivers feel insecure about late merging and therefore they tend to merge earlier, especially under less congested traffic conditions. This driver behavior is supported by the suggested lane-changing signalization system.

4 Conclusions for practical implementation

As an outcome, it is suggested that the LRCS should be implemented in a test-field, so as to investigate the clarity, the acceptance and the compliance of the proposed signal layouts by the drivers and therefore the overall effectiveness of the LRCS in reality. If necessary, the LRCS could be implemented in different steps, the VSLC as a first step and the different signalization approaches as further steps.

Abbreviations

ASR	Technische Regeln für Arbeitsstellen (Technical Regulations for Roadworks)
BSZ	Acceleration and Merging Zone
ES	Bottleneck
FWS	Merging signalization
GTZ	Geschwindigkeitstrichterzone (Speed Funnel Zone)
LCC	Lane Changing Control
LRCS	Lane Reduction Control System
RSA	Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen (Roadworks Safety Regulations)
StVO	Straßenverkehrsordnung (Road Traffic Regulations)
VGB	Variable speed limits
VSLC	Variable Speed Limits Control
WP	Working package
WVZ	Variable message signs
ZDZ	Zurückhalte-(Drosselungs-)Zone (Inflow Reduction zone)

Inhalt

Abkürzungen	8	3 AP2: Beschaffung empirischer Daten und Aufbau Simulation	32
1 Einleitung	9	3.1 Beschaffung und Analyse vorhandener Daten.	32
2 AP1: Stand der Wissenschaft und Technik (Literaturrecherche) ...	9	3.1.1 Auswahl Zeitraum.	33
2.1 Definition Bau- und Arbeitsstellen	9	3.1.2 Ermittlung Verkehrsnachfrage und Kapazität	36
2.2 Regelwerke und Normen	10	3.2 Schnittstelle Steuerungsverfahren	36
2.3 Relevante Vorgaben aus Regelwerken und Normen	10	3.3 Aufbau Simulationsmodell	37
2.4 Auswirkungen von Arbeitsstellen	13	3.3.1 Fahrzeugfolgemodelle	37
2.4.1 Auswirkungen auf den Verkehrsablauf	13	3.3.2 Simulation eines Verkehrszusammenbruchs auf einer Autobahn	39
2.4.2 Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit	14	3.3.3 Fahrstreifenwechselmodelle.	40
2.5 Mikrosimulation	16	3.3.4 Beschreibung des Testfelds und deren Abbildung im Simulator	40
2.5.1 Abbildung des Fahrverhaltens	16	3.4 Kalibrierung und Validierung des Simulationsmodells	41
2.5.2 Simulationsstudien	17	3.4.1 Vorgehensweise bei der Kalibrierung	41
2.6 Steuerungskonzepte	18	3.4.2 Kriterien, Kenngrößen und angestrebte Genauigkeit	42
2.6.1 Problemstellung	18	3.4.3 Anzahl der Simulationsläufe.	42
2.6.2 Verkehrsteuerung an Engstellen	19	3.4.4 Kalibrierungsparameter	43
2.6.3 Fahrstreifenwechselsignalisierung (FWS)	20	3.4.5 Ergebnisse der Kalibrierung.	43
2.6.4 Verkehrsabhängige Geschwindigkeitsbeschränkungen (VGB)	22	3.4.6 Validierung	45
2.7 Akzeptanz.	24	4 AP3: Regelungstechnischer Entwurf und Simulation	48
2.7.1 Akzeptanz des Reißverschlussverfahrens	24	4.1 Führungs-, Stell- und Regelgrößen ...	48
2.7.2 Akzeptanz von Geschwindigkeitsbeschränkungen in Arbeitsstellenbereichen	25	4.1.1 Grundkonzept.	48
2.8 Wirksamkeitsthesen	28	4.1.2 Messungen.	49
2.9 Verkehrstechnische Infrastruktur	29	4.1.3 Stellglieder	50
2.9.1 Datenerfassung	29	4.1.4 Steuerungsziele	51
2.9.2 Signalisierung.	30	4.2 Simulation des Einflusses der Stellgrößen.	52
2.9.3 Stromversorgung	31	4.2.1 Simulierte Infrastruktur und Stellglieder	52
2.9.4 Datenübertragung	32	4.2.2 Empfindlichkeitsuntersuchungen	53
		4.3 Entwurf der Steuerungsstrategie	55
		4.3.1 Übersicht der Steuerungsstrategie. ...	55
		4.3.2 Steuerungsalgorithmus für die Kapazität-VGB	55

4.3.3	Steuerungsalgorithmus für die FWS . . .	56	6 Fazit	95
4.3.4	Steuerungsalgorithmus für ZD-VGB . . .	56	Literatur	95
4.3.5	Steuerungsalgorithmus für Trichter-VGB	56	Bilder	101
4.3.6	Softwareentwicklung	57	Tabellen	103
4.4	Simulationstechnische Überprüfung . . .	57	Abkürzungen	
4.4.1	Simuliertes Verkehrsszenario	57	AD Average Density	
4.4.2	Ergebnisse ohne Steuerung	59	AHS Average Harmonic Speed	
4.4.3	Ergebnisse mit Steuerung	60	AkD Arbeitsstellen kürzerer Dauer	
4.4.4	Untersuchung des Einflusses der Befolgsrate	65	AID Arbeitsstellen längerer Dauer	
4.4.5	Untersuchung des Sollwertes (kritische Verkehrsdichte)	65	AP (blinkender) Ankündigungspfeil	
4.4.6	Untersuchung des zulässigen VGB-Mindestwertes	66	AQ Anzeigequerschnitt	
4.4.7	Diskussion und Eignung der Steuerungsstrategie für andere Arten von Autobahn-Engstellen	72	AVD Average Vehicle Delay	
5	AP4: Detektions- und Signalisierungskonzept	74	BSZ Beschleunigungs- und Streifenwechselzone	
5.1	Anzeigeneinhalte	74	DLZ Dauerlichtzeichen	
5.2	Anzeigentechnologien	75	ES Engstelle	
5.3	Detektionskonzept	76	FBA Fahrstreifenreduktionsbeeinflussungsanlage	
5.4	Energieversorgung	77	FWS Fahrstreifenwechselsignalisierung	
5.5	Datenübertragung	78	GTZ Geschwindigkeitstrichterzone	
5.6	Ausfallkonzept	80	HFS Hauptfahrstreifen	
5.6.1	Kommunikationsstörung	80	MQ Messquerschnitt	
5.6.2	Störungen WVZ-LED	80	SBA Streckenbeeinflussungsanlagen	
5.7	Kommunikationskonzept nach TLS . . .	80	TDT Total Distance Traveled	
5.8	Signalisierungskonzept	81	TLS Technischen Lieferbedingungen für Streckenstationen	
5.8.1	Signalisierungskonzept 1	83	TTT Total Traffic Time	
5.8.2	Signalisierungskonzept 2	87	ÜFS Überholfahrstreifen	
5.9	Befragungen von Verkehrsteilnehmern und Experten	91	VGB Verkehrsabhängige Geschwindigkeitsbeschränkungen	
5.9.1	Verkehrsteilnehmerbefragung	91	VWT Vorwarntafel	
5.9.2	Expertenbefragung	92	WVZ Wechselverkehrszeichen	
5.10	Interpretation der Ergebnisse und Fazit	94	ZD Zuflussdosierung	
5.11	Kostenschätzung	94	ZDZ Zurückhalte- bzw. Drosselungszone	

1 Einleitung

Das Verkehrsaufkommen im Personen und Güterverkehr in Deutschland ist in den letzten 20 Jahren noch stärker angestiegen als von den meisten Prognosen vorhergesagt und wird weiter zunehmen. Der größte Teil dieses Verkehrsaufkommens entfällt auf die Autobahnen (BAB), welche – in den westlichen Bundesländern – überwiegend zwischen 1965 und 1985 für den Verkehr freigegeben worden und somit zunehmend sanierungsbedürftig sind. Insbesondere der hohe Schwerverkehrsanteil schädigt den Straßenoberbau und die Brückenbauwerke stark. Es werden also immer mehr Arbeitsstellen mit unvermeidbaren Fahrstreifensperrungen erforderlich sein, die zusammen mit dem zunehmenden Verkehrsaufkommen zu noch mehr Staus und somit Fahrtzeitverlusten und wahrscheinlich auch (Auf-fahr-)Unfällen an Stauenden führen werden. Nach (KEMPER, 2010) sind bereits heute etwa ein Drittel der staubedingten Fahrtzeitverluste auf Autobahnen in Deutschland durch Arbeitsstellen bedingt.

Potenzielle Maßnahmen, um Staus an Engstellen infolge Fahrstreifenreduktion, die vor allem an Arbeitsstellen aber auch an Übergängen von unterschiedlich ausgebauten Autobahnabschnitten (3 auf 2 Fahrstreifen) und teilweise am Ende von temporären Seitenstreifenfreigaben auftreten, zu verhindern oder zumindest zu verkürzen (spätere Bildung, langsames Wachstum, frühere Auflösung) sind die Fahrstreifenwechselsignalisierung (FWS) und verkehrsabhängige Geschwindigkeitsbeschränkungen (VGB). Diese und weitere Maßnahmen (z. B. Fahrbahnmarkierungen) werden im Kapitel 2.5 ausführlicher dargestellt.

Gesamtziel dieses Projektes ist es daher, eine Fahrstreifenreduktionsbeeinflussungsanlage (FBA) zu entwickeln, die – zumindest – FWS und VGB kombiniert und die Leistungsfähigkeit und Verkehrssicherheit an Engstellen erhöht. Dies beinhaltet sowohl die Entwicklung des Steuerungsverfahrens als auch die Konzeption der – im Bereich von Arbeitsstellen schwierigeren – Detektion und Signalisierung. Bei der Entwicklung des Steuerungsverfahrens muss insbesondere die Akzeptanz der Maßnahmen durch die Fahrer berücksichtigt werden.

Im Arbeitspaket (AP) 1 wird der für die Entwicklung einer FBA für Baustellen auf BAB relevante Stand der Wissenschaft und Technik zusammengefasst. Dazu wird zuerst beschrieben, was unter einer Bau- bzw. Arbeitsstelle zu verstehen ist (Kapitel 2.1) und

auch welche (negativen) Auswirkungen auf das Fahrverhalten auftreten (Kapitel 2.4). Nachfolgend werden die Modellierung des Fahrverhaltens an Engstellen anhand von bisherigen Simulationsstudien beschrieben (Kapitel 2.5), mögliche Lösungsansätze zur Verkehrssteuerung zur Minderung der Auswirkungen vorgestellt (Kapitel 2.6) und die zur Verfügung stehenden geeignete Möglichkeiten und Technologien zur Installation der benötigten Infrastruktur (Kapitel 2.9) beschrieben. All dies dient als Grundlage für die nachfolgend beschriebenen Arbeitspakete. Im AP 2 wird die Beschaffung geeigneter Daten (Kapitel 3.1) sowie die Mikrosimulation des Fahrverhaltens stromaufwärts einer Arbeitsstelle (mit Fahrstreifenreduktion von 4 auf 3 Fahrstreifen) auf der ausgewählten Teststrecke (Autobahn A 3 in Nordrhein-Westfalen nordöstlich von Köln, Fahrtrichtung Leverkusen) mithilfe von AIMSUN beschrieben (Kapitel 3.3). Dazu wird auf die Anwendung von geeigneten Mikrosimulationsmodellen (Kapitel 3.2), sowie auf die dynamische Simulation der Steuerungsstrategie und den Kalibrierungs- und Validierungsprozess (Kriterien und Kalibrierungsparameter) eingegangen (Kapitel 3.4). Auf dem daraus erzeugten und kalibrierten Modell basiert der im AP 3 beschriebene regelungstechnische Entwurf der Steuerungsstrategie (Kapitel 4.3). In (Kapitel 4.1) werden zusätzlich die Führungs-, Stell- und Regelgrößen beschrieben und in (Kapitel 4.4) die Auswirkungen der Steuerung simulationstechnisch überprüft und durch einen Mit-Ohne-Vergleich bewertet. Abschließend wird im AP 4 ein auf den Regelwerken und Normen (Kapitel 2.2 und 2.3) sowie dem entworfenen Steuerungskonzept basierendes Detektions- und Signalisierungskonzept vorgeschlagen, wobei auch auf Aspekte wie der Energieversorgung und Datenübertragung eingegangen wird.

2 AP1: Stand der Wissenschaft und Technik (Literaturrecherche)

2.1 Definition Bau- und Arbeitsstellen

Umgangssprachlich und z. B. auch in Verkehrsmeldungen wird bei Arbeiten im Bereich von Straßen i. d. R. der Begriff Baustelle verwendet. Da es sich bei den Arbeiten aber nicht nur um Bauarbeiten, sondern z. B. auch um Mäharbeiten handeln kann, soll im Folgenden einheitlich der allgemeinere Begriff Arbeitsstelle verwendet werden.

Als Arbeitsstellen an Straßen werden gemäß der Richtlinie für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen (RSA, 1995) solche Stellen bezeichnet, bei denen Verkehrsflächen aufgrund von Arbeiten vorübergehend für den Verkehr gesperrt werden. Anlass hierfür können z. B. Arbeiten an der Straße selbst, Arbeiten neben oder über der Straße, Arbeiten an Leitungen in oder über der Straße sowie Vermessungsarbeiten sein.

Die Arbeitsstellen werden nach (RSA, 1995) bezüglich der Gestaltung der Sicherungsmaßnahmen wie folgt unterschieden:

- Arbeitsstellen längerer Dauer (AID) sind alle Arbeitsstellen, die mindestens einen Kalendertag durchgehend und ortsfest bestehen.
- Arbeitsstellen kürzerer Dauer (AkD) sind alle Arbeitsstellen, die nur über eine begrenzte Stundenzahl, in der Regel während der Tageshelligkeit eines Kalendertages, bestehen, auch wenn die Arbeiten an den folgenden Tagen fortgesetzt werden.

2.2 Regelwerke und Normen

Bei der Planung und Durchführung von Arbeitsstellen sind verschiedene Gesetze, Richtlinien und sonstige Vorgaben in der jeweils gültigen Fassung zu beachten. Nachfolgend sind die grundlegenden Regelwerke aufgeführt:

- Bürgerliches Gesetzbuch (BGB),
- Bundesfernstraßengesetz (FStrG),
- Straßenverkehrsgesetz (StVG),
- Straßenverkehrs-Ordnung (StVO),
- Allgemeine Verwaltungsvorschriften zur StVO (VwV-StVO),
- Polizei- und Ordnungsrecht der Länder,
- Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen (RSA) Die RSA gelten für die verkehrsrechtliche Sicherung von Arbeitsstellen an und auf Straßen. Sie unterscheiden nach den Anwendungsbereichen innerörtliche Straßen (Teil B), Landstraßen (Teil C) und Autobahnen (Teil D).
- Richtlinien für Wechselverkehrszeichen an Bundesfernstraßen (RWVZ),

- Norm DIN EN 12966: Vertikale Verkehrszeichen – Wechselverkehrszeichen,
- HAV – Hinweise für das Anbringen von Verkehrszeichen und Verkehrseinrichtungen,
- Richtlinien für Wechselverkehrszeichenanlagen an Bundesfernstraßen (RWVA),
- Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA),
- Richtlinien für die Markierung von Straßen (RMS),
- Richtlinien für passiven Schutz an Straßen durch Fahrzeug-Rückhaltesysteme (RPS),
- Richtlinien für Umleitungsbeschilderungen (RUB),
- Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT),
- Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Sicherungsarbeiten an Arbeitsstellen an Straßen (ZTV-SA),
- Leistungsheft für den Straßenbetriebsdienst auf Bundesfernstraßen,
- Handbuch für die Vergabe und Ausführung von Bauleistungen im Straßen- und Brückenbau (HVA B-StB),
- RAL-Gütebedingungen für Verkehrszeichen,
- gültige technische Lieferbedingungen,
- Merkblatt über Rahmenbedingungen für erforderliche Fachkenntnisse zur Verkehrssicherung von Arbeitsstellen an Straßen (MVAS),
- Hinweise für die Wahl der Bauart von Verkehrszeichen und Verkehrseinrichtungen,
- Hinweise für umsetzbare Stauwarnanlagen (HUS).

Hinzu kommen ggf. länderspezifische Regelungen und Allgemeinverfügungen.

2.3 Relevante Vorgaben aus Regelwerken und Normen

An Arbeitsstellen besteht eine Verkehrssicherungspflicht. Die Straßen müssen in einem ungefährlichen Zustand erhalten bleiben oder es müssen zur

Abwehr von Gefahren nötige Sicherungsvorkehrungen getroffen werden. Die Verkehrssicherungspflicht obliegt der Behörde ebenso wie dem Unternehmer. Die Rechtsgrundlage für alle verkehrslenkenden, -beschränkenden oder -verbietenden Maßnahmen auf öffentlichen Verkehrsflächen ist die Straßenverkehrs-Ordnung StVO (§ 45 Abs. 1 und 2).

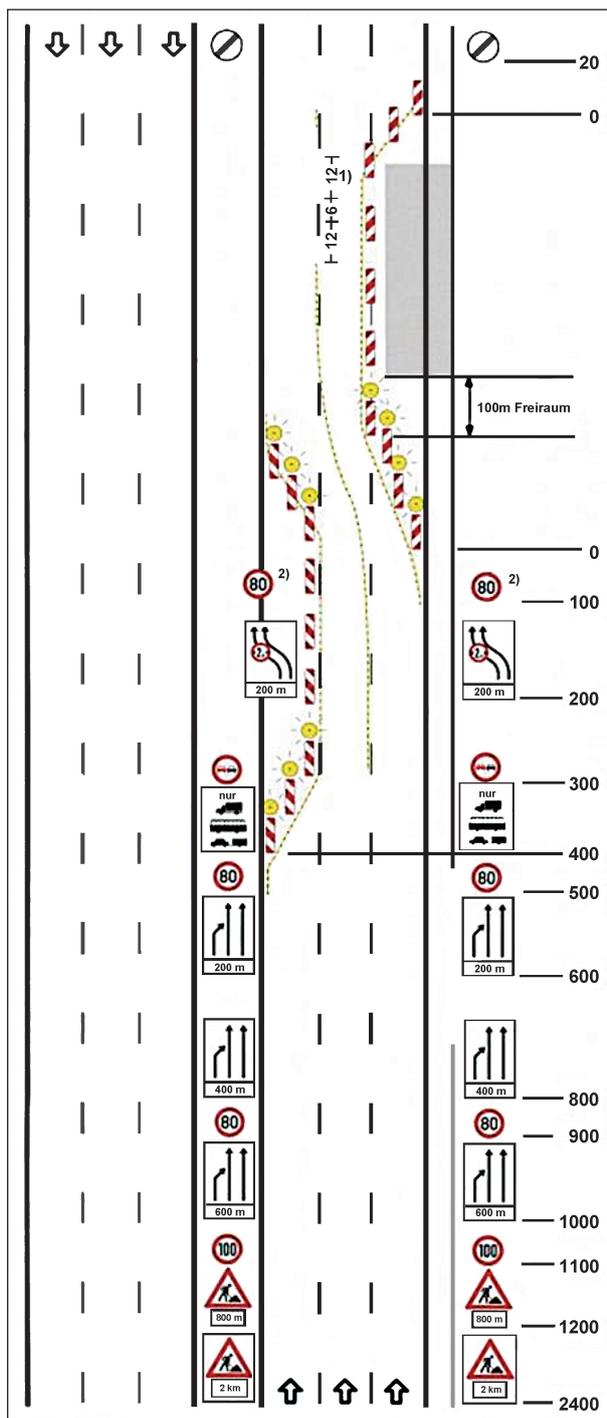


Bild 1: Regelplan D I/6: Verkehrsführung 3n + 2 (2 (Behelfs-) Fahrstreifen auf eingeschränkter dreistreifiger Fahrbahn) (RSA, 1995)

Alle Gebote und Verbote für die Verkehrsteilnehmer sind durch Verkehrszeichen und -einrichtungen nach der StVO anzuordnen. Die Anordnung erfolgt durch die Straßenbaubehörde, wobei die Straßenverkehrsbehörde diese durch eigene Anordnungen ergänzen oder ersetzen kann. Eine verkehrsrechtliche Anordnung ist im Vorfeld der Arbeiten bei der Straßenverkehrsbehörde einzuholen und legt die Maßnahmen für die Beschilderung und Absperrung einer Arbeitsstelle fest.

Verkehrszeichenpläne sind fester Bestandteil der verkehrsrechtlichen Anordnung. Auf Basis der Ergebnisse der Forschungsarbeit, können die bestehenden Regelpläne für Standardsituationen ergänzt werden. Die Grundlage für die Signalisierung von Arbeitsstellen auf Autobahnen bildet die Richtlinien für die Erstellung von Arbeitsstellen an Straßen (RSA, 1995), wobei hier besonders der Teil A (Allgemein) Kapitel 1.5 und Teil D (Autobahnen) zu erwähnen ist. Die Richtlinie enthält u. a. Regelpläne für die Markierung und Signalisierung von Arbeitsstellen. Ein projektrelevantes Beispiel für einen Regelplan ist in Bild 1 dargestellt.

Wie bereits erwähnt, unterscheidet die RSA bei der Ausführung von Sicherungsmaßnahmen zwischen Arbeitsstellen von längerer und kürzerer Dauer.

Unter Einbeziehung existierender Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA) können weitere Unterscheidungen getroffen werden. Durch den gezielten Einsatz von Sonderprogrammen zur Fahrstreifenperrung und Hinweisen auf die Baustelle wird die Verkehrsführung verbessert und die Sicherheit erhöht.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die unterschiedlichen Anwendungsfälle auf Autobahnen (BAB) inklusive temporärer Seitenstreifenfreigabe (TSF):

Warneinrichtungen

In den Regelplänen der RSA werden Maßnahmen der Baustellenmarkierung und -signalisierung für typische Arbeitsstellen standardisiert. Wie in Bild 1 dargestellt, befinden sich Beschilderungen zu Geschwindigkeitsbeschränkungen, Baustellenbeschilderung und Vorwarntafeln an definierten Standorten in Bezug zur Engstelle.

In der RSA werden neben der Ausgabe standardisierter Regelpläne auch die Funktion und Anwendung von Verkehrseinrichtungen in Arbeitsstellen definiert. Von besonderem Interesse im Hinblick auf

Arbeitsstelle auf BAB	Typ	Ausstattung
außerhalb SBA	längere Dauer	gemäß RSA
außerhalb SBA	kürzere Dauer	gemäß RSA
mit umsetzbarer Stauwarnanlage	längere Dauer	gemäß RSA und HUS
im Bereich SBA	längere Dauer	gemäß RSA und SBA-Sonderprogramm; eventuell erforderlich: teilweise Deaktivierung der SBA (MQ/AQ) wegen Ergänzung durch RSA-Anzeigen
im Bereich SBA	längere Dauer	gemäß RSA und SBA-Sonderprogramm (Anpassung SBA-Steuerung erforderlich); Integration der RSA-Anzeigen in die SBA (z. B. VZ Hessen Baustelle des 21. Jahrhunderts)
im Bereich SBA	kürzere Dauer	stationär: gemäß RSA und SBA-Sonderprogramm
im Bereich SBA	kürzere Dauer	mobil: gemäß RSA und SBA-Sonderprogramm (Wanderbaustelle)
im Bereich SBA mit TSF	kürzere Dauer	stationär: gemäß RSA und SBA-Sonderprogramm unter Benutzung der Zeichen 223.1 bis 223.3

Tab. 1: Unterscheidung von Arbeitsstellen nach RSA

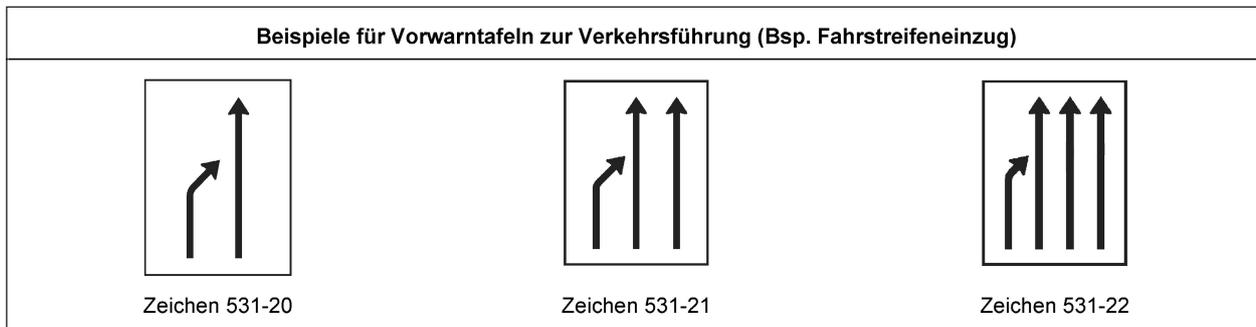


Bild 2: Beispiele Vorwarntafeln

die vorliegende Aufgabenstellung sollen dabei die Vorwarntafeln sein.

Nach RSA (1995) können Warneinrichtungen behelfsmäßig oder zusätzlich zu Absperrgeräten (bspw. fahrbare Absperrtafeln) verwendet werden (§ 43 Abs. 3 Nr. 2 StVO). Sie dienen der frühzeitigen bzw. auffälligen Warnung vor unerwarteten Verkehrseinschränkungen. Sie können neben Warneinrichtungen ausgebildet sein. Vorwarneinrichtungen sind als Ankündigung auf Straßen mit zwei oder mehr Fahrstreifen in Abhängigkeit von der Erkennbarkeit von fahrbaren Absperrtafeln als zusätzliche Warneinrichtungen aufzustellen (RSA 1995). Vorwarntafeln können mit den Zeichen 501 bis 546 (Verkehrslenkungstafeln) wie beispielsweise Zeichen 531 unter Ergänzung einer Geschwindigkeitsbeschränkung angebracht werden.

In Bild 2 sind Beispiele für Warneinrichtungen, die die Verkehrsführung erleichtern sollen, bei beispielsweise Anordnung eines Fahrstreifeneinzugs des linken Fahrstreifens dargestellt. Es ist dabei

zu beachten, dass Verkehrslenkungstafeln um eine Entfernungsangabe auf einem Zusatzzeichen ergänzt werden sollen, die der Ankündigung dienen (VwV-StVO zu § 39-45 StVO).

Die Anordnung unterschiedlicher Fahrstreifenwechselforgänge mit beispielsweise Zeichen 531-21 ist nach § 42 Abs. 2 StVO ein Richtzeichen. Die nach § 42 StVO beschriebenen Richtzeichen können auch Ge- oder Verbote enthalten. Richtzeichen geben in der Form von Vorwarneinrichtungen Hinweise oder Empfehlungen zur Erleichterung des Verkehrs (§ 42 Abs. 1 StVO).

Mit Zeichen 123 (Gefahrzeichen) wird darüber hinaus prinzipiell auf eine Baustelle hingewiesen. Die Beschilderung erfolgt an Standorten nach RSA.

Geschwindigkeit

Nach den Regelplänen der RSA wird in Arbeitsstellen üblicherweise eine zulässige Geschwindigkeit von 80 km/h angeordnet. Dies wird mithilfe von statischer Beschilderung (Blechschilder) in Form

eines Geschwindigkeitstrichters im Bereich vor der Engstelle und an je nach Art der Baumaßnahme beschriebenen Standorten signalisiert (vgl. Bild 1).

Neben einer statischen Signalisierung kann die Signalisierung von beispielweise Verkehrsführung oder Geschwindigkeitsbeschränkung auch mithilfe von Wechselverkehrszeichen erfolgen. Die Signalisierung mithilfe von Wechselverkehrszeichen soll sich jedoch grundsätzlich nicht von den Verkehrszeichen, die in der StVO sowie der VwV-StVO beschrieben werden, unterscheiden (RWVZ 1997).

Für die Begrenzung der zulässigen Geschwindigkeit gibt insbesondere die StVO und die VwV-StVO Regeln vor. Gemäß der StVO ist die Grundlage die Geschwindigkeit zu begrenzen eine kapazitätserhöhende Maßnahme, wenn gemäß § 45 Abs. 9 besondere Umstände, zu denen beispielsweise auch Arbeitsstellen gehören, geboten sind. Es wird dabei nicht festgelegt, welche Mindestgeschwindigkeiten an Bundesfernstraßen festgelegt werden müssen. Nach VwV-StVO zu § 41 (zu Zeichen 274 zulässige Höchstgeschwindigkeit) ist eine stufenweise Herabsetzung der Geschwindigkeit auf Autobahnen zulässig. Eine solche Geschwindigkeitsstufe soll dabei höchstens 40 km/h betragen und der Mindestabstand zwischen den unterschiedlichen Höchstgeschwindigkeiten soll das 10-fache der Geschwindigkeitsdifferenz betragen. Dies ist insbesondere für die Gestaltung des Geschwindigkeitstrichters von Bedeutung. Für eine Geschwindigkeitsstufe von 100 km/h auf 80 km/h wird demnach bei einer Geschwindigkeitsdifferenz von 20 km/h ein Mindestabstand von 200 m erforderlich.

Regeln und Zeichen zur zulässigen Höchstgeschwindigkeit sind Vorschriftszeichen (§ 41 StVO) bzw. Gebote. Dies bedeutet, dass nicht schneller als mit der jeweils angegebenen Höchstgeschwindigkeit gefahren werden darf.

Fahrestreifeneinzug

Der Verkehrsablauf bei Fahrestreifeneinzug wird in Deutschland gemäß § 7 Abs. 4 StVO geregelt. Es heißt dort:

„Ist auf Straßen mit mehreren Fahrestreifen für eine Richtung das durchgehende Befahren eines Fahrestreifens nicht möglich oder endet ein Fahrestreifen, ist den am Weiterfahren gehinderten Fahrzeugen der Übergang auf den benachbarten Fahrestreifen in der Weise zu ermöglichen, dass sich diese Fahrzeuge unmittelbar vor Beginn der Verengung

jeweils im Wechsel nach einem auf dem durchgehenden Fahrestreifen fahrenden Fahrzeug einordnen können (Reißverschlussverfahren).“

Das Reißverschlussverfahren schreibt demnach das auszuführende Verhalten der Verkehrsteilnehmer vor, welches sich zum Einen ganz grundsätzlich unter Berücksichtigung der ständigen Vorsicht und gegenseitigen Rücksichtnahme erfolgen sollte (§ 1 Abs. 1 StVO) und zum Anderen darauf aufbauend ein Einfädeln der Fahrzeuge des Einzugsfahrestreifens auf einen danebenliegenden durchgehenden Fahrestreifen beinhaltet. Wie bei einem Reißverschluss soll sich jeweils auch ein Fahrzeug des Einzugsfahrestreifens in die Kolonne der Fahrzeuge durchgehenden Fahrestreifens einfädeln können. Dies soll am Beginn der Engstelle stromabwärts geschehen.

2.4 Auswirkungen von Arbeitsstellen

2.4.1 Auswirkungen auf den Verkehrsablauf

An Arbeitsstellen sind häufig Änderungen der Verkehrsführung, wie z. B. schmalere Fahrestreifen und Verschwenkungen, der Wegfall des Seitenstreifens, verkürzte Beschleunigungs- und Verzögerungstreifen an Ein- und Ausfahrten und die Reduzierung der Anzahl der Fahrestreifen (Fahrestreifenreduktion), unvermeidbar. Diese Maßnahmen haben i. d. R. negative Auswirkungen auf den Verkehrsfluss und führen durch die Reduzierung der Kapazität (bei deren Überschreitung) zu Staus und erhöhten Fahrtzeiten. Nach (KEMPER, 2010) sind etwa ein Drittel der staubedingten Fahrtzeitverluste auf Autobahnen in Deutschland durch Arbeitsstellen bedingt. Zur Verbesserung des Verkehrsablaufs und zur Erhöhung der Sicherheit der Verkehrsteilnehmer aber auch der Arbeiter werden stromaufwärts und im Bereich von Arbeitsstellen Geschwindigkeitsbeschränkungen angeordnet, die ebenfalls erhöhten Fahrtzeiten (gegenüber dem Fall ohne Arbeitsstelle) zur Folge haben. Außerdem wird von vielen Verkehrsteilnehmern das Fahren auf schmalen Fahrestreifen insbesondere beim Überholen von Lkw als unangenehm empfunden (verminderter Fahrkomfort).

Im Folgenden wird der für die spätere Ableitung von Maßnahmen relevante Verkehrsablauf im Bereich einer sog. „Engstelle“ – im Englischen als „bottleneck“ (Flaschenhals) bezeichnet – infolge einer Fahrestreifenreduktion detaillierter betrachtet.

Bei einer Fahrstreifenreduktion ist die Querschnittskapazität stromaufwärts der Engstelle größer als die Querschnittskapazität an und stromabwärts der Engstelle. Solange die Verkehrsstärke stromaufwärts kleiner als die Kapazität der Engstelle bleibt, treten i. d. R. keine nennenswerten Verkehrsstörungen auf. Wenn jedoch das Verkehrsaufkommen größer als die Kapazität der Engstelle ist, wird die Leistungsfähigkeit der Engstelle überschritten und es bildet sich ein Stau.

Die Kapazität ist hierbei die größte Verkehrsstärke, die an einem Querschnitt unter den gegebenen Randbedingungen (z. B. Umfeldbedingungen, Verkehrszusammensetzung) erreicht werden kann. Der Verkehrsablauf ist beim Übergang vom stabilen in den instabilen Bereich stark durch stochastische Einflüsse geprägt, sodass bei einer sehr hohen Verkehrsstärke und der damit verbundenen Dichte bei gleichzeitig hohem Geschwindigkeitsniveau bereits eine singuläre Störung des Verkehrsablaufs, z. B. ein mäßiger Bremsvorgang bei der Einfahrt in den Arbeitsstellenbereich bzw. ein aggressiver Fahrstreifenwechsellvorgang, zum Zusammenbruch des Verkehrs führen kann. Bricht der Verkehr an einer Engstelle zusammen, spricht man von einer aktivierten Engstelle. Der Übergang vom stabilen zum instabilen Verkehrsfluss ist in diesem Fall durch einen Sprung im Fundamentaldiagramm gekennzeichnet, den sogenannten Kapazitätseinbruch (Englisch: capacity drop, siehe Bild 3).

Die Kapazität ist kein direkter einzelner Wert, der bei einmaliger Beobachtung als maximale Verkehrsstärke ohne Zusammenbruch des Verkehrsablaufs gesetzt werden kann. Vielmehr kann es

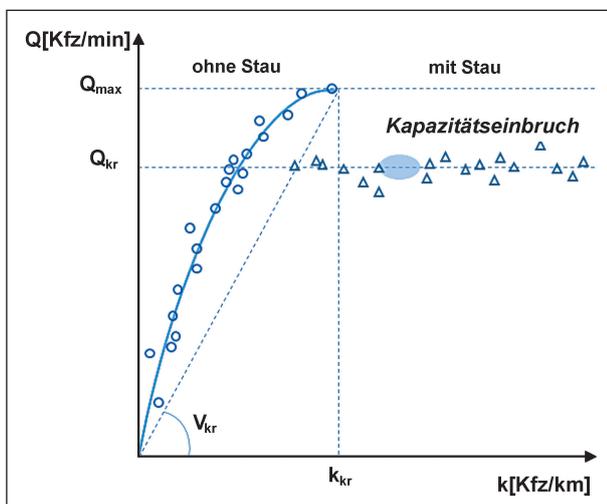


Bild 3: Fundamentaldiagramm an einer Engstelle mit den Teilkurven „ohne Stau“ und „mit Stau“

auch zu Verkehrszuständen kommen, in denen höhere Verkehrsstärken auftreten. Grund dafür kann eine optimale Kombination von kapazitätsbeeinflussenden Randbedingungen sein (sehr gute Witterungsbedingungen, hoher Anteil ortskundiger Fahrer, niedriger Schwerverkehrsanteil etc.) gepaart mit dem zufälligen Ausbleiben ungünstiger Fahrmanöver seitens einzelner Fahrzeugführer. In vielen Fällen kommt es aber schon bei deutlich geringeren Verkehrsstärken und einer ungünstigeren Kombination von Randbedingungen und individuellem Fahrverhalten zu Verkehrszusammenbrüchen. Aus diesem Grund ist es nicht zielführend, die Kapazität als theoretisch maximal erreichbaren Wert der Verkehrsstärke zu setzen. Es muss ein Kompromiss gefunden werden, der die Ansprüche sowohl aus der theoretischen als auch aus der praktischen Kapazität berücksichtigt. Dieser Sachverhalt zeigt die Schwierigkeiten der genauen Kapazitätsbestimmung auf. Auf der einen Seite dürfen die theoretisch möglichen Werte nicht vollständig ausgeblendet werden, auf der anderen Seite kann nicht ausschließlich die kleinste maximale Verkehrsstärke als Kapazität angenommen werden (SÜMMERMANN, 2012). In der Tat, führen allein schon unterschiedliche vorgeschlagene Kapazitätsdefinitionen zu bis zu 10 % unterschiedlichen Kapazitätswerten, wenn sie auf historische Daten einer Engstelle eingesetzt werden. Die kritische Dichte (oder Belegungsgrad) hingegen, bei der der Verkehrszusammenbruch auftritt, scheint weit stabiler zu sein, als die Verkehrsflusskapazität. Es ist daher im Sinne der Verkehrsflussmaximierung sinnvoll, die kritische Dichte anstelle der stochastischen Kapazität zum Ziel entsprechender Steuerungsmaßnahmen heranzuziehen.

2.4.2 Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit

Neben den zuvor beschriebenen negativen Auswirkungen auf den Verkehrsablauf (siehe Kapitel 2.4.1) haben Arbeitsstellen auch negative Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit.

Im Jahr 2001 sind bei 3.856 Unfällen im Bereich von Arbeitsstellen 69 Personen tödlich verunglückt. Dies sind ca. 1 % aller im Jahr 2001 im Straßenverkehr Getöteten. Auf Autobahnen betrug dieser Anteil sogar ca. 4 %. (DVR, 2015).

Laut Statistischem Bundesamt schwankt die Anzahl der Unfälle in Arbeitsstellenbereichen in Deutschland während der letzten achtzehn Jahre zwischen 4,2 % und 6,8 % der Gesamtzahl der Unfälle (siehe Bild 4).

In Bild 5 ist die Anzahl der Personenschäden pro Jahr dargestellt.

Untersuchungen zum Unfallgeschehen an AkD auf Bundesautobahnen wurden von (GREBE & HANKE, 1991) für Hessen und (DURTH et al., 1999) durchgeführt. Daraus hat sich ergeben, dass die Unfallrate und insbesondere die Unfallkostenrate, welche ein Indikator für die Schwere der Unfälle ist, im Bereich von AkD deutlich höher als die entsprechenden Werte ohne Arbeitsstellen und die

Durchschnittswerte auf allen Autobahnen waren. Es konnten jedoch keine ähnlichen Untersuchungen auf AID gefunden werden.

Im Rahmen von Auswertungen von Unfalldaten von den hessischen Autobahnen aus den Jahren 1991 bis 1996 wurde festgestellt, dass trotz des erhöhten Unfallrisikos im Bereich von Arbeitsstellen auf Autobahnen die Verkehrssicherheit dort noch immer größer war als im nachgeordneten Netz. Damit würden Umleitungsstrecken über das nachgeordnete



Bild 4: Anteil der Unfälle in Arbeitsstellenbereichen auf Autobahnen an der Gesamtzahl der Unfälle in Deutschland (1995 – 2013) (Statistisches Bundesamt, 2014)

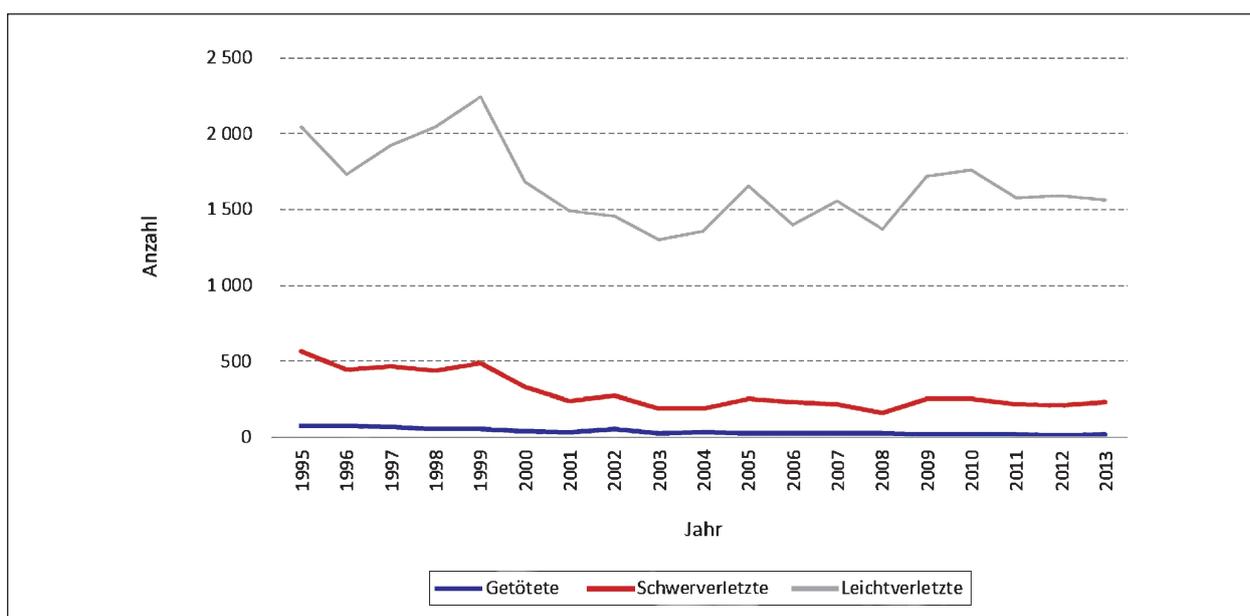


Bild 5: Anzahl Personenschäden für Unfälle in Arbeitsstellenbereichen auf Autobahnen in Deutschland 1995 – 2013 (Statistisches Bundesamt, 2014)

Netz aus Sicht der Verkehrssicherheit keine geeignete Lösung darstellen. Die entsprechenden Untersuchungen haben auch ergeben, dass die Unfallhäufigkeit im Bereich von AkD deutlich größer war als ohne Arbeitsstellen und auch als im Bereich von AID. Die meisten Unfälle im Bereich von AkD haben sich im Längsverkehr ereignet (23 % Stau, 21 % Einholen eines Einzelfahrzeuges). Die häufigsten Unfallarten waren Kollisionen mit Verkehrsteilnehmern, die vorausfahren oder warten (38 %) sowie die seitlich in gleicher Richtung fahren (16 %).

Hieraus und aus den durchgeführten Untersuchungen zum Fahrverhalten hat (STÖCKERT, 2001) die folgenden Ansätze zur Reduzierung der Unfallwahrscheinlichkeit im Bereich von Arbeitsstellen abgeleitet:

- Vermeiden von Stau,
- reduzieren der Geschwindigkeiten,
- harmonisieren der Geschwindigkeiten,
- Verbesserungen der Verkehrsführung,
- vereinfachen der Fahrstreifenwechsel.

2.5 Mikrosimulation

2.5.1 Abbildung des Fahrverhaltens

Mikrosimulation bietet die Möglichkeit, unterschiedlichen Untersuchungsszenarien ohne große Aufwände zu vergleichen. Durch ein Simulationsmodell lassen sich nicht nur durchschnittlich Verhältnisse, sondern auch ungewöhnliche Kombinationen örtlicher oder temporärer Besonderheiten sowie das Zusammenspiel verschiedener benachbarter Elemente des Straßennetzes realitätsnah abbilden (HARDING, 2007). Dies kann durch die Anwendung von Fahrzeugfolge- und Fahrstreifenwechselmodellen erreicht werden. Dadurch kann eine Bandbreite von Werten für jede einzelne relevante Variable getestet werden, während alle bedeutsame Verkehrskenngrößen ermittelbar sind (FGSV, 2006), was durch eine Feldstudie nicht immer machbar ist. Die Integrität der Modelle kann durch die Kalibrierungs- und Validierungsprozesse gewährleistet werden, wobei die Modellparameter so angepasst werden sollen, dass die Simulation hinreichend genau reale Verhältnisse wiedergibt.

Daher bietet Mikrosimulation gegenüber den traditionellen Untersuchungsmethoden wesentliche Vor-

teile, unter anderem in Baustellenbereichen, wobei das Fahrverhalten, insbesondere in Verflechtungsbereichen stromaufwärts einer Fahrbahnverengung, von großem Interesse ist. In solchen Fällen werden die Fahrer nicht anhand von dem „All or Nothing“- (AON-)Prinzip ihre Fahrstreifenwechselentscheidung treffen, sondern auf Basis von unterschiedlichen, persönlichen Kriterien, ihrer Wahrnehmung und sozialen bzw. kulturellen Aspekten (WALKER & CALVERT, 2015). Es gibt eine Menge von Annahmen, wie die Fahrer unter solchen Umständen lenken, jedoch wurden kaum praktische Untersuchungen zum Thema gefunden. In einigen Regionen befolgen die Fahrer nahtlos das Reißverschlussverfahren, um sich reibungslos einordnen und durchfahren zu können, während in anderen Regionen ein häufiger Fahrstreifenwechsel vor der Engstelle erfolgt, sodass sich ein unstabiler Verkehrsfluss ergeben kann. Um dies zu vermeiden, findet das Reißverschlussverfahren in einigen Fällen bereits ein Paar Kilometer vor der Engstelle statt. Da die Erhöhung des Durchflusses an einer Engstelle durch die Verkehrssteuerung innerhalb der Verflechtungsstrecke stark von dem Fahrverhalten abhängt, kann nur ein besseres Verständnis des Fahrverhaltens zu zufriedenstellenden Ergebnissen führen (WALKER & CALVERT, 2015).

Unter der Annahme, dass sich die Fahrer anders als unter stabilen Verkehrsumständen verhalten, sollen Simulationsmodelle, welche diese Besonderheiten berücksichtigen, verwendet werden, um die Verkehrslage mit hoher Genauigkeit nachbilden zu können. Modellierter Fahrzeugführer können ihr Fahrverhalten, im Gegensatz zur Realität, vor bzw. in Arbeitsstellenbereichen nicht unterscheiden und verhalten sich daher genauso wie bei stabilen Verkehrssituationen. Außerdem kann es viele Unterschiede zwischen Fahrzeugführern bezüglich ihres Fahrstreifenwechselverhaltens geben. Dies kann durch die Optimierung der Simulationsmodelle für einige Fahrzeugklassen bzw. Strecken abgebildet werden. ZHENG (2014) weist darauf hin, dass diese Unterschiede maßgeblichen Einfluss darauf haben, wie sich ein Fahrstreifenwechsel auf die benachbarten Fahrzeuge auswirkt. In den wenigen Modellen, in denen Fahrereigenschaften betrachtet werden, sind diese allerdings nur mit wenigen Parametern vereinfacht abgebildet. Aus diesem Grund spricht der Autor den Bedarf der Weiterentwicklung von Fahrstreifenwechselmodellen an und kennzeichnet diesbezüglich die Simulationswerkzeuge sogar als inadäquat. Das kann daran liegen, dass

die entsprechenden Modelle nicht auf Basis von Videoaufzeichnungen bzw. Fahrer-Umfragen validiert wurden, sowie dass die gescheiterten Fahrstreifenwechselversuche während der Validierung nicht berücksichtigt wurden.

Alle die oben genannten Aspekte und möglichen Schwierigkeiten müssen bei der Mikrosimulation im Rahmen dieses Projektes berücksichtigt werden. Im folgenden Kapitel werden deshalb bisherige Mikrosimulationen von Engstellen auf Autobahnen beschrieben. Allerdings ist aus den gefundenen Quellen nur teilweise ersichtlich, ob und wie die oben genannten Aspekte und möglichen Schwierigkeiten berücksichtigt bzw. gelöst wurden.

2.5.2 Simulationsstudien

Es gibt viele Simulationsmodelle, die das Fahrverhalten aus verschiedenen Perspektiven beschreiben und deren Leistungen ähnlich sind. Da die im Folgenden beschriebenen Studien meist entweder VISSIM oder AIMSUN verwenden, werden hier die in diesen beiden Simulationswerkzeugen verfügbaren Modellparameter beschrieben. Neben der Kalibrierung der Modellparameter ist eine dynamische Verbindung zwischen den modellierten Fahrzeugen und den Steuerungsalgorithmen, welche die Geschwindigkeits- und Verflechtungsempfehlungen geben, notwendig. Dies kann in VISSIM

über die COM-Schnittstelle und in AIMSUN mithilfe des Software Developer Kits (SDK) realisiert werden.

(LU et al., 2014) haben in ihrer Studie sowohl VISSIM als auch AIMSUN verwendet. Die in VISSIM und AIMSUN verfügbaren Parameter für Simulationen von Autobahnen sind in Tabelle 2 und Bild 6 dargestellt.

Es sind viele Richtlinien, Vorgaben und Hinweise zum Thema Kalibrierung und Validierung von Simu-

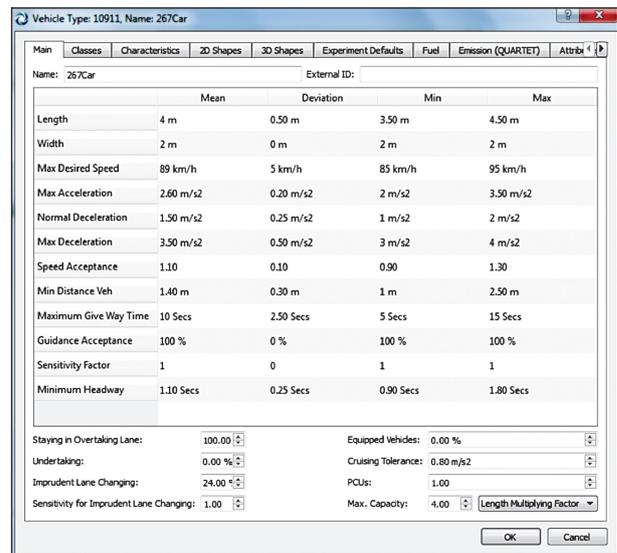


Bild 6: Kalibrierungsparameter von AIMSUN (LU et al., 2014)

Main Line and Diverge Section Parameter	Value	Merge Section Parameters
Maximum Look Ahead Distance	692.5 ft	Maximum Look Ahead Distance
Number of Observed Preceding Vehicles	2 veh	Number of Observed Preceding Vehicles
CCO – Average standstill distance	4.3 ft	CCO – Average standstill distance
CC1 – headway at a certain speed	0.90 sec	CC1 - headway at a certain speed
CC2 – longitudinal oscillation	13.12 ft	CC1 - longitudinal oscillation
CC3 – start of the deceleration process	-8.0	CC3 – start of the deceleration process
CC9 – acceleration behavior at v ~ 80 km/h/	4.92 ft/sec ²	CC9 – acceleration behavior at v ~ 80 km/h/
Maximum Deceleration for Leading Vehicle	6.04 ft/sec ²	Maximum Deceleration for Leading Vehicle
Reduction Rate for Leading Vehicle	62.53 ft/	Reduction Rate for Leading Vehicle
Accepted Deceleration for Leading Vehicle	1.48 ft/sec ²	Accepted Deceleration for Leading Vehicle
Maximum Deceleration for Following Vehicle	5.09 ft/sec ²	Maximum Deceleration for Following Vehicle
Reduction Rate for Following Vehicle	36.07 ft/	Reduction Rate for Following Vehicle
Accepted Deceleration for Following Vehicle	4.49 ft/sec	Accepted Deceleration for Following Vehicle
Minimum Headway	3.94 ft	Minimum Headway
Safety Distance Reduction Factor	0.14	Safety Distance Reduction Factor
Max. Deceleration for Cooperative Braking	11.35 ft/sec	Max. Deceleration for Cooperative Braking
Max. Speed Difference for Cooperative Braking	15.99 ft/sec	Max. Speed Difference for Cooperative Braking
Max. Collision Time for Cooperative Braking	7.22 sec	Max. Collision Time for Cooperative Braking

Tab. 2: Kalibrierungsparameter von VISSIM (LU et al., 2014)

lationsmodelle vorhanden. In Deutschland wurde von der FGSV die Hinweise zur Mikroskopischen Verkehrssimulation ausgegeben (FGSV, 2006). Ziel der Kalibrierung ist es, eine kleinstmögliche Abweichung zwischen realen und simulierten Daten mit einem gewählten Konfidenzintervall zu erreichen. Falls die Abweichung auf Basis von Fehlermaßen berechnet wird, entspricht dies einer quantitativen Kalibrierung. Der Anpassungsprozess der Parameter kann entweder manuell (Trial and Error) oder algorithmisch-numerisch (z. B. mittels evolutionären Algorithmen) erfolgen (FGSV, 2006). Es kann andererseits auch ein qualitativer Kalibrierungsprozess stattfinden, wie von (GOMES et al., 2004) vorgeschlagen. Die Autoren haben in ihrer Arbeit eine Reihe von Herausforderungen wie z. B. die Simulation von speziellen Fahrstreifen für Fahrzeuge mit einer Mindestbesetzung (High Occupancy Vehicle Lanes), Autobahnauffahrten und Engstellen angesprochen. Außer der Beschreibung von Simulationaspekten, wie dem geometrischen Entwurf des Straßennetzes, die Anwendung von Verbindungsstrecken oder Aspekte der dynamischen Verkehrsumlenkung, stellen die Autoren noch die von VISSIM angewandten Simulationsmodelle dar. Da die zusammengefassten, komplexen Eingangsvariablen üblichen Kalibrierungsprozesse (Minimierung des ausgewählten Fehlermaßes) verhindern, schlagen sie eine Methode zur Kalibrierung dieser Modelle in Bezug auf qualitative Kriterien, wie z. B. die Position der Engstelle und die Staulänge, vor. Ähnliche Ansätze wurden auch von (HOURLAKIS et al.) empfohlen. Ihr Vorschlag könnte auch im Rahmen dieses Projektes als Kalibrierungsmethode Anwendung finden.

Wie schon erwähnt, spielt in Verflechtungsbereichen das Fahrstreifenwechselverhalten eine große Rolle. (HIDAS, 2004) hat die Fahrstreifenwechselmodelle von drei verschiedenen Simulationswerkzeugen (AIMSUN, VISSIM und ARTEMIS) analysiert. In seiner Arbeit sind Details über die unterschiedlichen Modelle und deren Parameter, die das Fahrverhalten beeinflussen, zu finden. Außerdem wurden die Vorteile sowie die Einschränkungen bzw. Schwachstellen der Modelle dargestellt. Der Autor empfiehlt, die Ergebnisse von Simulationen von hochbelasteten Strecken mit Vorsicht zu betrachten.

(ZAIDI et al., 2013) haben sich im Rahmen ihrer Arbeit auf die Leistungsfähigkeit von Verflechtungsbereichen mit VGB aus Sicht der Verkehrssicherheit fokussiert. Die Autoren beschreiben im Detail,

wie sie eine Fahrstreifenreduktion von zwei Fahrstreifen auf einen Fahrstreifen in VISSIM mithilfe von Strecken, Verbindungsstrecken, Routenentscheidungen und Spursperrungen nachgebildet haben. Dazu haben sie die Strecken in Abhängigkeit von der Position der portablen Wechselverkehrszeichen sowie der Start- und Endposition der Engstelle in mehrere Abschnitte unterteilt. Im Anschluss daran haben sie das dynamische Reißverschlussprinzip mithilfe von Teilrouten (fahrstreifenfeinen Fahrtverläufen) und Vehicle Actuated Programming (VAP) abgebildet. Das VAP wurde verwendet, um eine Verbindung zwischen den Teilrouten und den Detektoren, welche die Geschwindigkeit stromaufwärts der Engstelle messen, herzustellen. Darüber hinaus wurden verschiedene Fahrzeugklassen verwendet, um die unterschiedlichen Befolgungsraten abbilden zu können. Um das Model zu kalibrieren, wurde die Reisezeit als Performance Indikator genutzt, nachdem eine Sensitivitätsanalyse zur Untersuchung des Einflusses von verschiedenen Parametern auf die Simulationsergebnisse stattgefunden hat. Für die Kalibrierung wurde nach 10 Iterationen ein Fehler von 5 % mit Signifikanz $p < 0,05$ akzeptiert.

Die von (ZAIDI et al., 2013) vorgeschlagene Vorgehensweise wurde von (HALLMARK & ONEYEAR, 2015) zur Untersuchung verschiedenen Verflechtungsstrategien mithilfe von Mikrosimulation übernommen. Zur Kalibrierung des Fahrverhaltens wurde die Abflussrate (discharge flow rate) als Performance Indikator verwendet. Um das Einfädeln besser abbilden zu können, musste eine Reihe von Verhaltensparametern, wie z. B. die Zeitlücke und das kooperative Bremsen (Bereitstellung von Lücken zum Einfädeln) angepasst werden. Anschließend wurden noch andere Indikatoren, wie z. B. die Geschwindigkeit und die Reisezeit, anhand von realen Daten kalibriert. Nachdem die Kalibrierung erfolgreich abgeschlossen war, wurde das Model anhand von Daten der nachfolgenden Stunde validiert.

2.6 Steuerungskonzepte

2.6.1 Problemstellung

Die Steigerung der Verkehrseffizienz ist vor allem erwünscht und benötigt, wenn sich zu Zeiten hohen Zuflusses mangels ausreichender Verkehrskapazität Staus bilden, die zu verlängerten Fahrtzeiten führen. Die Steigerung der Verkehrseffizienz

an Engstellen ist praktisch gleichbedeutend mit der Steigerung des entsprechenden Durchflusses in Zeiträumen mit hohem Verkehrsaufkommen. Wird nämlich der Durchfluss (Abfluss) bei gegebenem Zufluss von stromaufwärts erhöht, so führt dies zu entsprechend weniger aufstauenden Fahrzeugen und daher zu einer geringeren örtlich-zeitlichen Ausweitung des Staus und geringeren Fahrtzeiten. Logischerweise stellt sich daher die Frage nach den Maßnahmen und dem Steuerungskonzept, die eine Steigerung des Durchflusses bewirken könnten.

Die Steigerung des Durchflusses ist in zwei Schritten denkbar:

1. Steigerung der Verkehrsflusskapazität vor dem Auftreten des Staus, um seine Bildung zu verhindern oder zumindest zu verzögern und seinen räumlichen und zeitlichen Umfang zu reduzieren.
2. Steigerung des Durchflusses auch nachdem die (durch Schritt 1 erhöhte) Kapazität wegen starken Zuflusses überschritten wurde, um die Ausbreitung des Staus zu verlangsamen und bei nachlassendem Zufluss den Stau schneller abzubauen.

Die im Rahmen dieses Projektes primär zu entwickelnden Maßnahmen zur Erreichung dieser Ziele sind Fahrstreifenwechsellsignalisierung (FWS, Kapitel 2.6.3) und verkehrabhängige Geschwindigkeitsbeschränkungen (VGB, Kapitel 2.6.4) stromaufwärts der Engstelle. Wir verwenden hier bewusst den Begriff „Geschwindigkeitsbeschränkung“ und nicht „Geschwindigkeitstrichter“, weil es auch denkbar ist, dass die zulässige Höchstgeschwindigkeit stromaufwärts der Engstelle zunächst wie bei einem Trichter von Anzeigequerschnitt (AQ) zu AQ schrittweise zur Drosselung des Zuflusses reduziert wird und dann am letzten AQ vor der Engstelle wieder leicht erhöht wird, um größere Zeitlücken zum Einfädeln zu erhalten und geschwindigkeitsstationäres (statt beschleunigendes) Einfahren der Fahrzeuge in die Engstelle zu ermöglichen. Dadurch mag der sonst eintretende Kapazitätseinbruch (s. Kapitel 4.1) reduziert, ggf. sogar vermieden, werden.

Bevor die potenzielle Nutzung dieser beiden Maßnahmen zur Effizienzsteigerung des Verkehrsflusses an Arbeitsstellen näher betrachtet wird, ist es sinnvoll, das allgemeinere Problem der Verkehrssteuerung bei Engstellen zu betrachten.

2.6.2 Verkehrssteuerung an Engstellen

Wie bereits erwähnt, bilden sich Stauungen in den meisten Fällen an Engstellen einer Schnellstraße. Wenn sich die Fahrzeuggeschwindigkeit an einer Engstelle aufgrund des starken Zuflusses stark und rapide reduziert, dann ist die Engstelle aktiviert. Der Verkehrsfluss an einer aktivierten Engstelle ist, im Vergleich zu den höchsten beobachteten Werten vor Stauausbruch, deutlich reduziert (capacity drop); dieser Kapazitätseinbruch wurde in verschiedenen Erhebungen auf 5-30 % quantifiziert (vgl. bspw. (CHUNG et al., 2007) und stellt eine erhebliche Leistungsminderung der vorhandenen Infrastruktur dar (PAPAGEORGIOU & KOTSIALOS, 2002). Dies hat in den letzten Jahren einige Forschungsgruppen motiviert, sich genauer mit möglichen steuerungstechnischen Maßnahmen zu befassen, die dem auftretenden Kapazitätseinbruch an aktivierten Engstellen entgegenwirken.

Wenn die Engstelle aufgrund einer einmündenden Einfahrt entsteht, dann kann mittels lokaler Zuflussdosierung die Staubildung vermieden und der Kapazitätsfluss aufrechterhalten werden, so z. B. durch Einsatz der Regelungsstrategie ALINEA (PAPAGEORGIOU et al., 1991), die weltweit (auch in Deutschland) zahlreiche Installationen aufweist. Da die Verkehrsstärke den Verkehrszustand (flüssiger Verkehr oder Stau) nicht eindeutig charakterisiert und darüber hinaus die Flusskapazität einen unsicheren Wert aufweist (z. B. BRILON et al., 2005; 2007), basiert ALINEAs Regelkreis auf Echtzeitmessungen der Verkehrsdichte (bzw. des Belegungsgrades) als Regelgröße und zielt auf die betriebliche Erhaltung des kritischen Wertes derselben (Sollwert), bei dem die Verkehrsstärke maximiert wird.

Eine ähnliche Vorgehensweise wurde vor einigen Jahren auch für Engstellen vorgeschlagen, die keine Einfahrt beinhalten (z. B. für Mautstationen oder Autobahn-Arbeitsstellen) (PAPAGEORGIOU et al., 2008). Mangels einer steuerbaren Einfahrt, setzt die vorgeschlagene Vorgehensweise voraus, dass der (oder ein Teil des) Zuflusses zur Engstelle geeignet gedrosselt werden kann, um, ähnlich wie bei ALINEA, die Verkehrsdichte (bzw. den Belegungsgrad) an der Engstelle bei dessen kritischem Wert zu betreiben, wodurch die Verkehrsstärke bei der Engstelle maximiert wird. Das vorgeschlagene Konzept basiert auf einem einfachen Regelkreis mit Einsatz klassischer Regler zur Stabilisierung der Verkehrsdichte um ihren kritischen Wert. Dieses

Grundkonzept wurde in einer Reihe nachfolgender Arbeiten weiterentwickelt und simulationstechnisch für verschiedene Anwendungen weitgehend getestet:

In (SPILIOPOULOU et al., 2010) wurde das erwähnte Konzept für die Steuerung von Mautstationen mittels geeigneter Lichtsignalanlagen (Stellglied), wie beispielsweise in der San Francisco – Oakland Brücke (Bay Bridge) praktiziert, eingesetzt und mittels mikroskopischer Simulation getestet.

In (CARLSON et al., 2011) wurde das Konzept für die Steuerung von Autobahn-Engstellen durch geeignete Echtzeit-Schaltung von Geschwindigkeitsbeschränkungen (Stellglied) eingesetzt (Bild 7) und mittels makroskopischer Simulation getestet. Für das gleiche Konzept wurden von (CARLSON et al., 2013) unterschiedliche Regler entwickelt und in (MÜLLER et al., 2015) mittels mikroskopischer Simulation genauer untersucht.

In (TYMPAKIANAKI et al., 2014) wurde das Konzept zur Verkehrssteuerung vor Arbeitsstellen mittels geeigneter Lichtsignalanlagen (Stellglied) eingesetzt und mittels mikroskopischer Simulation getestet.

In allen genannten Untersuchungen hat sich gezeigt, dass die Verkehrsstärke der jeweiligen Engstelle bei drohender Überlastung unter der Einwirkung des Regelkreises bei den höchsten erreichbaren Werten aufrechterhalten werden konnte. Entsprechende Ergebnisse aus dem praktischen Einsatz dieser regelungstechnischen Vorgehensweise sind allerdings bisher lediglich aus dem Ge-

biet der lokalen Zuflussdosierung verfügbar. Die verkehrsflussdrosselnde Wirkung von echtzeitgesteuerten Geschwindigkeitsbeschränkungen wurde allerdings beim praktischen Einsatz des Systems SPECIALIST in den Niederlanden nachgewiesen (HEGYI & HOOGENDOORN, 2010).

2.6.3 Fahrstreifenwechselsignalisierung (FWS)

Gemäß Straßenverkehrsordnung (StVO) ist bei Arbeitsstellen mit Fahrstreifenreduktion das Reißverschlussverfahren am Ende des zu reduzierenden Fahrstreifens anzuwenden. Es ist allerdings offen, ob das Reißverschlussverfahren bei allen möglichen Verkehrsbedingungen tatsächlich die beste Wirksamkeit für den Verkehrsfluss aufweist. Es ist nämlich durchaus möglich, dass der ideale Ort für den Fahrstreifenwechsel in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und/oder Verkehrsstärke und/oder Lkw-Anteil variabel ist. Dies bietet potenziell die Möglichkeit, mittels eines geeigneten Regelkreises (Messung – Entscheidung – Wirkung) den Verkehrsfluss im Sinne einer gesteigerten Effizienz zu beeinflussen. Hierbei könnte die dynamische FWS mittels geeigneter Wechselverkehrszeichen (WVZ), die die Verkehrsteilnehmer bei der Wahl des geeigneten Ortes für den Fahrstreifenwechsel beeinflussen, als Stellglied herangezogen werden. Die höchste Wirksamkeit dieser potenziellen Steuerungsmaßnahme ist vor allem bei freiem und dichtem Verkehr zu erwarten. Demzufolge dient diese Steuerungsmaßnahme, unseren früheren Ausführungen entsprechend, in erster Linie der Steigerung der Verkehrsflusskapazität vor dem Auftreten des Staus. Im zu entwickelnden Steuerungsverfahren

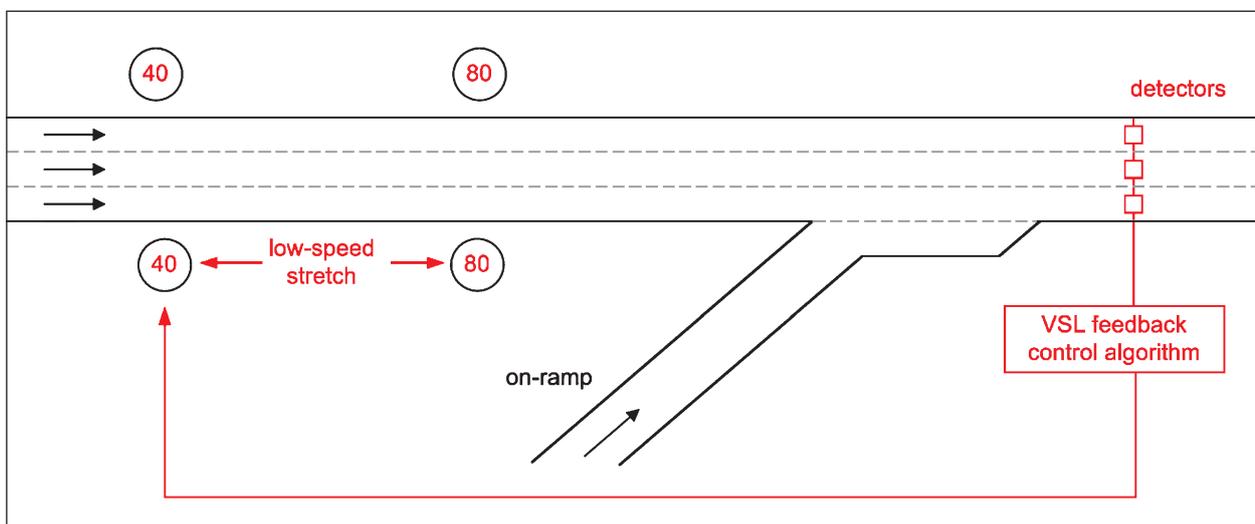


Bild 7: Regelkreis zur Maximierung des Durchflusses einer Autobahn-Engstelle mittels Drosselung des Hauptverkehrs

soll dies in Kombination und Zusammenarbeit mit dem Stellglied VGB geschehen (Kapitel 2.6.4).

Ein umfassender Überblick zum Thema Reißverschlussverfahren wird von (SAMMER et al., 2004) bereitgestellt. Laut der Recherche der Autoren wurde das Reißverschlussverfahren in der Bundesrepublik Deutschland 1976 eingeführt. (BOLL, 1980) nahm dies zum Anlass zu untersuchen, wie die Verkehrsteilnehmer, denen ein Fahrstreifen entzogen wird, in die Engstelle einfahren sollen. Dabei wurden an 13 Engstellen Messungen durchgeführt. Es wurde keine kapazitätssteigernde Wirkung des Reißverschlussverfahrens festgestellt. BOLL kam damals zu der Erkenntnis, dass die Anwendung des Reißverschlussverfahrens bei hohen Geschwindigkeiten und Verkehrsdichten aus Sicherheitsgründen problematisch ist und hat empfohlen (in Abweichung von der damaligen gesetzlichen Regelung), das Reißverschlussverfahren nur anzuwenden, wenn sich vor der Engstelle ein Stau gebildet hat. Ansonsten soll nach der Vorschrift der gegenseitigen Rücksichtnahme eingefädelt werden.

Die Wissenschaftler haben sich mit der Zusammenstellung verschiedener Beeinflussungsmaßnahmen, um eine intelligentere Steuerung und effizienteren Verkehrsablauf zu erreichen, beschäftigt. In dem Sinn rät (BOLL, 1980) von der Anordnung eines Überholverbots ab, da dieses zu einer Verlängerung der geometrischen Engstelle führt und der Anwendung des Reißverschlussverfahrens abträglich ist. Stattdessen hat er empfohlen, eine Herabtrichterung der Geschwindigkeit zu prüfen. Zur besseren Ausnutzung der vorhandenen Verkehrsfläche empfahl BOLL (1980) ein Fahrstreifenwechselverbot einzuführen und dazu eine Sperrlinie zu markieren. Er thematisiert die Problematik, dass dadurch bei schwachem Verkehr die Möglichkeit selbst den zweckmäßigsten Zeitpunkt und Ort des Fahrstreifenwechsels zu bestimmen, eingeschränkt wird und

rät an, die Sperrlinie in einem ausreichenden Abstand vor Beginn des geometrischen Engpasses enden zu lassen. Der zweckmäßigste Abstand sei durch Versuche zu bestimmen.

Die Frage, an welcher Stelle die Vorfahrt im Wechsel zu gewähren ist, ist noch heute im deutschen Verkehrsraum zu untersuchen. Die Stelle des Fahrstreifenwechsels ist Gegenstand einer Studie aus den USA, in der verschiedene Strategien der Baustellengestaltung bei Fahrstreifen Sperre auf Autobahnen analysiert werden (McCOY & PESTI, 2001a). Sie gehen von dem Problem aus, dass Fahrzeugführer von einem rückwärts wachsenden Stau überrascht werden können und so die Unfallgefahr steigt. Durch unterschiedliche Auffassungen der Fahrer, wo der Fahrstreifenwechsel durchzuführen ist, kommt es zu einer Reduktion der Leistungsfähigkeit. Es werden zwei gegensätzliche Strategien bei der Gestaltung von Fahrstreifenreduktionsbereichen gegenübergestellt. Beim Early-Merge-Concept werden die Fahrer früh animiert, auf den weiterführenden Fahrstreifen zu wechseln (Bild 8). Ziel ist es, dass der Fahrstreifen nicht erst im Staubereich, sondern davor gewechselt wird. Dazu können statische oder dynamische Systeme eingesetzt werden.

Bei stockendem Verkehr kann die höchste Leistungsfähigkeit erreicht werden, wenn der in weiterer Folge gesperrte Fahrstreifen bis zu seinem Ende genutzt wird (Bild 9). Das Verflechten unter Beachtung des Reißverschlussverfahrens wirkt ebenfalls günstig auf die Leistungsfähigkeit, da unnötige Fahrstreifenwechselkonflikte und entsprechende Verzögerungen abgemildert werden.

Die Auswirkungen eines späten Fahrstreifenwechsels vor arbeitsstellenbedingten Fahrstreifenreduktionen wurden von (KLASHINSKY & BUSHMAN, 2000) untersucht. Die Autoren thematisieren das

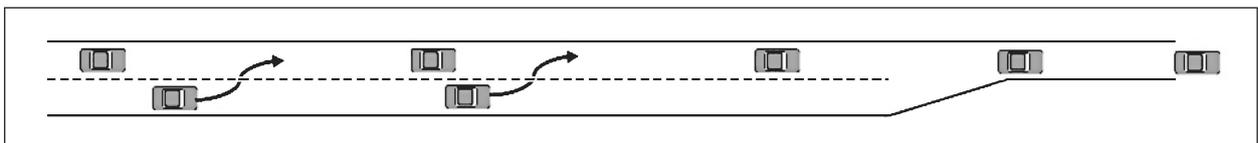


Bild 8: Reißverschlussverfahren bei freiem Verkehr (Early-Merge-Control)



Bild 9: Reißverschlussverfahren bei stockendem Verkehr (Late-Merge-Control)

Problem, dass Fahrzeugführer auf dem endenden Fahrstreifen mit hoher Geschwindigkeit bis zur Verflechtungsstelle weiterfahren. Beim Fahrstreifenwechsel unter Staubedingungen verursachen diese Fahrzeugführer ein hohes Unfallrisiko sowohl im Verflechtungsbereich als auch in dessen Vorfeld und verärgern durch das Vorbeifahren am Stau die anderen Fahrer. Um diesem Problem zu begegnen, empfehlen die Autoren die Anordnung einer dynamischen Überholverbotszone (Indiana-Lane-Merge-System – ILMS). Mittels Detektoren wird die Staulänge festgestellt und die Überholverbotsanzeigen gesteuert. Die Anzeigen sind auf einer Länge von bis zu 4 km in Abständen von 400 m bis 800 m angeordnet. Sie bestehen aus dem Text „Do not pass when flashing“ und Blinklichtern, die im Staufall aktiviert werden. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass durch dieses System die Häufigkeit gefährlicher Verflechtungsmanöver vermindert werden kann.

(VENUGOPAL & TARKO, 2001) haben die Auswirkungen des Indiana-Lane-Merge-Systems, das einen frühen Fahrstreifenwechsel fördert, auf die Leistungsfähigkeit bei Fahrstreifensperre untersucht. Sie stellen fest, dass dieses System, das die Leistungsfähigkeit eigentlich erhöhen sollte, diese um etwa 5 % reduziert. Die Autoren führen dies auf mangelnde Vertrautheit der Fahrzeugführer mit dem System zurück (VENUGOPAL & TARKO, 2001).

(FUDALA & FONTAINE, 2010) haben eine Mikrosimulationsstudie durchgeführt, um die Leistung von VGB an einer hochbelasteten Stadtautobahn in Virginia, U.S.A. zu untersuchen. Es hat sich gezeigt, dass die VGB zu einer schnelleren Auflösung des Rückstaus sowie zu weniger Fahrstreifenwechseln führen. Im Fall einer Fahrstreifenreduktion von vier auf zwei Fahrstreifen hat es sich noch gezeigt, dass eine höhere Geschwindigkeit erreicht werden konnte. (HALLMARK & ONEYEAR, 2015) haben sowohl das frühe als auch das verspätete Reißverschlussverfahren an einer Arbeitsstelle entlang der I-35 in Iowa, U.S.A. analysiert. Sie haben festgestellt, dass der frühe Fahrstreifenwechsel zu konsistenteren Geschwindigkeiten geführt hat und dass die Staulänge sowie die Anzahl der Halte verringert wurden. Allerdings hat die Strategie geringere Geschwindigkeiten stromaufwärts der Engstelle verursacht, was den Rückstau weiter in Richtung stromaufwärts der Engstelle verschoben hat. Der späte Fahrstreifenwechsel hat gleichermaßen die Reisezeit, die Staulänge und die Anzahl

der Halte minimiert, wobei die Geschwindigkeit genau vor der Engstelle relativ gering war, was aber aus Sicherheitsicht als positiv betrachtet wurde. (ZAIDI et al., 2013) haben ein dynamisches Reißverschlussverfahren beim Vorhandensein von VGB modelliert, um die Verkehrssicherheit von Simplified Dynamic Lane Merging Systems (SDLMS) unter Berücksichtigung von verschiedenen Befolgungsraten, Lkw-Anteilen sowie Verkehrsstärken zu bewerten. Es hat sich gezeigt, dass das Reißverschlussverfahren bei hochbelasteten Strecken ungenügende Ergebnisse im Vergleich zu VGB und Motorist Awareness System (MAS) von Florida, unabhängig der Position (früh oder spät), geliefert hat. Allerdings haben die VGB die Sicherheit erhöht, da die Streuung der Geschwindigkeiten dadurch geringer geworden ist. (BEACHER et al., 2004) haben ein spätes Reißverschlussverfahren und zwar bei einer 3 zu 2, einer 3 zu 1 und einer 2 zu 1 Fahrstreifenreduktionsanlage simuliert. Die Studie hat keinen statistisch signifikanten Unterschied zwischen spätem und konventionellem Reißverschlussverfahren für die 2 zu 1 Fahrstreifenreduktion gezeigt. Allerdings hatte das späte Reißverschlussverfahren eine etwas höhere Durchflussleistung bei größeren Lkw-Anteilen.

2.6.4 Verkehrsabhängige Geschwindigkeitsbeschränkungen (VGB)

Als weiteres Stellglied soll neben der zuvor beschriebenen FWS (siehe Kapitel 2.6.3) eine verkehrsabhängige Geschwindigkeitsbeschränkung (VGB) verwendet werden.

Der Entwurf von wirksamen Steuerungsverfahren erfordert eine ausreichend genaue Beschreibung der VGB Auswirkungen auf die (makroskopisch betrachtete) Verkehrslage.

Es stehen nicht viele Erhebungen zur Folgenabschätzung von VGB mittels Fundamentaldiagramm zu Verfügung. Die Vorschläge von (ZACKOR, 1972), zusammengefasst in (ZACKOR, 1991), haben eher qualitativen Charakter. (CREMER, 1979) hat ein quantitatives Modell zur Schätzung der durch dynamische Geschwindigkeitsbeschränkungen verursachten Veränderungen des Fundamentaldiagramms vorgeschlagen, jedoch ohne Verwendung von empirischen Verkehrsdaten. Dazu hat (HEGYI, 2003), im Rahmen seiner Dissertation, den linken Teil des Fundamentaldiagramms durch eine gerade Linie mit einer Steigung von der angezeigten Höchstgeschwindigkeit ersetzt.

In jüngerer Zeit wurden die Auswirkungen von VGB auf Basis von auf einer Europäischen Autobahn erhobenen Verkehrsdaten untersucht (PAPAGEORGIOU et al., 2008). Auf der entsprechenden Autobahnstrecke war ein schwellenwertbasierter Steuerungsalgorithmus aktiv. Die Ergebnisse dazu sind:

Geschwindigkeitsbeschränkungen verursachen eine Reduzierung der Steigung des Fluss-Dichte-Diagramms, wenn sie bei unkritischen Verkehrszuständen (geringe Verkehrsdichte) angewendet werden (Bild 10).

- Je geringer die zugelassene Geschwindigkeit, desto stärker verändert sich die Steigung des Fluss-Dichte Diagramms. Dadurch entsteht eine Verkehrsverdichtung und, solange diese andauert, eine entsprechende Flussreduzierung, die ausgenutzt werden kann, um den Verkehrsfluss, zwecks Verhinderung der Staubildung an der Engstelle, temporär aufzuhalten.
- Die kritische Verkehrsdichte wird bei jeder niedrigeren VGB nach oben verschoben (Bild 10).
- Dies kann genutzt werden, um eine größere Menge von Fahrzeugen außerhalb vom Staubeereich zurückzuhalten.
- Bezüglich der potenziellen Steigerung der Kapazität ist die entsprechende Analyse nicht schlüssig, da eine leichte Erhöhung nicht immer erreichbar ist (Bild 10).

- In dem Fall, dass eine Kapazitätssteigerung möglich ist, kann dies zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit der Engstelle durch eine geeignete Steuerungsstrategie genutzt werden.
- Auf alle Fälle ist bei genügend niedriger VGB eine Reduzierung der Kapazität zu beobachten. Diese kann ausgenutzt werden, um den Verkehrsfluss, zwecks Verhinderung der Staubildung an der Engstelle, haltbar aufzuhalten.

(GEISTEFELDT, 2011) hat auch eine Untersuchung basierend auf umfangreiche Daten von zwei- und dreispurigen deutschen BAB ohne Geschwindigkeitsbeschränkungen, mit permanenten Geschwindigkeitsbeschränkungen sowie mit verkehrsabhängigen Geschwindigkeitsbeschränkungen durchgeführt, die aber ebenso keine gesicherte Schlussfolgerung bezüglich einer möglichen Erhöhung der Verkehrskapazität zulassen.

Zusammenfassend bieten VGB folgende Möglichkeiten, die Leistungsfähigkeit positiv zu beeinflussen (Bild 11):

- VGB können zum Aufrechterhalten des Verkehrsflusses vor Engstellen Anwendung finden. Insbesondere bei höheren zugelassenen Geschwindigkeiten (> 70 km/h) können die VGB zum stabileren Verkehrsfluss bei kritischen Verkehrszuständen beitragen und die Staubildung verzögern. Eine Erhöhung der Leistungsfähigkeit mag in einigen Fällen auch noch möglich sein. Die größte Herausforderung liegt hier im

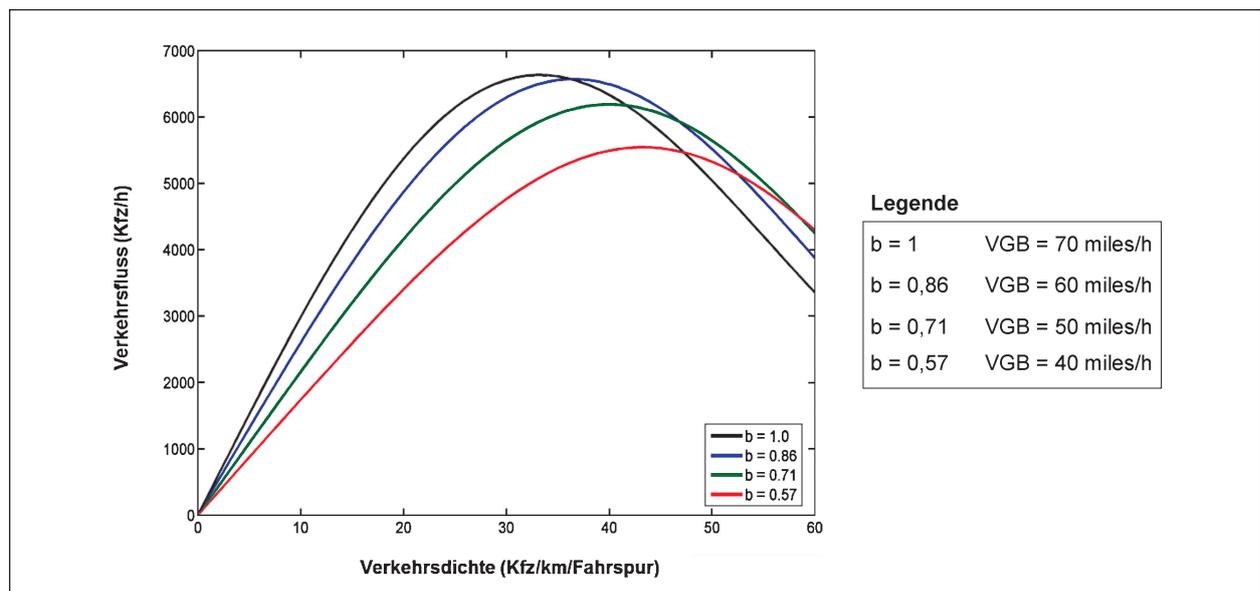


Bild 10: Einfluss von VGB auf das Fundamentaldiagramm aufgrund von Verkehrsdaten. Zur besseren Vergleichbarkeit mit anderen Datenerhebungen wurde die Einheit für die Verkehrsdichte [Kfz/km] verwendet

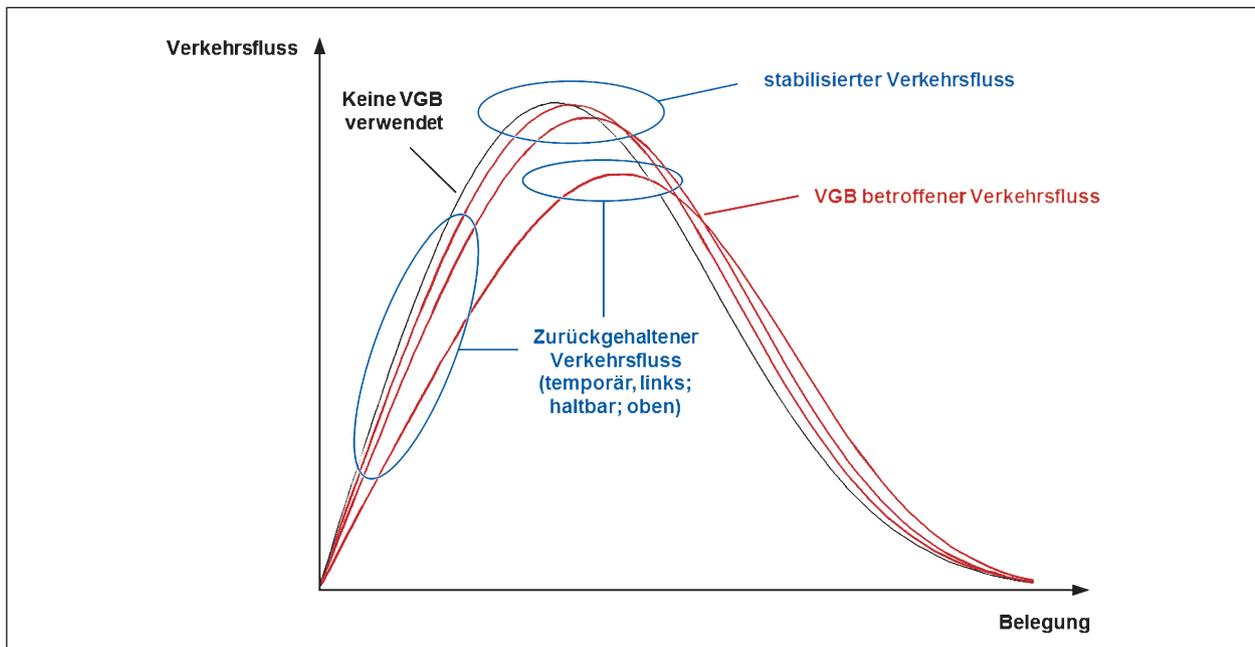


Bild 11: Zusammenfassung von VGB-Auswirkungen

Entwurf der geeigneten Regelung und in der Auswahl der entsprechenden Schwellenwerte, um möglichst den maximalen Nutzen des Steuerungssystems zu erreichen.

- Die VGB können verwendet werden, um den Verkehrsfluss stromaufwärts von Engstellen zurückzuhalten und somit den Kapazitätseinbruch zu vermindern und damit den Umfang des entstehenden Staus zu reduzieren. Dies kann anhand eines stromaufwärts der Engstelle installierten Geschwindigkeitstrichters erzielt werden. Abhängig von der zulässigen niedrigsten Höchstgeschwindigkeit kann das Aufhalten der Fahrzeuge temporär oder länger anhaltend (haltbar) eingesetzt werden.
- Darüber hinaus kann die Bildung eines Geschwindigkeitstrichters mittels VGB stromaufwärts des gebildeten Staus zur Reduktion von Auffahrunfällen und Erhöhung der Verkehrssicherheit führen.

2.7 Akzeptanz

Einen wesentlichen Einfluss auf die Wirksamkeit der zu entwickelnden FBA hat die Akzeptanz der resultierenden Anzeigen durch die Fahrer. In den folgenden beiden Abschnitten werden deshalb vorhandene Untersuchungen zur Akzeptanz des Reißverschlussverfahrens (siehe Kapitel 2.7.1) und VGB (siehe Kapitel 2.7.2) beschrieben.

2.7.1 Akzeptanz des Reißverschlussverfahrens

Um die Auswirkungen verschiedener Varianten des Reißverschlussverfahrens auf den Verkehrsablauf zu quantifizieren, hat (SÜMMERMANN, 2012) den Verkehrszustand von drei Arbeitsstellen im freien Verkehr mit unterschiedlich ausgeführten Varianten der Fahrstreifenreduktion untersucht. Die untersuchten Varianten sind das konventionelle Reißverschlussverfahren ohne temporäre Markierung in Gelbstrich sowie das modifizierte Reißverschlussverfahren mit unterschiedlichen Wechsellücken von 150 m und 300 m (Bild 12). Ohne Gelbmarkierung findet die Mehrheit der Spurwechsel zwischen 300 m und 600 m vor der Arbeitsstelle statt. Ursächlich dafür könnte der erste beschilderte Hinweis auf die bevorstehende Fahrstreifenreduktion sein, der die Fahrzeugführer zu einer erhöhten Wechseltätigkeit in diesem Abschnitt animiert. Darüber hinaus ist offensichtlich, dass die modifizierten Reißverschlussverfahren zu einer Verlagerung der Wechsellücken in Richtung der Fahrstreifenreduktion führen und somit die Auslastung des einzuziehenden Fahrstreifens verbessern. Die Wechsellücken von 150 m und 300 m im modifizierten Verfahren werden jeweils sehr gut angenommen. Bei einer zur Verfügung stehenden Wechsellücke von 300 m wechselt der überwiegende Teil der Fahrzeugführer unmittelbar hinter dem Ende der Markierung den Fahrstreifen, während bei der kurzen Wechsellücke in diesem Abschnitt fast keine (regelwidrigen) Fahrstreifenwechsel stattfinden. Alle untersuchten

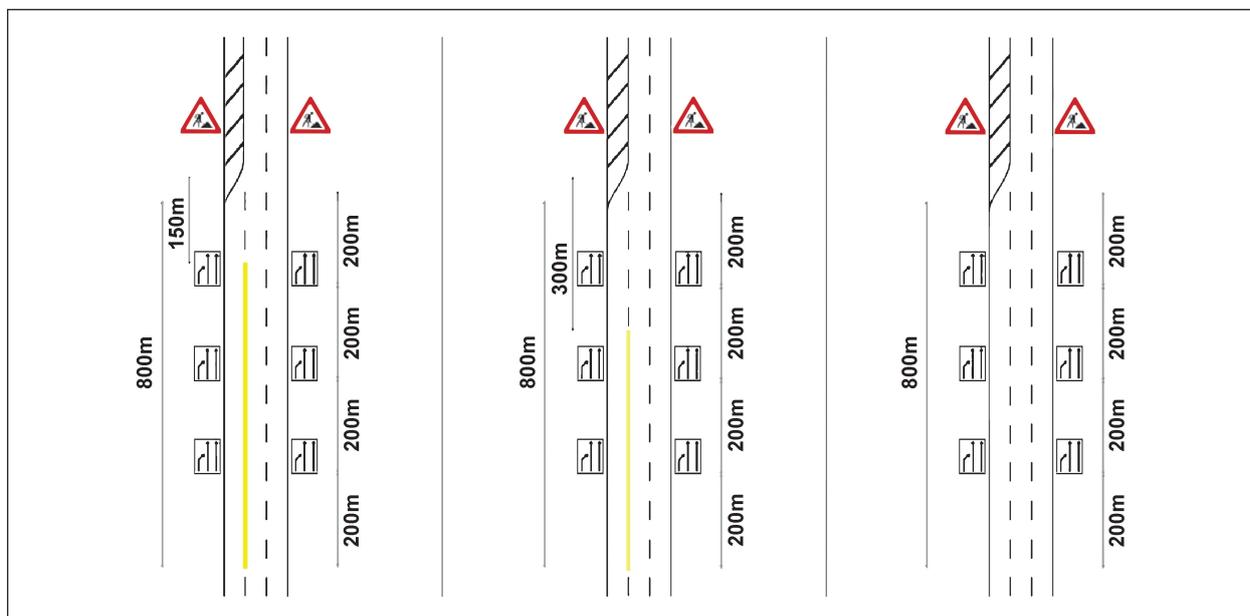


Bild 12: Verschiedene Varianten des Reißverschlussverfahrens (SÜMMERMANN, 2012)

Varianten haben gemein, dass mit zunehmender Verkehrsbelastung die Länge des zweiten Überholfahrstreifens besser ausgenutzt und erst später auf den ersten Überholfahrstreifen gewechselt wird. Der Anteil an regelwidrigen Fahrstreifenwechsell über die aufgebrauchte Gelbmarkierung nimmt ab.

Für die Wechsellvorgänge auf den letzten 800 m vor dem einzuziehenden Fahrstreifen lässt sich der theoretische mathematische Schwerpunkt berechnen. Dazu wird vereinfachend unterstellt, dass alle Fahrstreifenwechsel in den Abschnitten zentral, also im Mittelpunkt jedes Abschnitts, durchgeführt werden. Das berechnete Ergebnis zeigt, dass in der konventionellen Variante des Reißverschlussverfahrens im Mittel ca. 400 m vor Ende des Fahrstreifens der Wechsel vorgenommen wird. Das modifizierte Reißverschlussverfahren mit 300 m Lücke führt zu einer Verschiebung des Wechselschwerpunkts auf 244 m vor der Fahrstreifenreduktion. Der einzuziehende Fahrstreifen wird im Mittel also ca. 150 m länger genutzt als ohne Gelbmarkierung. Die Halbierung der Wechsellücke auf 150 m führt zu einer weiteren Verschiebung des Schwerpunkts auf 185 m vor der Fahrstreifenreduktion. Der Schwerpunkt liegt an dieser Stelle aber im Bereich eines regelwidrigen Fahrstreifenwechsels (Überfahren der durchgezogenen Linie). Folglich erscheint die 150 m lange Wechsellücke den Verkehrsteilnehmern zu kurz. Die erhöhte Akzeptanz der 300 m langen Wechsellücke erweist sich gegenüber der kürzer ausgeführten Lücke als vorteilhafter. Die verbesserte Ausnutzung des zweiten Überholfahr-

streifens im Verhältnis zur konventionellen Variante spricht ebenfalls für die Wechsellücke von 300 m.

Allerdings ist noch Potenzial hinsichtlich einer optimierten Ausnutzung des linken Fahrstreifens zu vermuten, wenn die Wechsellücke auf 200 m Länge begrenzt würde. Die erwarteten positiven Auswirkungen werden voraussichtlich noch durch die letztmalige Ankündigungstafel des Fahrstreifeneinzugs nach bestehendem Regelplan unterstützt.

2.7.2 Akzeptanz von Geschwindigkeitsbeschränkungen in Arbeitsstellenbereichen

Auf Autobahnen beträgt die zulässige Höchstgeschwindigkeit im Bereich von Arbeitsstellen in der Regel 80 km/h. Bei einer erhöhten Gefährdung soll die Geschwindigkeit auf 60 km/h oder in besonderen Einzelfällen auf 40 km/h reduziert werden. Um die Akzeptanz von Geschwindigkeitsbeschränkungen zu erhöhen, sollte dies aber nur dort erfolgen, wo wirklich eine Gefahrenstelle besteht, und nicht vorsorglich auf eine größere Strecke angeordnet werden (RSA, 1995). Geschwindigkeitsbeschränkungen zum Schutz der Beschäftigten in der Arbeitsstelle sind während der arbeitsfreien Zeit aufzuheben oder anzupassen.

An Arbeitsstellen wird die zulässige Höchstgeschwindigkeit (V_{zul}) zum Teil deutlich überschritten, wobei die Überschreitungshäufigkeit zwischen verschiedenen Arbeitsstellen, Fahrstreifen und der auf-

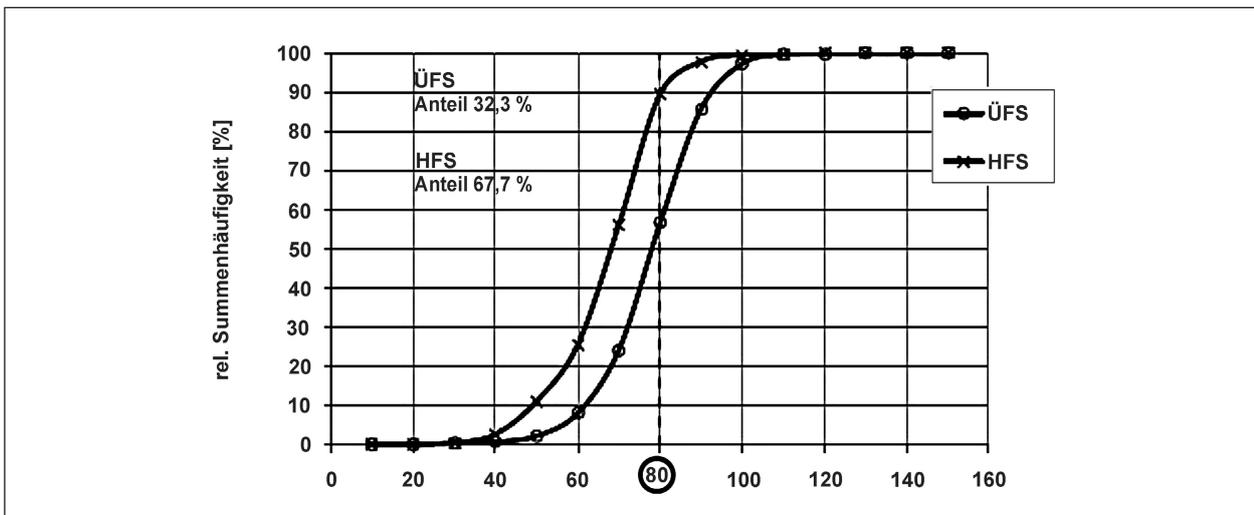


Bild 13: Geschwindigkeitsverteilung an lokalen Messquerschnitt (SÜMMERMANN, 2012)

gezeigten V_{zul} variiert. Im Rahmen seiner Dissertation recherchierte (SÜMMERMANN, 2012) die Akzeptanz der V_{zul} innerhalb von Arbeitsstellenbereichen. Hierzu wurden die Fahrstreifenbreite, die Art des Fahrstreifens (Überholfahrstreifen – ÜFS, Hauptfahrstreifen – HFS) sowie die zulässige Höchstgeschwindigkeit und der Arbeitsstellenbereich berücksichtigt.

(SÜMMERMANN, 2012) benutzt die Geschwindigkeitsverteilung an verschiedenen Querschnitte um den Überschreiteranteil der V_{zul} darzustellen. In Bild 13 wird die Geschwindigkeitsverteilung für $V_{zul} = 80$ km/h auf der BAB 1 Buchholz FR Bremen, gezeigt, wobei 32,3 % und 67,7 % der Verkehrsteilnehmer jeweils den Überholfahrstreifen und den Hauptfahrstreifen nutzen. Detaillierte Ergebnisse aus seiner Untersuchung werden in Tabelle 3, 4 und 5 dargestellt.

Bei Fahrstreifenbreiten über 3,25 m wird die V_{zul} im Mittel häufiger überschritten als auf schmaleren Fahrstreifen. Der ebenfalls hohe Anteil an Überschreitungen der V_{zul} bei Fahrstreifenbreiten von 2,50 m resultiert aus der dort häufig angeordneten Höchstgeschwindigkeit von 60 km/h, was sich auch in der mittleren V_{85} von unter 80 km/h äußert. Die mittlere V_{85} liegt auf den breiten Fahrstreifen bei über 100 km/h. Diese Geschwindigkeit ist bei Arbeitsstellen nur in Ausnahmefällen oder im Zufluss (stromaufwärts) zulässig (Tabelle 3).

Die zulässigen Höchstgeschwindigkeiten werden bei angeordneten 60 km/h und 100 km/h überschritten. Der hohe Überschreiteranteil bei $V_{zul} = 100$ km/h resultiert aus dem Zulauf. Es wird gleichzeitig deutlich, dass eine Geschwindigkeitsbegren-

Fahrstreifenbreite	Überschreiteranteil V_{zul}	V_{85}
≤ 2,50 (n = 7)	41,4 %	76 km/h
2,51 m – 2,75 m (n = 8)	31,9 %	83 km/h
2,76 m – 3,00 m (n = 28)	38,5 %	80 km/h
3,01 m – 3,25 m (n = 14)	25,9 %	81 km/h
3,26 m – 3,50 m (n = 6)	58,8 %	111 km/h
> 3,50 m (n = 6)	51,4 %	109 km/h

Tab. 3: Überschreitungen von V_{zul} und mittlerer V_{85} in Abhängigkeit der Fahrstreifenbreite (n = Stichprobenumfang) (SÜMMERMANN, 2012)

V_{zul}	Überschreiteranteil V_{zul}	V_{85}
60 km/h (n = 21)	53,8 %	75 km/h
80 km/h (n = 43)	28,7 %	86 km/h
100 km/h (n = 5)	56,9 %	126 km/h

Tab. 4: Überschreitungen von V_{zul} und mittlerer V_{85} in Abhängigkeit der zulässigen Höchstgeschwindigkeit (n = Stichprobenumfang) (SÜMMERMANN, 2012)

zung von 60 km/h im Baustelleninnenbereich von mehr als jedem Zweiten nicht akzeptiert wird. Eine V_{zul} von 80 km/h wird dagegen nur halb so häufig überschritten (Tabelle 4).

Innerhalb des Arbeitsstellenbereichs sind Unterschiede bei den Geschwindigkeitsüberschreitungen festzustellen. Im Zulauf werden die zulässigen Höchstgeschwindigkeiten von über 50 % der Verkehrsteilnehmer missachtet, während im Baustelleninnenbereich ein Drittel der Fahrer zu schnell ist. Im Baustelleninnenbereich und in der Überleitung fahren im Mittel 15 % der Fahrer schneller als

Arbeitsstellenbereich	Überschreiteranteil V_{zul}	V_{85}
Zulauf (n = 12)	55,1 %	110 km/h
Überleitung (n = 6)	39,9 %	80 km/h
Baustelleninnenbereich (n = 34)	35,7 %	80 km/h
Baustelleninnenbereich an Anschlussstelle (n = 11)	24,9 %	85 km/h

Tab. 5 Überschreitungen von V_{zul} und mittlerer V_{85} in Abhängigkeit des Arbeitsstellenbereichs (n = Stichprobenumfang) (SÜMMERMANN, 2012)

80 km/h. Vor dem Hintergrund, dass in den Überleitungen teilweise eine V_{zul} von 60 km/h angeordnet ist und dass des Weiteren fast 40 % der Fahrer die V_{zul} übertreten, ist der Bereich mit der anspruchsvolleren Fahraufgabe besonders kritisch zu sehen. Auffällig ist, dass die Geschwindigkeiten im Umfeld von Anschlussstellen öfter eingehalten werden, was zum einen auf eine höhere Akzeptanz der V_{zul} schließen lässt und zum anderen auf die direkte Beeinträchtigung des Verkehrs auf der durchgehenden Hauptfahrbahn infolge einfahrender Fahrzeuge zurückzuführen ist. Durch die allerdings höhere V_{85} wird sichtbar, dass die Geschwindigkeitsübertretungen dann aber ausgeprägter sind (Tabelle 5).

Des Weiteren ergibt die Auswertung der Geschwindigkeitsüberschreitungen getrennt nach Fahrstreifen, dass auf dem HFS jeder Dritte die V_{zul} missachtet, während auf dem ÜFS mit 43 % die Quote der Missachter noch deutlich darüber liegt. Die V_{85} liegt auf dem ÜFS erwartungsgemäß über der V_{85} des HFS (SÜMMERMANN, 2012).

Außerdem ist für die Akzeptanz von Verkehrsvorschriften wichtig, dass die Fahrer den Grund der Vorschrift erkennen. Insbesondere wenn ein unerwünschter Verkehrszustand (z. B. Stau) vermieden wurde, ist es günstig, den Fahrzeugführern zur Kenntnis zu bringen, dass sie durch Einhaltung der Vorschrift dazu beigetragen haben. Zur Verbesserung der Akzeptanz werden zusätzlich zwei Maßnahmen vorgeschlagen: Die zulässige Höchstgeschwindigkeit darf nicht wesentlich unter der aufgrund des Verkehrszustandes möglichen Geschwindigkeit liegen und der Fahrer muss darauf hingewiesen werden, dass durch bestimmte Maßnahmen das Auftreten von Stau vermieden werden konnte (SAMMER et al., 2004).

Eine Untersuchung aus den USA betrachtet den Einfluss von Vorankündigungen von Geschwindigkeitsbeschränkungen im Vorfeld von Arbeitsstellen

auf Autobahnen (McCOY & PESTI, 2001b). Die Anzeige wurde aktiviert, sobald die Geschwindigkeit stromabwärts (beim nächsten Detektor) um mehr als 10 mph unter der Geschwindigkeit am Querschnitt bei der Anzeige lag. Angezeigt wurde die aktuelle Geschwindigkeit stromabwärts. Die Wirkung dieser Anzeige ist bei freiem Verkehrsfluss gering. Erst bei größeren Verkehrsstärken, wenn den Fahrzeugführern das Vorhandensein der Baustelle bewusst ist, wirken die Vorankündigungen dämpfend auf die Geschwindigkeit. Es wird festgestellt, dass ein Abstand der Geschwindigkeitsbeschränkung von 7,5 km vor der Baustelle mit Sicherheit, 1,75 km davor möglicher Weise zu groß ist. Es wurden verschiedene Formen der Informationsübermittlung untersucht und verglichen. Dazu wurden Fahrzeugführer befragt. Die Formulierung Reduced Speed and xx mph wird am besten verstanden. Jedoch wird die Sinnhaftigkeit der Anzeige weit vor der Engstelle von den Fahrern bezweifelt, da kein Grund für eine Geschwindigkeitsreduktion erkennbar ist. Es wird festgestellt, dass eine nicht aktive Anzeige nur selten wahrgenommen und oft als Ausfall der Anlage interpretiert wird.

Eine deutsche Untersuchung (STEINHOFF et al., 2002) hatte zum Ziel, die Wirksamkeit präventiver Schaltungen (80-120 km/h) in Streckenbeeinflussungsanlagen zu erfassen und Einflussfaktoren zu identifizieren. Die Autoren stellen fest, dass eine Senkung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit um 10 km/h eine Senkung des Geschwindigkeitsniveaus um nur 2 km/h zur Folge hat. Dennoch werden positive Wirkungen auf die Verkehrssicherheit festgestellt: Die Anzahl gefährlich kleiner Zeitlücken und die Standardabweichung der Geschwindigkeiten verringern sich und der Verkehrsfluss wird gleichmäßiger. Die Autoren sprechen davon, dass Unfälle durch präventive Schaltungen vermieden werden können. Diesen Vorteil stellen sie einer Belastung der Akzeptanz und einer erhöhten Fahrtzeit gegenüber. Sie kommen zu dem Schluss, dass die nachteilige Einschränkung der Entfaltung der freien Persönlichkeit durchaus zumutbar ist, da insgesamt die Vorteile bei weitem überwiegen. Es wird festgestellt, dass die Akzeptanz zwischen fehlender Übereinstimmung zwischen Anzeige und Verkehrssituation leidet.

Begleitet wurde diese Untersuchung durch eine Studie zur Akzeptanz von Wechselverkehrszeichen (STEINHOFF et al., 2002). Die Autoren weisen darauf hin, dass die Akzeptanz durch bessere Übereinstimmung zwischen Anzeige und Verkehrssitua-

ten bilden den Eingang der (gestrichelt gekennzeichneten) Steuerungsstrategie. Anhand dieser Messungen wird zunächst entschieden, welcher Steuerungszustand der gegenwärtigen Verkehrssituation am besten entspricht, um den entsprechenden Regler zu aktivieren (bzw. auf Steuerungseingriffe zu verzichten); dementsprechend werden sodann die geeigneten Anzeigen für die Stellglieder (WVZ und VGB) erarbeitet und aktiviert. Die Anzahl und Positionen der Stellglieder, sowie der Inhalt der WVZ-Anzeigen sollen im Rahmen des Projekts geeignet bestimmt werden. Der geschlossene Regelkreis wird zu gegebenen Abtast-Zeitpunkten (z. B. alle 60 Sekunden) durchlaufen. Hauptziel der zu entwickelnden Steuerstrategie ist die Maximierung des Durchflusses durch die Arbeitsstelle, bei gleichzeitiger Erhöhung der Verkehrssicherheit und des Fahrkomforts.

Die beabsichtigte Vorgehensweise basiert auf folgenden Ansätzen (Wirksamkeitsthesen):

- Bei geringem Verkehrsaufkommen (weit unter der Engstellenkapazität), braucht keine Steuermaßnahme getätigt zu werden. Falls erwünscht, könnte aber mittels WVZ im Sinne eines höheren Fahrkomforts ein frühes Einfädeln angestrebt werden.
- Wenn sich das steigende Verkehrsaufkommen der Engstellenkapazität nähert, dann soll ein vorzeitiger Verkehrszusammenbruch und Staubildung möglichst vermieden werden. Hierzu mag ein frühes Einfädeln mittels WVZ beitragen, da Fahrstreifenwechselkonflikte nahe der Engstelle reduziert würden. Gleichzeitig soll mittels VGB eine Homogenisierung der Fahrzeug- und Fahrstreifengeschwindigkeiten angestrebt werden, die möglicherweise auch zu einer genuinen Kapazitätserhöhung der Engstelle führen könnte.
- Wenn das Verkehrsaufkommen trotz aller Maßnahmen über die Engstellenkapazität steigt, dann wird mittels VGB eine Verkehrsflussdrosselung derart angestrebt, dass die (unvermeidbare) Staubildung einige Hundert Meter stromaufwärts der Engstelle stattfindet. Innerhalb der angestrebten staufreien Zone vor der Engstelle wird mittels WVZ ein frühes Einfädeln angeregt. Stromaufwärts des gebildeten Staus kann aus Sicherheitsgründen mittels VGB ein Geschwindigkeitstrichter angestrebt werden.
- Wenn die Einstauung der Engstelle nicht mehr möglich ist (z. B. weil die Verkehrsflussdrosselung

stromaufwärts trotz Aktivierung der minimal zulässigen VGB nicht ausreichend ist), dann soll mittels WVZ das Einfädeln nach dem Reißverschlussprinzip direkt an der Engstelle angeordnet werden. Gleichzeitig schalten die VGB möglichst auf die vorherrschende (messbare) Verkehrsgeschwindigkeit stromaufwärts der Engstelle unter gleichzeitiger Bildung eines Geschwindigkeitstrichters.

2.9 Verkehrstechnische Infrastruktur

Für die Verkehrsbeeinflussung an Arbeitsstellen ist die Kenntnis der Verkehrslage im Bereich und stromaufwärts der Arbeitsstelle unabdingbar. Die Schwierigkeit hierbei ist, dass an Arbeitsstellen häufig keine verkehrstechnische Infrastruktur zur Datenerfassung, Signalisierung, Stromversorgung und Kommunikation vorhanden ist (z. B. Wegfall von Induktionsschleifendetektoren bei Erneuerung der Fahrbahndecke, erforderliche Um-/Neuverlegung der Strom- und Kommunikationsleitungen entlang der Strecke bei Verbreiterung des Querschnitts) oder nicht genutzt werden kann (z. B. aufgrund von Fahrstreifenverschwenkungen). Weitere Probleme sind, dass keine Verkehrszeichenbrücken oder Masten zur Montage von Überkopfdetektoren oder Videokameras vorhanden sind, seitlich kein/wenig Platz für die Aufstellung von Detektoren und Wechselverkehrszeichen ist und sich die Spurführung während der Baumaßnahme ändern kann. Deshalb muss die Wahl der Detektion, Signalisierung, Stromversorgung und Kommunikation den örtlichen Gegebenheiten angepasst werden. In den folgenden Kapiteln werden Anforderungen sowie Vor- und Nachteile verfügbarer Technologien dargestellt.

2.9.1 Datenerfassung

Anforderungen an Detektoren für die Fahrstreifenwechselbeeinflussung sind:

- Lieferung von Einzelfahrzeugdaten oder aggregierten Daten für möglichst kurze Zeitintervalle:
 - Zählung bzw. Verkehrsstärke,
 - Geschwindigkeit oder Verkehrsdichte,
 - (eine Fahrzeugklassifizierung ist nicht zwingend erforderlich).
- Erfassung stehender Fahrzeuge,

- separate Erfassung von mehreren Fahrstreifen,
- Aufstellung im Seitenbereich,
- geringer Energieverbrauch,
- geringer Installationsaufwand,
- drahtlose Datenübertragung (geringe Datenrate),
- kostengünstig.

Eine Visualisierung der Vorortsituation durch Videobilder ist für die Überprüfung:

- des Fahrverhaltens,
- von Sondersituationen,
- von nicht plausiblen Detektionswerten

hilfreich.

Generell kommen für die Verkehrsdatenerfassung an Arbeitsstellen folgende Detektionstechnologien in Betracht:

- Radar,
- Video,
- Magnetfeld,
- Induktionsschleifen.

In Tabelle 6 werden die wesentlichen Vor- und Nachteile der einzelnen Detektionstechnologien aufgezählt.

Im AP 4 werden für die für die Fahrstreifenreduktionsbeeinflussung geeigneten Detektionstechnologien und Detektoren näher bestimmt.

2.9.2 Signalisierung

Anforderungen an Anzeigen für die Fahrstreifenwechselbeeinflussung sind:

- Darstellung unterschiedlicher Bildinhalte,
- gute Sichtbarkeit,
- Wahrnehmung als aktives Wechselverkehrszeichen (WVZ),
- geringer Energieverbrauch,
- geringer Installationsaufwand,
- drahtlose Datenübertragung (geringe Datenrate),
- kostengünstig.

Generell kommen für die Signalisierung von Arbeitsstellen folgende Anzeigentechnologien in Betracht:

- WVZ in LED-Technik,
- WVZ in Prisma-Technik,
- statische Beschilderung.

In Tabelle 7 werden die wesentlichen Vor- und Nachteile der einzelnen Anzeigentechnologien aufgezählt.

Im AP 4 werden für die Anzeigen (Technologie, Inhalte etc.) für die Fahrstreifenreduktionsbeeinflussung genau spezifiziert.

Technologie	Vorteile	Nachteile
Radar	<ul style="list-style-type: none"> • Aufstellung im Seitenbereich möglich • geringer Energieverbrauch • geringer Installationsaufwand • kostengünstig 	<ul style="list-style-type: none"> • Verdeckung von Fahrzeugen auf hinteren Fahrstreifen bei Aufstellung im Seitenbereich
Video	<ul style="list-style-type: none"> • Aufstellung im Seitenbereich möglich, aber für Datenerfassung nicht empfohlen (möglichst hoch und mittig über zu detektierenden Fahrstreifen, vertikaler Blickwinkel 45°) • Verifizierung durch Visualisierung 	<ul style="list-style-type: none"> • Verdeckung von Fahrzeugen auf hinteren Fahrstreifen bei Aufstellung im Seitenbereich • auf Licht bzw. Sicht angewiesen (nicht bei Wärmebild) • Fehlalarme durch Schatten etc. (nicht bei Wärmebild) • relativ hoher Energieverbrauch • hohe Datenraten bei Übertragung von Videobildern erforderlich (gilt nicht für erfasste Verkehrsdaten)
Magnetfeld	<ul style="list-style-type: none"> • keine Beeinträchtigung durch Verdeckungen (je Fahrstreifen ein Detektor) 	<ul style="list-style-type: none"> • Installation in Fahrbahn ⇒ unflexibel bei Änderung der Spurführung ⇒ relativ hoher Installationsaufwand
Induktionsschleife	<ul style="list-style-type: none"> • hohe Detektionsqualität • keine Beeinträchtigung durch Verdeckungen (je Fahrstreifen ein Detektor) 	<ul style="list-style-type: none"> • Installation in Fahrbahn ⇒ unflexibel bei Änderung der Spurführung ⇒ hoher Installationsaufwand

Tab. 6: Vor- und Nachteile von Detektionstechnologien (basierend auf Erfahrungswerten)

Technologie	Vorteile	Nachteile
WVZ in LED-Technik	<ul style="list-style-type: none"> • mehrere (> 3) Bildinhalte darstellbar • sehr gute Sichtbarkeit • Wahrnehmung als aktives WVZ 	<ul style="list-style-type: none"> • relativ hoher Energieverbrauch
WVZ in Prisma-Technik	<ul style="list-style-type: none"> • bis zu maximal 3 Bildinhalte darstellbar • geringer Energieverbrauch 	<ul style="list-style-type: none"> • geringere Wahrnehmung als aktives WVZ
Statische Signal	<ul style="list-style-type: none"> • kostengünstig • kein Energieverbrauch • geringer Installationsaufwand 	<ul style="list-style-type: none"> • statisches Bild → scheidet somit für dynamische Steuerung aus • schlechtere Wahrnehmung • keine Datenübertragung

Tab. 7: Vor- und Nachteile von Anzeigetechnologien (basierend auf Erfahrungswerten)

2.9.3 Stromversorgung

Für temporäre Anwendungen an Arbeitsstellen ist häufig eine netzautarke Stromversorgung erforderlich, da die Infrastrukturmaßnahmen zur Schaffung einer netzgebundenen Stromversorgung zu aufwendig und teuer wären.

Die Anforderungen an die Stromversorgung sind:

- ausreichende Leistung,
- lange Standzeit,
- für Standort geeignet (z. B. Photovoltaik für schattigen Standort ungeeignet),
- möglichst witterungsunabhängig,
- wartungsarm und unterhaltsfreundlich (z. B. Nachfüllen von Kraftstoff bei Generator),
- geringer Installationsaufwand,
- kostengünstig.

Generell kommen für die netzautarke Stromversorgung in unseren Breiten folgende Technologien in Betracht:

- Photovoltaik,
- Brennstoffzellen,
- Windenergie (optional),
- Generatoren.

In Tabelle 8 werden die wesentlichen Vor- und Nachteile der einzelnen Technologien zur netzautarken Stromversorgung aufgezählt.

Da der Energiebedarf des Systems die Basis für das Energieversorgungskonzept bildet, muss bei der Komponentenauswahl auf einen geringen Energieverbrauch geachtet werden. Mit einem entsprechenden Energiemanagementsystem können mehrere unterschiedliche Energiequellen kombiniert werden.

Im AP4 werden geeignete Komponenten für die Datenerfassung (Kapitel 2.9.1) und Signalisierung (Kapitel 2.9.2) u. a. unter Berücksichtigung des Energieverbrauchs ausgewählt und ein geeignetes Energieversorgungskonzept ggf. mit Kombination mehrerer Energiequellen erstellt.

Technologie	Vorteile	Nachteile
Photovoltaik	<ul style="list-style-type: none"> • wartungsarm und unterhaltsfreundlich • geringer Installationsaufwand • kostengünstig 	<ul style="list-style-type: none"> • geringe Leistung • standortabhängig • witterungsabhängig
Brennstoffzellen	<ul style="list-style-type: none"> • hohe Leistung • standortunabhängig • witterungsunabhängig 	<ul style="list-style-type: none"> • wartungsintensiv • teuer
Windenergie (optional)	<ul style="list-style-type: none"> • geringer Installationsaufwand • wartungsarm und unterhaltsfreundlich 	<ul style="list-style-type: none"> • geringe Leistung • standortabhängig • witterungsabhängig
Generator	<ul style="list-style-type: none"> • hohe Leistung • lange Standzeit • witterungsunabhängig 	<ul style="list-style-type: none"> • Umweltverträglichkeit (Lärm, Luftverschmutzung) • hoher Aufwand für Unterhalt (Nachfüllen von Kraftstoff) • teuer • Spannungsschwankungen

Tab. 8: Vor- und Nachteile von Technologien zur netzautarken Stromversorgung (basierend auf Erfahrungswerten)

2.9.4 Datenübertragung

Für temporäre Anwendungen an Arbeitsstellen ist häufig eine mobile Datenübertragung erforderlich, da keine Datenkabel vorhanden und die Entfernungen für die temporäre Verlegung von Datenkabeln zu groß sind.

Die Anforderungen an die mobile Datenübertragung sind:

- ausreichende Bandbreite,
- hohe Netzabdeckung,
- hohe Verfügbarkeit,
- kostengünstig.

Technologien zur mobilen Datenübertragung unterscheiden wir hier in:

- Datenfunk wie
 - Bündelfunk,
 - WLAN,
 - proprietärer Funk.
- Mobilfunk wie
 - UMTS,
 - LTE,
 - GPRS.

In Tabelle 9 werden die wesentlichen Vor- und Nachteile der Technologien zur mobilen Datenübertragung aufgezählt.

In AP4 wird ein detailliertes Datenübertragungskonzept erarbeitet.

3 AP2: Beschaffung empirischer Daten und Aufbau Simulation

3.1 Beschaffung und Analyse vorhandener Daten

Für die Kalibrierung der Mikrosimulation werden empirische Daten von mindestens einer realen Fahrstreifenreduktion¹ benötigt. Diese sollte nach Möglichkeit die folgenden Anforderungen erfüllen:

1. Es muss eine Fahrstreifenreduktion vorhanden sein.
2. Es sollen regelmäßig/häufig Staus durch Kapazitätseinbruch an der Engstelle entstehen.
3. Es müssen Daten vorhanden oder ggf. eigene Erhebungen im Zeitrahmen des Projektes möglich sein.
4. Es sollen keine größere Steigung vorhanden sein, da diese die Geschwindigkeit und Beschleunigung insbesondere von Lkw und schwächer motorisierten Fahrzeugen beeinflusst.
5. Es soll keine Anschlussstelle im direkten Einflussbereich der Engstelle liegen, da diese u. a. zu zusätzlichen Fahrstreifenwechseln (infolge des Einfädelnlassens) führen kann.
6. Videoaufzeichnungen des Fahrverhaltens vor/an der Engstelle wären hilfreich.

Die Suche nach entsprechenden Engstellen gestaltete sich schwieriger als gedacht. Der Hauptgrund war, dass bei Arbeitsstellen versucht wird, hauptsächlich durch die Reduzierung der Fahrstreifenbreiten, Fahrstreifenreduktionen zu vermeiden. Da zukünftig größere seitliche Sicherheitsabstände

¹ Die Fahrstreifenreduktion muss nicht zwingend an einer Arbeitsstelle sein.

Technologie	Vorteile	Nachteile
Datenfunk	<ul style="list-style-type: none"> • unabhängig von öffentlichen Mobilfunknetz 	<ul style="list-style-type: none"> • geringe Datenübertragungsrate • begrenzte Frequenzen • geringe Reichweite
Mobilfunk	<ul style="list-style-type: none"> • Bandbreite skalierbar (von GSM bis LTE) 	<ul style="list-style-type: none"> • abhängig von Netzabdeckung und Verfügbarkeit • wartungsintensiv • relativ teuer

Tab. 9: Vor- und Nachteile von Technologien zur mobilen Datenübertragung (basierend auf Erfahrungswerten)

zwischen den Arbeitsbereichen und den Fahrstreifen vorgeschrieben sind, werden vermehrt Fahrstreifenreduzierungen erforderlich sein.

Mit Unterstützung der angefragten Bundesländer wurde letztendlich eine geeignete Arbeitsstelle mit Fahrstreifenreduktion auf der Autobahn A 3 in Nordrhein-Westfalen nordöstlich von Köln in Fahrtrichtung Leverkusen gefunden. Die Arbeitsstelle befindet sich im Bereich von Betriebskilometer 133,71 (kurz vor der Anschlussstelle Mühlheim) bis Betriebskilometer 132,82.

Die Arbeitsstelle erfüllt die oben beschriebenen Anforderungen:

1. Es ist eine Fahrstreifenreduktion von vier auf drei Fahrstreifen vorhanden.
2. Es gibt häufig (täglich) Staus.
3. Im Bereich (vor) der Arbeitsstelle befindet sich eine Streckenbeeinflussungsanlage (SBA) mit relativ dichten Messquerschnitten (MQ), die auch während der Baumaßnahme Verkehrsdaten liefern.
4. Die Längsneigung der Strecke ist sehr klein (1 %).
5. Es liegen keine Anschlussstellen im direkten Einflussbereich der Engstelle.
6. Es sind Webcams vorhanden, auf denen Live-Bilder im Internet unter www.verkehr.nrw.de

angeschaut werden können. Die Videos werden jedoch nicht aufgezeichnet.

Die vom Landesbetrieb Strassen.NRW zur Verfügung gestellten Verkehrsdaten (TLS FG1) wurden an sieben MQ auf der Hauptfahrbahn, einer davon genau vor der Engstelle und ein weiterer stromabwärts, sowie an den davorliegenden Ein- und Ausfahrten mithilfe von Induktionsschleifen und Überkopfdetektoren für den Zeitraum von September 2015 bis März 2016 erfasst. Die Datensätze beinhalten fahrstreifenfeine Daten für die Geschwindigkeit und die Verkehrsstärke für zwei Fahrzeugklassen (Pkw und Lkw) sowie für die Belegung (%) mit einem Aggregationsintervall von einer Minute. Darüber hinaus wurden Anzeigedaten (TLS FG4) von allen drei vorhandenen Anzeigequerschnitten (AQ) zur Verfügung gestellt. Die genauen Positionen der MQ und AQ sind in Bild 15 dargestellt.

Da die Videos von den Webcams nicht aufgezeichnet werden, wurden Videoaufzeichnungen von anderen Fahrstreifenreduzierungen von (VOLKENHOFF et al., 2012) zur Verfügung gestellt, mit deren Hilfe das Fahrverhalten in ähnlichen Situationen beobachtet werden kann.

3.1.1 Auswahl Zeitraum

Mittels Konturplots, Ganglinien und Fundamentaldiagrammen wurden Zeiträume, in denen sich Staus an der Engstelle gebildet haben, sowie die Kapazität der Engstelle und die Nachfrage ermittelt.

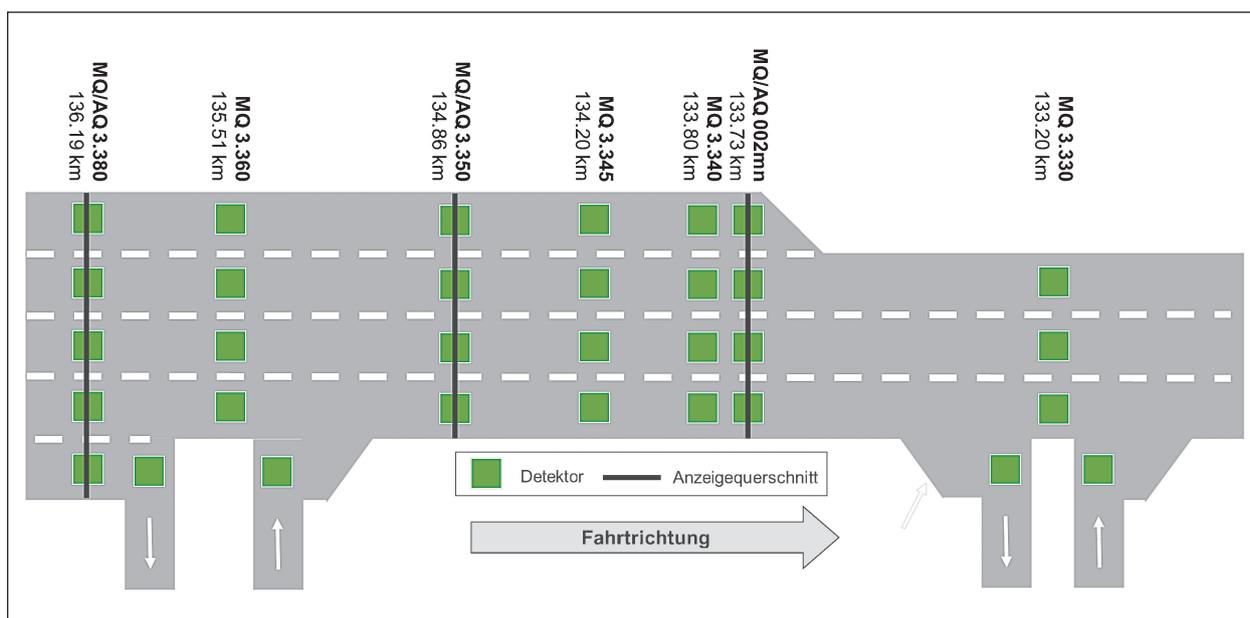


Bild 15: Positionen von MQ und AQ auf der Teststrecke

Unplausible Daten, wie z. B. Zeiträume mit Datenausfällen, wurden identifiziert und nicht weiterverwendet.

Als erster Schritt für die Untersuchung der Daten wurden Konturplots der Geschwindigkeit pro Tag erstellt. Auf diese Weise konnten die Zeiträume mit hoher Verkehrsbelastung bzw. Stauereignissen ermittelt werden.

Daraus hat sich ergeben, dass die Staus täglich vorkommen und sich immer sehr schnell über die ganze Teststrecke ausbreiten. Meistens liegt aber die Ursache des Staus nicht an der Fahrstreifenreduktion, sondern an anderen möglichen Engstellen, die sich innerhalb oder stromabwärts der Arbeitsstelle befinden. Da das Ziel des Projekts ist,

den gestauten Verkehr vor Arbeitsstellen mit Fahrstreifenreduktion zu steuern, dürfen diese Fälle für die weitere Analyse nicht berücksichtigt werden. Im Gegensatz dazu müssen die Daten, die Eingang in die Simulation finden sollen, solche Stauereignisse betreffen, welche allein durch die Fahrstreifenreduktion verursacht worden sind. Nach ausführlicher Analyse sind zwei geeignete Fälle gefunden worden, welche für die Kalibrierung und Validierung des Modells ausreichend sind. Für die Kalibrierung und Validierung des Modells wurden jeweils die Daten von 28. September 2015 (05:45-08:45) und 2. Februar 2016 (05:45-08:30) verwendet. In Bild 16 sind die Geschwindigkeitskonturplots dargestellt, welche die zwei oben beschriebenen Fälle (rechts geeignet, links ungeeignet) beispielhaft darstellen.

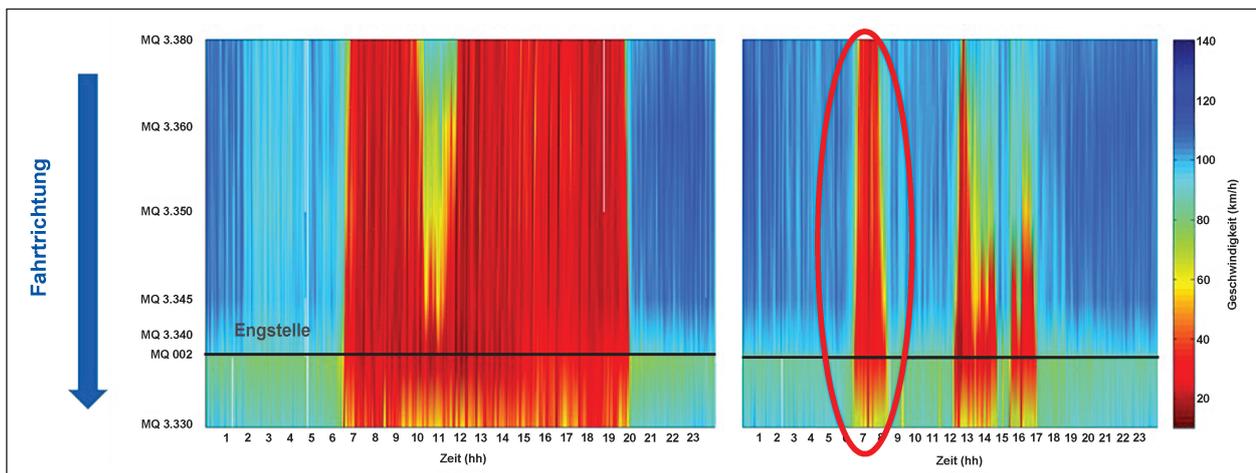


Bild 16: Geschwindigkeitskonturplots (li.: ungeeignetes Stauereignis, re: geeignetes Stauereignis)

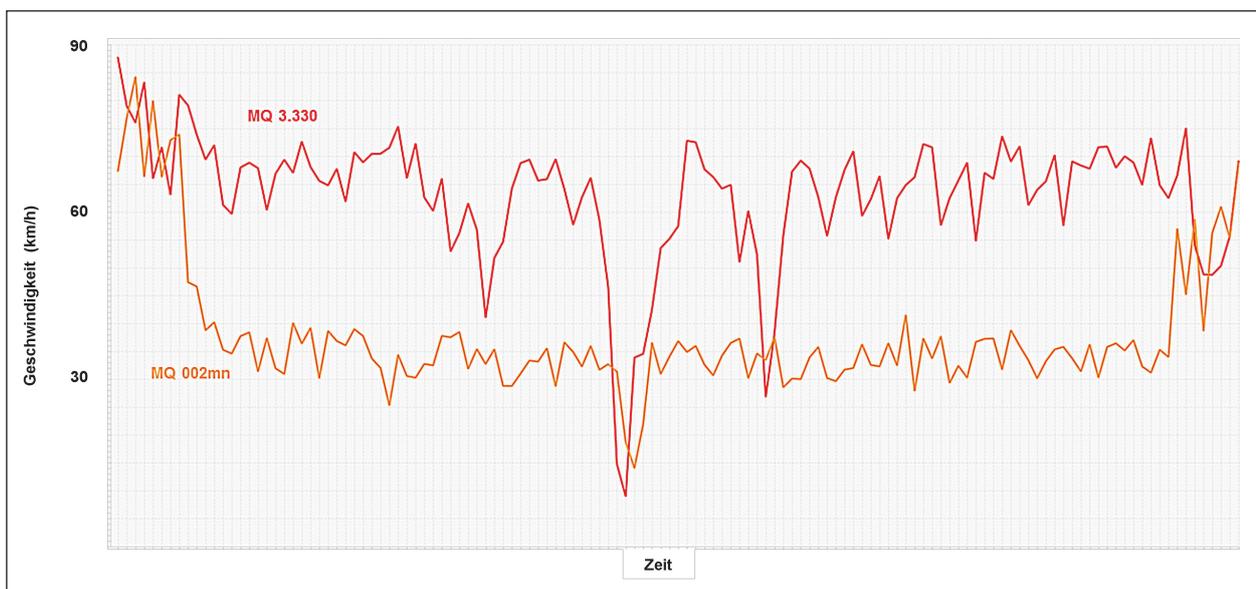


Bild 17: Geschwindigkeitsganglinie für MQ 002mn und MQ 3.330 für den Kalibrierungsdatensatz

Da die Kontourplots durch Interpolation der aggregierten Geschwindigkeitswerte die räumlich-zeitliche Verkehrsdynamik abbilden, sollen die Stauereignisse weiter im Detail untersucht werden. Im Folgenden werden daher die lokalen Geschwindigkeiten und Belegungen an den Messquerschnitten analysiert.

In Bild 17 und Bild 18 sind die Geschwindigkeits- und Belegungsganglinien vom MQ 002mn (direkt an der Engstelle) und MQ 3.330 (kurz hinter/stromabwärts der Engstelle) für das geeignete Stauerereignis aus Bild 16 rechts dargestellt. Das Geschwindigkeitsniveau am MQ 002mn war abgesehen von dem kurzzeitigen zusätzlichen Einbruch in der Mitte, deutlich niedriger und das Belegungs-

niveau deutlich höher als am MQ 3.330. Gleichzeitig konnten am MQ 3.330 keine großen Geschwindigkeitsschwankungen beobachtet werden, welche den Stau am MQ 002mn verursacht haben könnten.

In Bild 19 ist das Fundamentaldiagramm (q-k) für die zwei Messquerschnitte dargestellt. Daraus geht hervor, dass der relevante Verkehrszusammenbruch am MQ 002mn auftrat. Des Weiteren geht aus Bild 19 hervor, dass die mittlere Geschwindigkeit stromabwärts der Fahrstreifenreduzierung höher war als an der Engstelle – die Neigung der roten Linie, welche die Geschwindigkeit darstellt, ist im rechten Diagramm für MQ 3.330 größer als im linken Diagramm für MQ 002mn.

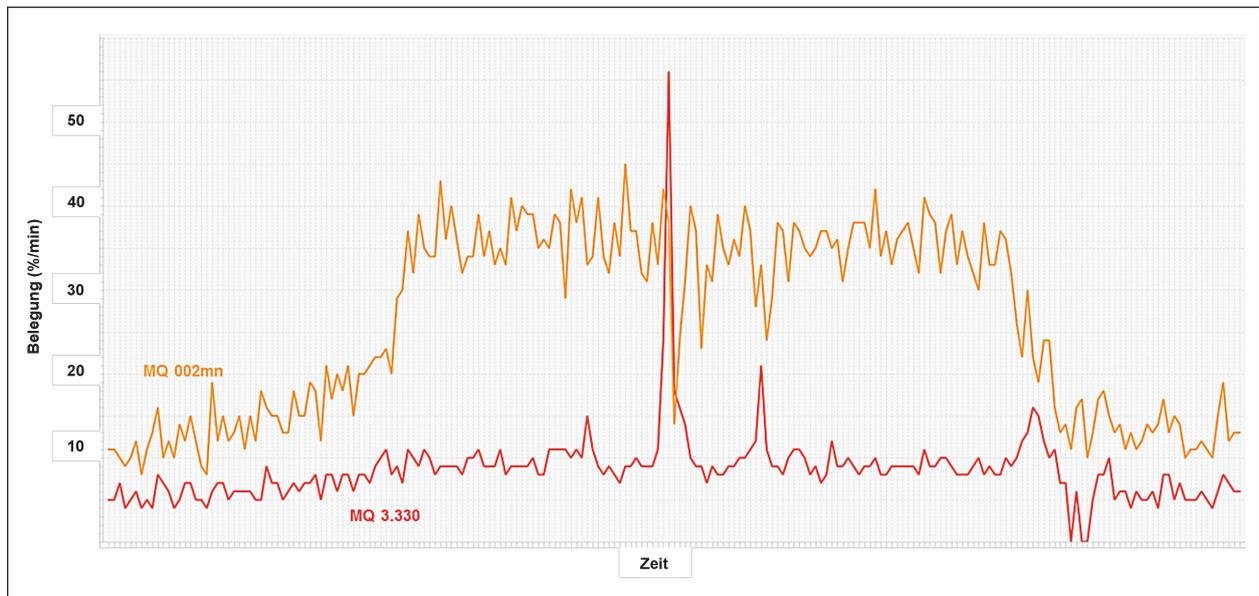


Bild 18: Belegungsganglinie für MQ 002mn und MQ 3.330 für den Kalibrierungsdatensatz

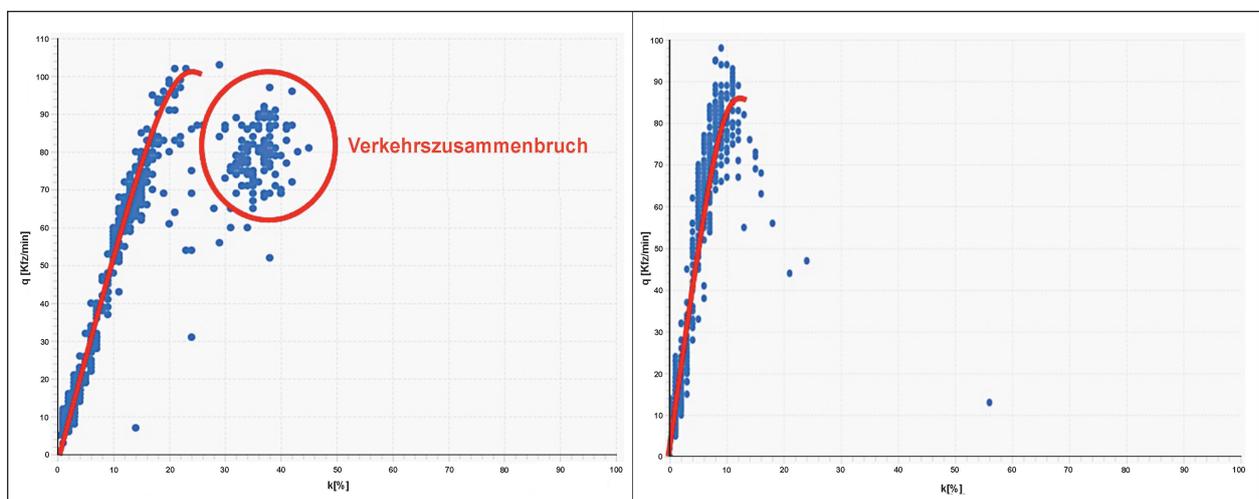


Bild 19: Fundamentaldiagramm (li.: MQ 002mn, re.: MQ 3.330) für den Kalibrierungsdatensatz

3.1.2 Ermittlung Verkehrsnachfrage und Kapazität

Letztendlich wurden noch die Verkehrsnachfrage und die Kapazität an der Engstelle ermittelt. Die Verkehrsnachfrage wurde näherungsweise als gleich der tatsächlich gemessenen Verkehrsstärke stromaufwärts der Engstelle angenommen. Da die Leistungsfähigkeit der Strecke kleiner als die tatsächliche Verkehrsnachfrage ist, breitet sich der Stau bis zum ersten MQ (MQ 3.380) der Teststrecke aus. Da jedoch durch die bereits eingetretene Einstauung im Bereich des ersten MQ nur die Fahrzeuge zufließen und erfasst werden, die den MQ aufgrund des Nachrückens vorausfahrender Fahrzeuge erreichen, ist von einer Drosselung der gemessenen Verkehrsstärke am ersten MQ durch den Stau auszugehen. Die gemessene Verkehrsstärke gibt aus diesem Grund nicht den realen Zufluss auf den Baustellenbereich wieder. Sie wird durch die Messung am ersten MQ unterschätzt.

Als Kapazität der Engstelle wurde näherungsweise die maximale Verkehrsstärke an der Engstelle verwendet. Diese liegt etwa im Bereich von 2.000 Fahrzeugeinheiten (1 Pkw = 1 Fahrzeugeinheit, 1 Lkw = 1.5 Fahrzeugeinheit) pro Stunde pro Fahrstreifen. Um die Verkehrslage realitätsnah abbilden zu können, wurde die Verkehrsnachfrage für Pkw und Lkw getrennt und fahstreifenfein für 5-Minuten Intervalle aggregiert in den Simulator importiert.

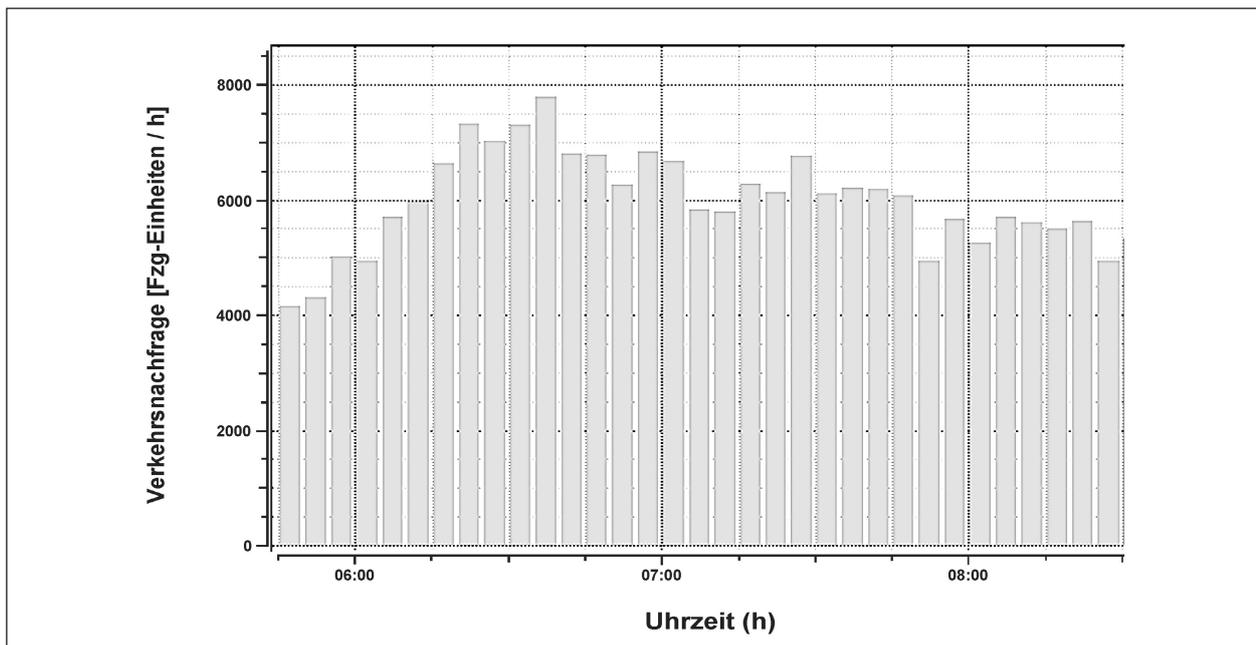


Bild 20: Verkehrsnachfrage

3.2 Schnittstelle Steuerungsverfahren

Um moderne, nicht standardisierte IVS-Anwendungen und -Systeme, wie das im Rahmen des Projektes entworfene Steuerungsverfahren, simulations-technisch überprüfen zu können, müssen häufig die intern verwendeten Verkehrsmodelle sowie andere Funktionalitäten des Simulators überschreiben und durch neue ersetzt werden, um die Ansprüche der Anwendung erfüllen zu können. Dazu stellt Transportation Simulation Systems (TSS) AIMSUN API und MicroSDK zur Verfügung (Bild 21).

Dank dieser zwei Werkzeuge gibt es die Möglichkeit, die Funktionen von AIMSUN mithilfe von benutzerdefinierten Applikationen in C++ oder Python zu erweitern. Der Benutzer kann somit sowohl auf die relevanten Infrastruktur-Objekte (Netz, Detek-

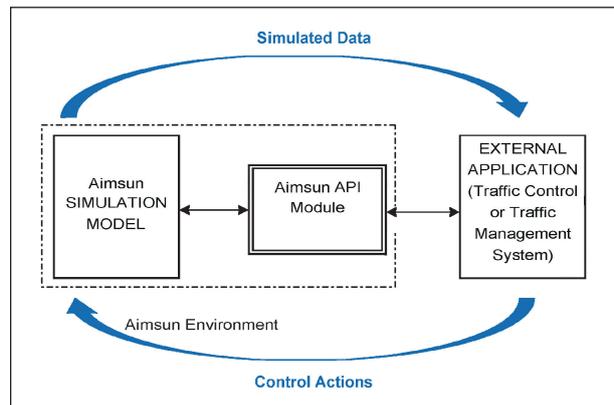


Bild 21: Informationsaustausch AIMSUN API Schema (TSS, 2013)

toren, LSA, WVZ usw.) als auch auf die Fahrzeug-Objekte zugreifen und je nach Bedarf ihre Funktionsweise beeinflussen. Die Applikation und der Simulator stehen miteinander in Verbindung und ermöglichen den notwendigen Datenaustausch (TSS, 2013).

- Die Plug-Ins von neuen Verkehrsmodellen können entweder global oder lokal eingesetzt werden (z. B. unterschiedliche Fahrstreifenwechselmodelle auf der Hauptstecke und einer Zufahrt).
- Die Plug-Ins betreffen entweder alle AIMSUN Verkehrsmodelle oder einen Teil davon.
- Die Plug-Ins sind am Start-Up der Simulation mittels DLL-Dateien zu laden.
- Die neuen Modelle müssen bei jedem Simulationsschritt aufgerufen werden.
- Die Plug-Ins gewährleisten den dynamischen Zugriff auf alle, für die Anwendungslogik, entscheidungsrelevante Informationen, wie z. B. die aktuelle Position und Geschwindigkeit eines Fahrzeugs.

Im Rahmen des Projekts wurden das Fahrzeugfolge- und das Fahrstreifenwechselmodell von AIMSUN mithilfe von MicroSDK durch das IDM ersetzt. Das Steuerungsverfahren wurde unter Verwendung der AIMSUN API implementiert.

3.3 Aufbau Simulationsmodell

3.3.1 Fahrzeugfolgemodelle

Gipps-Modell

Das von AIMSUN eingesetzte Fahrzeugfolgmodell basiert auf das Gipps-Modell (GIPPS, 1981; 1986). Das Modell ist hierunter wie im (TSS, 2013) dargestellt.

Das Modell besteht aus zwei Komponenten, dem Beschleunigungs- und Verzögerungsverhalten, welche einerseits die Intension des Fahrers, die Wunschgeschwindigkeit V_a erreichen, und andererseits den Einfluss des mit der Geschwindigkeit V_b vorausfahrenden Fahrzeugs darstellen.

Daher lässt sich die Geschwindigkeit als der Minimalwert von der Beschleunigungs- und der Verzögerungsgeschwindigkeit berechnen ($V = \min \{V_a, V_b\}$).

Die maximale Geschwindigkeit, mit der ein Fahrzeug n beschleunigen darf (Gleichung 3.1), ist:

$$V_a(n, t+T) = V(n, t) + 2.5a(n)T \left(1 - \frac{V(n, t)}{V^*(n)}\right) \sqrt{0.025 + \frac{V(n, t)}{V^*(n)}} \quad \text{Gl. 3.1}$$

mit

$V(n, t)$ Geschwindigkeit des betrachteten Fahrzeugs zum Zeitpunkt t

$V^*(n)$ Wunschgeschwindigkeit des Fahrzeugs

$a(n)$ maximale Beschleunigung des Fahrzeugs

T Reaktionszeit

Die maximale Geschwindigkeit, mit der das betrachtete Fahrzeug durch seine eigenen Einschränkungen und dem Einfluss des Vorderfahrzeugs fahren kann, zeigt Gleichung 3.2:

$$V_b(n, t+T) = d(n)T + \sqrt{d(n)^2T^2 - d(n) \left[2(x(n-1, t) - s(n-1) - x(n, t)) - V(n, t)T - \frac{V^2(n-1, t)}{d'(n-1)} \right]} \quad \text{Gl. 3.2}$$

mit

$d(n)$ maximale Verzögerung des Fahrzeugs

$x(n, t)$ Position des Fahrzeugs zum Zeitpunkt t

$x(n-1, t)$ Position des vorausfahrenden Fahrzeugs zum Zeitpunkt t

$s(n-1)$ Länge des vorausfahrenden Fahrzeugs

$d'(n-1)$ abgeschätzte Verzögerung des vorausfahrenden Fahrzeugs

Das Gipps-Modell wird im Rahmen des Projekts nicht angewendet, sondern, wie von NTOUSAKIS & NIKOLOS (2015) erklärt, durch das Intelligent-Driver-Modell (TREIBER et al., 2000) ersetzt. Daher wird es hier nicht weiter beschrieben.

Intelligent-Driver-Modell (IDM)

Das zeitkontinuierliche Intelligent-Driver-Modell (IDM) (TREIBER et al., 2000) ist ein vollständiges unfallfreies Modell, welches in allen Verkehrssituationen ein plausibles Beschleunigungsverhalten

modelliert (TREIBER & KESTING, 2010). Anschließend wird das Modell, laut den zwei oben erwähnten Quellen, beschrieben.

Die geforderten Eigenschaften werden durch folgende Beschleunigungsgleichung erfüllt:

$$\dot{v} = a \left[1 - \left(\frac{v}{v_0} \right)^\delta - \left(\frac{s^*(v, \Delta v)}{s} \right)^2 \right] \quad \text{Gl. 3.3}$$

Die IDM-Beschleunigung ist in der Form $\tilde{\alpha}_{mic}(s, v, \Delta v)$ formuliert. Einerseits wird die aktuelle Geschwindigkeit v mit der Wunschgeschwindigkeit v_0 und andererseits der aktuelle Abstand s mit dem Wunschabstand s^* verglichen. Der Wunschabstands enthält neben dem Gleichgewichtsanteil $s_0 + vT$ auch einen dynamischen Anteil $v\Delta v / 2\sqrt{ab}$, der eine intelligente Bremsstrategie realisiert (Gleichung 3.4):

$$s^*(v, \Delta v) = s_0 + \max \left(0, vT + \frac{v\Delta v}{2\sqrt{ab}} \right) \quad \text{Gl. 3.4}$$

Die Modellparameter können anhand folgender drei Standardsituationen veranschaulicht werden:

- (i) Das Beschleunigen auf freier Strecke geschieht mit der Maximalbeschleunigung α , die beim Annähern an die Wunschgeschwindigkeit v_0 in einer durch δ beschriebenen Weise gegen null geht. Je größer δ ist, desto später wird die Beschleunigung reduziert.
- (ii) Das Folgefahren geschieht mit einem durch die Folgezeit T charakterisierten Abstand zuzüglich eines Minimalabstandes s_0 bei stehendem Verkehr.
- (iii) Beim Annähern an langsamere oder stehende Fahrzeuge wird in Normalsituationen die komfortable Verzögerung b nicht überschritten. Zwischen den drei Situationen bestehen im Beschleunigungsverhalten kontinuierliche Übergänge (TREIBER & KESTING, 2010).

Die typischen Werte der Modellparameter sind in Tabelle 10 dargestellt.

Für das Fließgleichgewicht ($\dot{v} = \Delta v = 0$) erhält man die Bedingung:

$$1 - \left(\frac{v}{v_0} \right)^\delta - \left(\frac{s_0 + vT}{s} \right)^2 = 0 \quad \text{Gl. 3.5}$$

Für allgemeine Werte des Beschleunigungsexponenten δ lässt sich dieser Ausdruck nur nach s auflösen:

$$s = s_e(v) = \frac{s_0 + vT}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{v_0} \right)^\delta}} \quad \text{Gl. 3.6}$$

Insbesondere bei gebundenem Verkehr ($v \ll v_0$), ist der Gleichgewichtsabstand $s_e \approx s_0 + vT$.

In den Zustand freie Fahrt (geringe Verkehrsdichte) ist der Gleichgewichtsabstand wegen des Nenners (große s) nahe der Wunschgeschwindigkeit wesentlich höher und die IDM-Beschleunigung ergibt sich gleichbedeutend aus: $a_f(v) = \alpha[1 - (v/v_0)^\delta]$, wobei die Maximalbeschleunigung $a_f(0) = \alpha$ ist und $a_f(v_0) = 0$.

Das dynamische Annäherungsverhalten wird durch den Beitrag $v\Delta v / (2\sqrt{ab})$ modelliert. Um die Bremsstrategie isoliert zu betrachten, setzt man den Gleichgewichtsanteil gleich null und lässt den auf freier Strecke wirkenden Beschleunigungsanteil $a_f(v) = \alpha[1 - (v/v_0)^\delta]$ unberücksichtigt. Ferner betrachtet man eine Annäherung an ein Hindernis (z. B. eine rote Ampel), $\Delta v = v$.

$$\dot{v} = -a \left(\frac{s^*}{s} \right)^2 = - \left(\frac{v^2}{2s} \right)^2 \frac{1}{b} = - \frac{b_{kin}^2}{b} \quad \text{Gl. 3.7}$$

Wobei $b_{kin} = v^2 / 2s$, die zur Kollisionsvermeidung mindestens notwendige kinematische Verzögerung darstellt. Damit schließt sich daraus die selbstregulierende Bremsstrategie:

Eine kritische Situation ist dadurch charakterisiert, dass die kinematische Verzögerung größere Werte annimmt als die komfortable Verzögerung b .

Ist die Situation kritisch, wird noch etwas stärker als mit der kinematischen Verzögerung gebremst.

Parameter	Typ. Wert (Autobahn)
Wunschgeschwindigkeit v_0	120 km/h
Folgezeit T	1.0 s
Minimalabstand s_0	2 m
Beschleunigungsexponent δ	4
Beschleunigung α	1.0 m/s ²
Verzögerung b	1.5 m/s ²

Tab. 10: Modellparameter und typische Werte auf Autobahn des Intelligent-Driver-Modells (TREIBER & KESTING, 2010)

Dadurch wird die kinematische Verzögerung in Richtung der komfortablen Verzögerung reduziert und die Situation unter Kontrolle gebracht. Ist die Situation unkritisch und ein Bremsen noch gar nicht notwendig, ist die aktuelle Verzögerung noch geringer. Dadurch steigt die kinematische Beschleunigung in Richtung der komfortablen Verzögerung. Bei kurzen Zeitlücken (geringer Geschwindigkeitsdifferenz Δv) ist die IDM-Verzögerung gleich: $(s_0 + vT/s)^2$.

3.3.2 Simulation eines Verkehrszusammenbruchs auf einer Autobahn

Im Folgenden werden die Eignung des Gipps-Modells und des IDM für die Simulation eines Verkehrszusammenbruchs auf einer Autobahn verglichen. Damit wird erklärt, weswegen das IDM für dieses Projekt gewählt wurde.

Wie oben erwähnt, basiert das Fahrzeugfolgeverhalten sowie das Fahrstreifenwechseln im AIMSUN-Simulator auf den Verkehrsmodellen von GIPPS (GIPPS, 1986; 1981). Es ergibt sich sowohl aus unserer Erfahrungen als auch aus der Literatur (RONCOLI et al., 2016, 2014; NTOUSAKIS & NIKOLOS, 2015; WANG et al., 2005), dass das Gipps-Modell Stop-and-Go-Wellen und mögliche Verkehrszusammenbrüche an einer Engstelle nicht immer realistisch genug wiedergibt. Aus diesem Grund, wurde im Rahmen des Projektes das Gipps-Modell durch das IDM-Modell ersetzt.

TREIBER & KESTING (2010) beschreiben u. a. im Detail die Simulationsergebnisse eines Verkehrs-

zusammenbruchs auf einer Autobahn mit einer Engstelle (Einfahrt) für die zwei Fahrzeugfolgemodelle. Die Ergebnisse sind in Bild 22 dargestellt.

Beide Modelle zeigen kleine Störungen, die durch Fahrstreifenwechsel bei der Einfahrt entstehen und im Verlauf ihrer Ausbreitung entgegen der Fahrtrichtung mit einer Ausbreitungsgeschwindigkeit von etwa 15 km/h zu Stop-and-Go-Wellen anwachsen. Die raumzeitliche Dynamik wird grundsätzlich gut reproduziert. Der Pinch-Effekt bzw. eine Dichteerhöhung nahe des Stau-Ausflusses wird beobachtet, wie auch häufig in realen Daten. Obwohl beide Modelle den Verkehr an und vor der Engstelle realitätsnah wiedergeben, hat das IDM-Modell einige Vorteile zur Darstellung des Verkehrszusammenbruchs.

Die Punkte nahe des Flussmaximums sind in Form eines gespiegelten griechischen λ (inverse λ Form) angeordnet. Das führt dazu, dass in einem gewissen Dichtebereich, sowohl freier, als auch gebundener Verkehr möglich ist. Das bedeutet, dass das IDM-Modell die in der Realität beobachtete Bistabilität und daraus resultierende Hysterese-Effekte (wie der Kapazitätsabfall) darstellen kann. Die Autoren haben noch die IDM-Ergebnisse mit realen Daten verglichen und eine nahezu quantitative Übereinstimmung im Fundamentaldiagramm (Bild 23) gezeigt. Darüber hinaus liegen die Fluss-Dichte-Punkte des freien Verkehrs nicht auf einer Geraden, sondern auf einer nahe des Flussmaximums stärker gekrümmten Kurve. Diese Krümmung wird, im Gegensatz zum Gipps-Modell, richtig wiedergegeben.

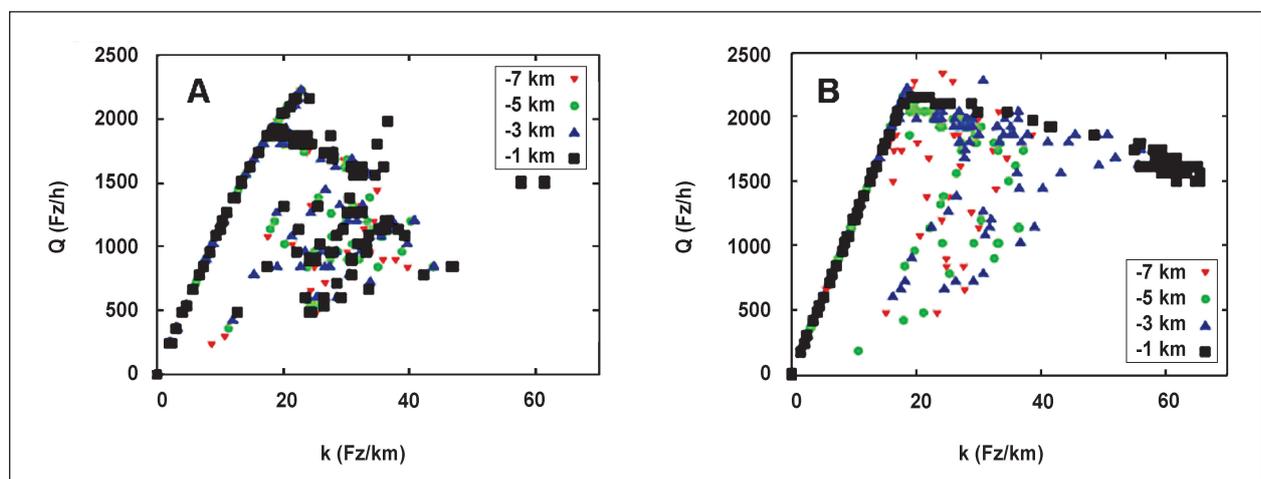


Bild 22: Simulation einer Engstelle (Einfahrt) auf Autobahn unter Verwendung des IDM (A) und des Gipps-Modells (B) (TREIBER & KESTING, 2010)

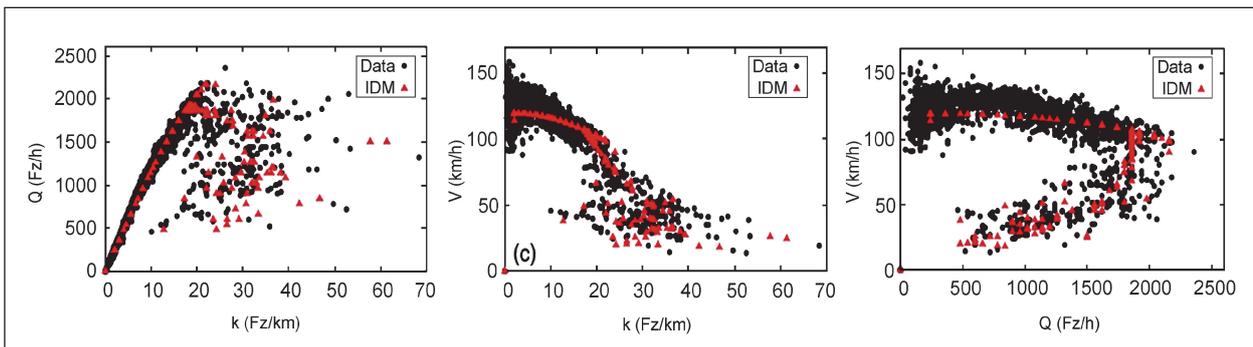


Bild 23: Fundamentaldiagramm und Simulation unter Verwendung des IDM-Modells (TREIBER & KESTING, 2010)

3.3.3 Fahrstreifenwechselmodelle

Das Fahrstreifenwechselmodell von AIMSUN wurde, wie das Fahrzeugfolgemodell, von GIPPS entwickelt (GIPPS, 1981; 1986). Zusammenfassend beschrieben, wird der Fahrstreifenwechsel als ein Entscheidungsprozess modelliert, der die Notwendigkeit (z. B. Verfolgung der Route), die Attraktivität (z. B. um die Wunschgeschwindigkeit zu erreichen) und die Möglichkeit (in Bezug auf die Position des Fahrzeugs im Simulationsnetz – Seitenabstand zu benachbarten Fahrzeugen) eines Fahrstreifenwechsels analysiert. Nur wenn der Fahrstreifenwechsel notwendig oder attraktiv und gleichzeitig möglich ist, darf das Fahrzeug den Fahrstreifen wechseln.

Um das Fahrverhalten besser wiedergeben zu können, werden drei Fahrstreifenwechselzonen definiert, die jeweils eine andere Begründung für den Fahrstreifenwechsel haben:

- In Zone 1 wird das Fahrverhalten des Fahrzeugs durch die aktuelle Verkehrslage und den Nutzen, den das Fahrzeug von einem Fahrstreifenwechsel hat, beeinflusst.
- In Zone 2 (Zwischenzone) versuchen die Fahrzeuge, den Fahrstreifen zu wechseln, welche sich nicht auf dem richtigen Fahrstreifen befinden, um ihrer Route zu verfolgen. Die Fahrzeuge nähern sich der Stelle, wo sie beispielsweise abbiegen wollen, an und versuchen daher, eine geeignete Seitenlücke zu finden, um den Fahrstreifen zu wechseln.
- In Zone 3 sind die Fahrzeuge gezwungen, den Fahrstreifen möglichst schnell zu wechseln, um ihrer Route zu folgen. Ggf. müssen sie dazu auch stehen bleiben.

Das Fahrstreifenwechselmodell von AIMSUN wurde in einigen Streckenbereichen (direkt vor der

Engstelle und an Ein- und Ausfahrten) durch drei heuristischen Regeln ersetzt, welche unseren Erfahrungen nach das Einfädelverhalten besser wiedergeben. Die drei Regeln prüfen die Möglichkeit für einen Fahrstreifenwechsel anhand der Geschwindigkeit des Fahrzeugs, sowie der Geschwindigkeitsdifferenz und des Abstands zu benachbarten Fahrzeugen. Die Zielwerte der Kriterien hängen von der Position des Fahrzeugs auf dem zu verlassenden Fahrstreifen ab. Die drei Regeln können je nach Anwendungsfall spezifisch parametrisiert werden. Das heißt, dass die Kriterien für unterschiedliche Abschnitte des Simulationsnetzes (z. B. Fahrstreifeneinzug, Einfahrt) verfeinert werden können.

3.3.4 Beschreibung des Testfelds und deren Abbildung im Simulator

Das Netz (bzw. die Strecke) besteht aus sieben vierstreifigen Teilstrecken unterschiedlicher Länge sowie den erforderlichen Verbindungsstrecken. Es wurde gemäß dem von Strassen.NRW zur Verfügung gestellten Plan (Bild 24) in AIMSUN entworfen. Die vorhandenen Detektoren wurden an den in Bild 24 enthaltenen Positionen fahrstreifenfein hinzugefügt. Zusätzlich wurden noch Mess- und Anzeigequerschnitte an für die Steuerung optimalen Positionen hinzugefügt. Bei Kilometer 133,20 und 135,50 befinden sich eine Ein- bzw. eine Ausfahrt.

Die Strecke wurde so aufgeteilt, dass man die entscheidungsrelevanten Modell- und Steuerungsparameter bei Bedarf für jede Teilstrecke einstellen kann, wie z. B. unterschiedliche zulässige Höchstgeschwindigkeiten oder streckenspezifische Parameter der Mikrosimulation.

Ferner wurden die zwei Fahrzeugklassen definiert (Pkw und Lkw), welche unterschiedliche Eigen-

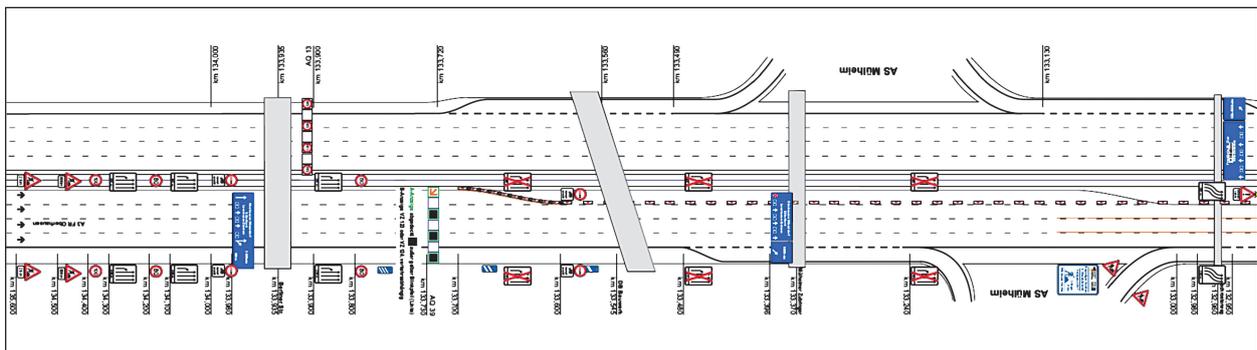


Bild 24: Plan der Teststrecke (Quelle: Strassen.NRW)

schaften bezüglich der Dimensionierung und des Fahrverhaltens haben. Die Verkehrsnachfrage wird für die zwei Klassen in AIMSUN importiert.

3.4 Kalibrierung und Validierung des Simulationsmodells

Die Kalibrierung und Validierung des Simulationsmodells sind wesentliche Arbeitsschritte, die für dessen Güte entscheidend sind.

Als Kalibrierung des Simulationsmodells wird der Vorgang bezeichnet, bei dem die veränderlichen Modellparameter so angepasst werden, dass die Simulation hinreichend genau die in der Realität beobachteten Verkehrsverhältnisse abbildet. Dies ist ein iterativer Prozess, bei dem die Übereinstimmung des Modells mit der Realität mithilfe von Simulationsläufen anhand von ausgewählten Kenngrößen und Kriterien, wie beispielsweise die Visualisierung der Simulation und der daraus resultierenden Verkehrsgrößen beurteilt wird (FGSV, 2006).

Die Validierung ist der Nachweis, dass mit den voreingestellten Parametern mindestens ein empirischer Datensatz nachgebildet werden kann, unter der Voraussetzung, dass der entsprechende Datensatz nicht für die Kalibrierung des Modells herangezogen wurde. Dadurch wird überprüft, inwiefern das Modell auf andere Gegebenheiten übertragen werden kann. Wichtig ist dabei noch, dass die – während der Kalibrierung eingestellten – Parameter unverändert bleiben (FGSV, 2006).

Nach der Kalibrierung und Validierung folgt die eigentliche Anwendung des Modells, bei der das Steuerungsverfahren verwendet, optimiert und bewertet werden kann.

Im Folgenden wird auf die Vorgehensweise (einschließlich der Kriterien und Kenngrößen) bei der

Kalibrierung und Validierung sowie deren Ergebnisse eingegangen.

3.4.1 Vorgehensweise bei der Kalibrierung

Die Kalibrierung des Modells ist ein iterativer Prozess. Nachdem ein Parameter angepasst wird, wird die Genauigkeit der simulierten Verkehrslage anhand der ausgewählten Kriterien und Kenngrößen gemessen. Beispiele für solche Parameter sind in Bild 6 für jeden Fahrzeugtyp dargestellt. Die Genauigkeit muss unter Einhaltung eines bestimmten Fehlermaßes geprüft werden. Sollte das Maß der Übereinstimmung nicht den Vorstellungen entsprechen, wird es durch erneute Modifikation des angenommenen Wertes versucht, eine verbesserte Übereinstimmung zu erreichen. Dieser Anpassungsprozess erfolgte im Rahmen des Projektes manuell (trial and error).

Der oben beschriebene Prozess kann wie folgendes zusammengefasst werden:

1. Auswahl eines Fehlermaßes, z. B. RMS-Fehler,
2. Festlegung der Kriterien und Kenngrößen,
3. Bestimmung der erforderlichen Genauigkeit,
4. Berechnung der Anzahl der Simulationsläufe,
5. Anpassung der Kalibrierungsparameter.

Für die Kalibrierung wurden alle veränderbaren Parameter von AIMSUN berücksichtigt. Durch eine grobe Voruntersuchung wurden zuerst alle Parameter bestimmt, welche einen starken Einfluss auf das Simulationsergebnis haben. Die entscheidenden Parameter sind im Wesentlichen die Parameter der heuristischen Regeln für das Fahrstreifenwechselverhalten, sowie die Eigenschaften der Fahrzeuge (für die zwei Fahrzeugtypen – Pkw, Lkw) wie die

Fahrzeugabmessungen, die Geschwindigkeit, die Beschleunigung, die Bremsenverzögerung und das Abstandsverhalten. Anschließend wurden die Parameter ausführlicher untersucht, um die endgültigen Werte festzustellen und das Modell zu verfeinern.

Wie schon beschrieben wurde das Fahrzeugfolgemodell und die Regeln zum Fahrstreifenwechseln überschrieben. Infolgedessen konnten einige AIMSUN-Parameter nicht mehr berücksichtigt werden, da diese keine Auswirkung auf das Fahrverhalten hatten. Es soll noch darauf hingewiesen werden, dass man für alle Parameter, die in AIMSUN stochastisch betrachtet werden, den Maximal- bzw. Minimalwert sowie die Abweichung des Mittelwertes anpassen kann.

3.4.2 Kriterien, Kenngrößen und angestrebte Genauigkeit

Je nach Datenbeschaffenheit sind verschiedene Größen denkbar, mit denen die Genauigkeit des Modells gemessen werden kann, wie z. B. die Verkehrsstärke, die Geschwindigkeit oder die Reisezeit. Eine ausführliche Liste von typischen Kenngrößen und Merkmalen kann man im Kapitel 4.4.3 in (FGSV, 2006) finden.

Die zur Verfügung gestellten Realdaten enthalten Informationen zur Verkehrsstärke, Geschwindigkeit und Belegung an allen MQ der Teststrecke. Im Rahmen des Projekts wurde die Verkehrsstärke an jedem einzelnen Messquerschnitt in Zeitintervallen von 10 Minuten als Kalibrierungskenngrößen verwendet. Daneben wurden noch qualitative Prüfungen (Visual Audits) der Geschwindigkeit mithilfe von Geschwindigkeitskontourplots geführt, indem das Fundamentaldiagramm, um die Abhängigkeit der Verkehrsstärke, der Belegung und der Geschwindigkeit qualitativ zu prüfen, benutzt wurde. Die Validität des Fahrstreifenwechselmodells wurde durch die Visualisierung der Verkehrsflusssimulation im Bereich vor der Engstelle empirisch geprüft.

Bezüglich der festzulegenden notwendigen Genauigkeit der quantitativen Kriterien ist es wegen den unterschiedlichen Aufgabenstellungen sehr schwierig konkrete Aussagen zu erreichen. In (FHWA, 2004) wird für die Simulation des Verkehrsablaufs auf Autobahnabschnitten empfohlen, dass in mehr als 85 % der simulierten Verkehrsstärken weniger als 15 % Abweichung zwischen Realität und Simulation erreicht werden soll. Je kürzer die ausgewähl-

ten Zeitintervalle sind, desto größer ist der zu erwartende Fehler.

3.4.3 Anzahl der Simulationsläufe

Die Realdaten sowie die simulierten Daten beinhalten stochastische Schwankungen. Um eine Aussage über die Streuung des Simulationsergebnisses zu erhalten, müssen mehrere Simulationsdurchläufe (mit unterschiedlichen Startzufallszahlen) durchgeführt werden. Die notwendige Anzahl der Simulationsläufe ist vom Mittelwert und von der Streuung der betrachteten Kenngröße sowie von der angestrebten Genauigkeit und der statistischen Sicherheit der Aussage abhängig. Das Konfidenzintervall bestimmt den Wertebereich, in dem die ausgewählte Kenngröße mit der Wahrscheinlichkeit des Konfidenzniveaus liegt.

Die Anzahl der notwendigen Simulationsläufe N wurde mit Gleichung 3.8 iterativ geschätzt, bis die berechnete Anzahl der Wiederholungen gleich derjenigen ist, die bei der Ermittlung von t aus der Student-Verteilung angenommen wurde (FHWA, 2004).

$$CI_{1-\alpha\%} = 2t_{\left(1-\frac{\alpha}{2}\right), N-1} \frac{s}{\sqrt{N}} \quad \text{Gl. 3.8}$$

wobei

CI gewünschtes Konfidenzintervall bzw. Differenz der Ergebnisse zweier Simulationsexperimente, die gerade noch als signifikant erkannt werden soll.

$t_{\left(1-\frac{\alpha}{2}\right), N-1}$ Wert aus der Student-Verteilung für die Wahrscheinlichkeit eines beidseitigen Fehlers.

N Anzahl der erforderlichen Simulationsläufe.

s Standardabweichung der untersuchten Kenngröße aus der letzten Untersuchung. Bei der ersten Berechnung ist die Standardabweichung aus der Voruntersuchung zu verwenden.

Für unsere Zwecke wurde die Geschwindigkeit mit einem Konfidenzniveau von 99 % und einem Konfidenzintervall von 5 km/h als Kenngröße gewählt. Um die Standardabweichung der Geschwindigkeit für den ersten Berechnungsschritt zu schätzen, hat zuerst eine Voruntersuchung mit fünf Wiederholungen stattgefunden. Aus der iterativen Berechnung

hat sich eine Anzahl von zehn Simulationsläufen ergeben.

3.4.4 Kalibrierungsparameter

In diesem Kapitel werden alle AIMSUN-Parameter, welche für die Kalibrierung des Modells untersucht wurden, sowie die entsprechende eingestellten Werte dargestellt (Tabelle 11). Der Zeitschritt der Simulation wurde mit 0.2 s und die Reaktionszeit bei Stillstand mit 0.7 s festgelegt.

3.4.5 Ergebnisse der Kalibrierung

Für die Kalibrierung des Modells wurden die im Kapitel 3.4.2 genannte Kriterien verwendet. Der Anteil der simulierten Verkehrsstärken, die weniger als 15 % von den realen Verkehrsstärken abweichen, betrug 92 %. Das erfüllt das vom (FGSV, 2006) empfohlenen Kriterium (> 85 %).

In Bild 26 sind die Geschwindigkeitskontourplots für alle zehn durchgeführten Simulationsdurchläufe dargestellt. Im Vergleich der Ergebnisse mit dem Kontourplot der Realdaten (Bild 25) sind gute Übereinstimmungen festzustellen. Die Aktivierung der Engstelle (Verkehrszusammenbruch) findet in Übereinstimmung mit der Realität um 06:25 (0.65 h der Simulationszeit) statt und der Stau breitet sich stromaufwärts sehr schnell aus und wird um ungefähr 08:30 (2.75 h der Simulationszeit) aufgelöst. Die Ausbreitungs- und Auflösungs geschwindigkeit wurden ebenfalls sehr gut geschätzt. Die Variabilität und daher die Abweichungen jedes Kontourplots im Vergleich zu den Realdaten waren in den verschiedenen Simulationsdurchläufen zu erwarten und

werden auf den stochastischen Charakter der Simulation zurückgeführt.

Die Geschwindigkeit wurde sehr gut, insbesondere nah an der Engstelle, abgebildet. Jedoch wurde die Geschwindigkeit weniger akkurat an den Querschnitten, die weiter von dem Fahrstreifeneinzug entfernt sind, errechnet, da sich der im Modell simulierte Rückstau nicht bis zum ersten MQ der Teststrecke (MQ 3.380) ausgedehnt hat, sondern etwa 100 m davor. Angesichts der im Allgemeinen sehr guten Abbildung des Verkehrsphänomens in der Simulation wurde diese kleine räumliche Abweichung des Staubereichs als unbedeutend für die weitere Analyse betrachtet.

Im Fundamentaldiagramm in Bild 27 ist die Abhängigkeit der Verkehrsstärke und der Belegung kurz vor der Engstelle (MQ 002mn) dargestellt. In der Gegenüberstellung zwischen simulierten Daten und

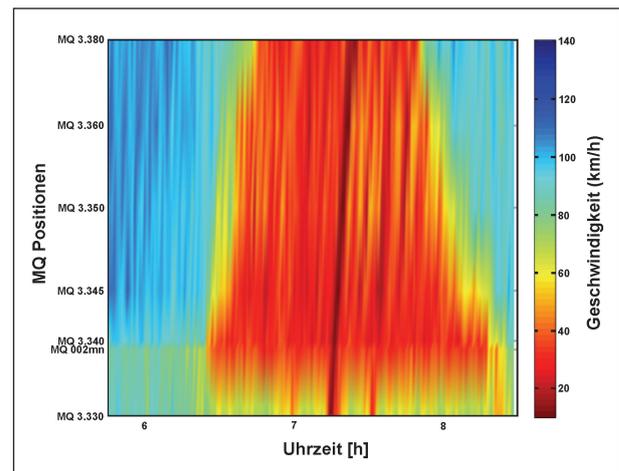


Bild 25: Geschwindigkeitskontourplot – Realdaten für den Kalibrierungsdatensatz

Parameter	Pkw				Lkw			
	MW	Abw.	Min	Max	MW	Abw.	Min	Max
Länge [m]	4.50	0.50	3.50	5.60	12.00	2.00	6.00	18.00
Breite [m]	2.00	0.00	2.00	2.00	2.25	0.20	2.00	2.80
Max Wunschgeschw. [km/h]	130.00	10.00	80.00	150.00	85.00	10.00	70.00	100.00
Max Beschleunigung [m/s ²]	3.40	0.25	2.90	3.60	2.70	0.25	2.40	2.90
Akzeptanz der Geschw.	1.10	0.10	0.90	1.30	1.05	0.10	1.00	1.10
Min Stillstandsabstand [m]	1.60	0.30	1.00	2.00	1.50	0.50	1.00	2.50
Verzögerung [m/s ²]	2.00	0.20	1.80	2.50	2.00	0.20	1.80	2.50
Max Verzögerung [m/s ²]	7.00	0.50	5.00	8.00	5.00	0.50	4.00	6.00
Min Folgeabstand [s]	0.80	0.20	0.70	1.10	1.00	0.30	0.80	1.10

Tab. 11: Einstellung der Kalibrierungsparameter für Pkw und Lkw in AIMSUN (nur veränderte Werte)

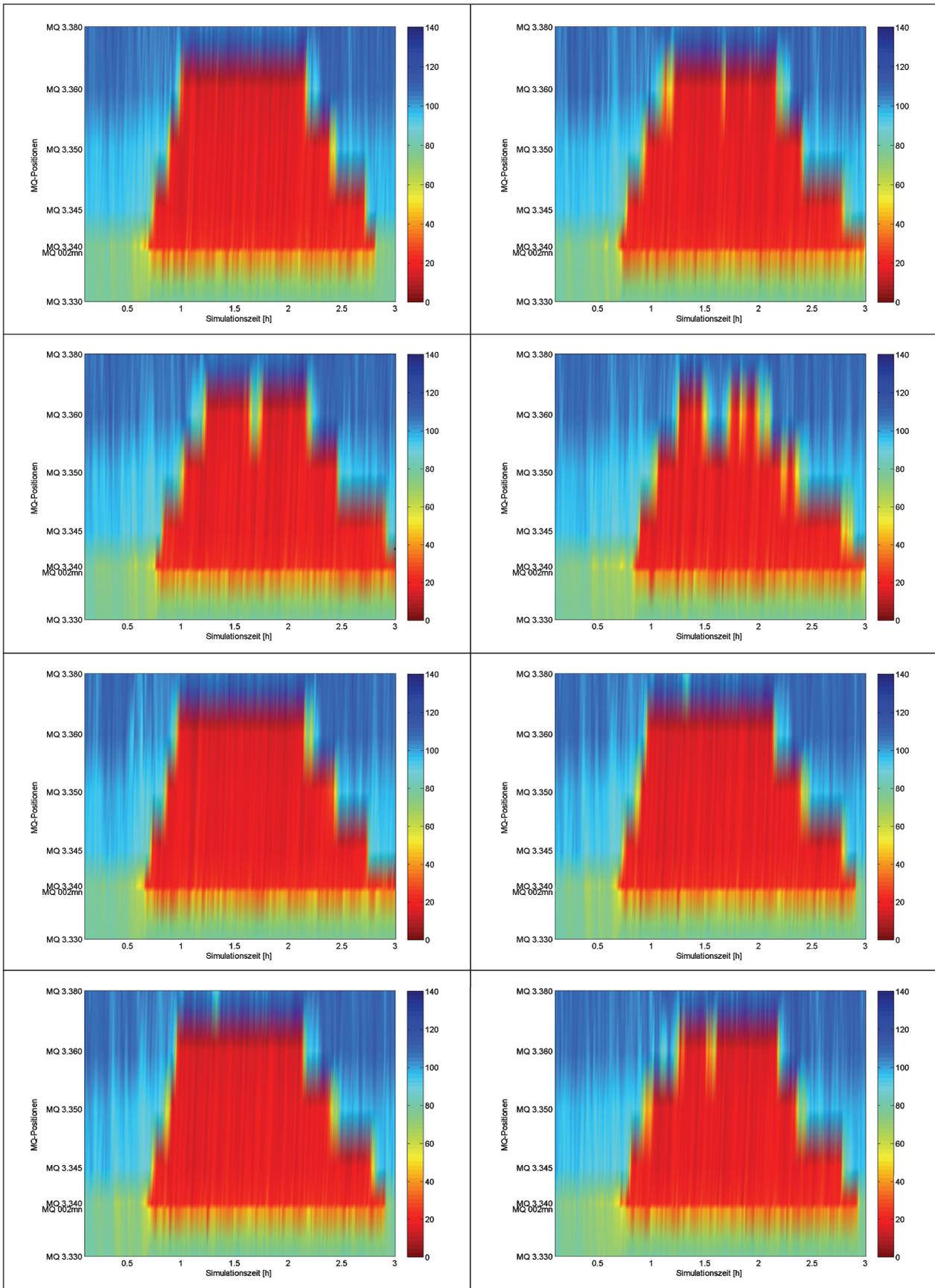


Bild 26: Geschwindigkeitskonturplots aus den 10 Durchläufen der Kalibrierung

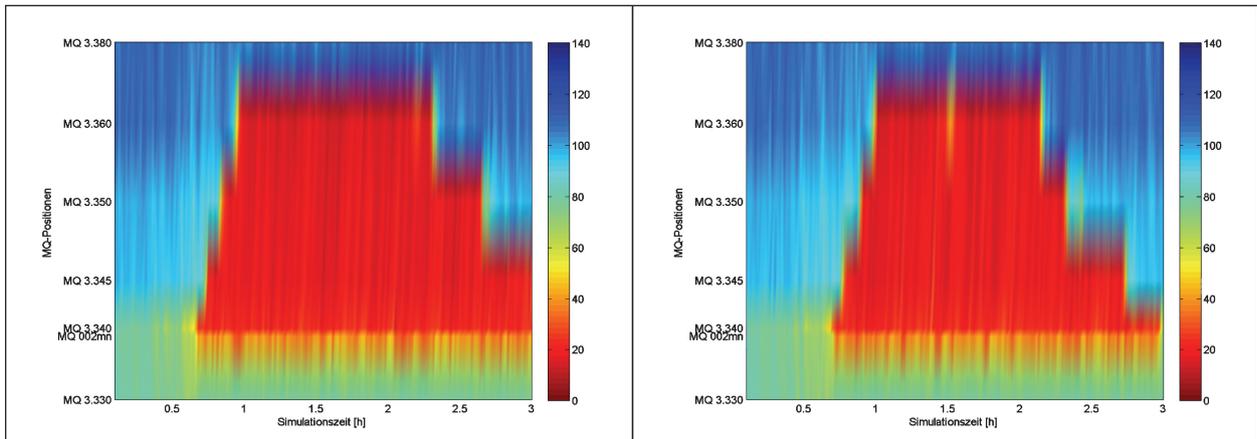


Bild 26: Fortsetzung

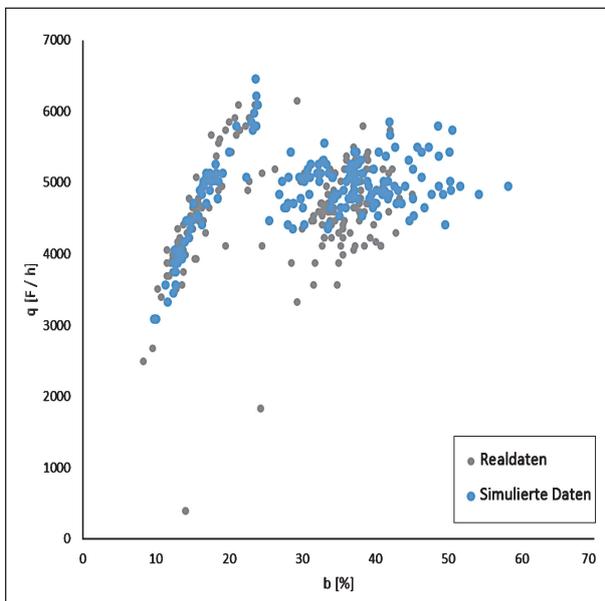


Bild 27: Fundamentaldiagramm (q-b): Gegenüberstellung von Real- und simulierten Daten (Kalibrierung)

der Realdaten ist sowohl im freien als auch im überlasteten bzw. zusammengebrochenen Verkehr ein hohes Maß an Übereinstimmungen erkennbar.

Im Allgemeinen wurden alle Kriterien erfüllt. Die Verkehrsstärken liegen im gewünschten Toleranzbereich und die Geschwindigkeiten wurden außer am ersten MQ der Teststrecke sehr gut wiedergegeben. Die Verkehrslage wurde im Allgemeinen trotz der beschriebenen Schwierigkeiten und Probleme (siehe Kapitel 2.5.1), sowie der Dateneinschränkungen sehr zufriedenstellend abgebildet.

3.4.6 Validierung

Für die Validierung des Simulationsmodells wurde die Übereinstimmung des Modells mit der Realität überprüft. Dies geschah für einen Datensatz, der nicht für die Kalibrierung benutzt wurde und unter Verwendung der gleichen Parameterwerte, die sich aus der Kalibrierung ergeben haben.

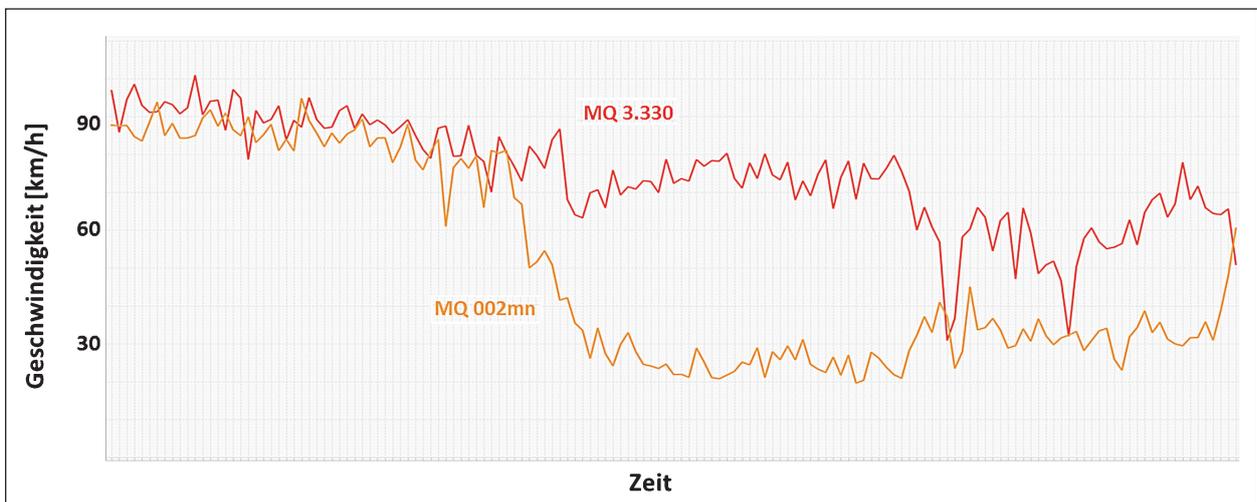


Bild 28: Geschwindigkeitsganglinie für MQ 002mn und MQ 3.330 für den Validierungsdatsatz

Die Daten, die für die Validierung verwendet werden, müssen auch die im Kapitel 3.1 aufgelisteten Kriterien erfüllen.

In Bild 28 ist die Geschwindigkeit stromaufwärts (MQ 002mn) und stromabwärts (MQ 3.330) der

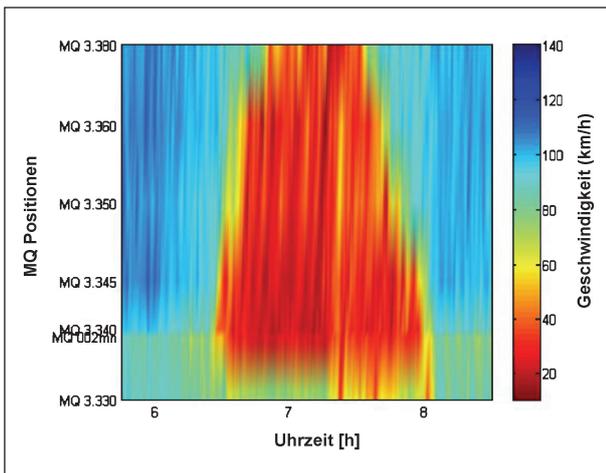


Bild 29: Geschwindigkeitskonturplot – Realdaten für den Validierungsdatensatz

Engstelle dargestellt. Dies dient als Beweis für die Eignung der Daten, da der Verkehrszusammenbruch, wie auch bei dem Kalibrierungsdatensatz, an dem Fahrstreifeneinzug liegt. Obwohl weitere Geschwindigkeitseinbrüche stromabwärts der Engstelle in späteren Zeit beobachtet wurden, war die Auswahl von geeigneten Daten wegen der Probleme, die im Kapitel 3 dargestellt wurden, eingeschränkt und es konnte daher kein anderer Datensatz für die Validierung gefunden und genutzt werden. Im Folgenden sind die Geschwindigkeitskonturplots der Realdaten (Bild 29) und der Validierungsdaten (Bild 30) dargestellt.

Aus der Auswertung hat sich ergeben, dass eine Abweichung von weniger als 15 % bei einem Anteil von 88 % der simulierten Verkehrsstärken erreicht wurde. Die Geschwindigkeitskonturplots stellen, wie auch bei der Kalibrierung, gute Ergebnisse insbesondere bis 07:30 dar, da die Form des Staubeereichs (räumliche und zeitliche Ausdehnung, sowie die entsprechende Ausbreitungs- und Auflösungsgeschwindigkeit) sehr ähnlich wie in der Realität ist.

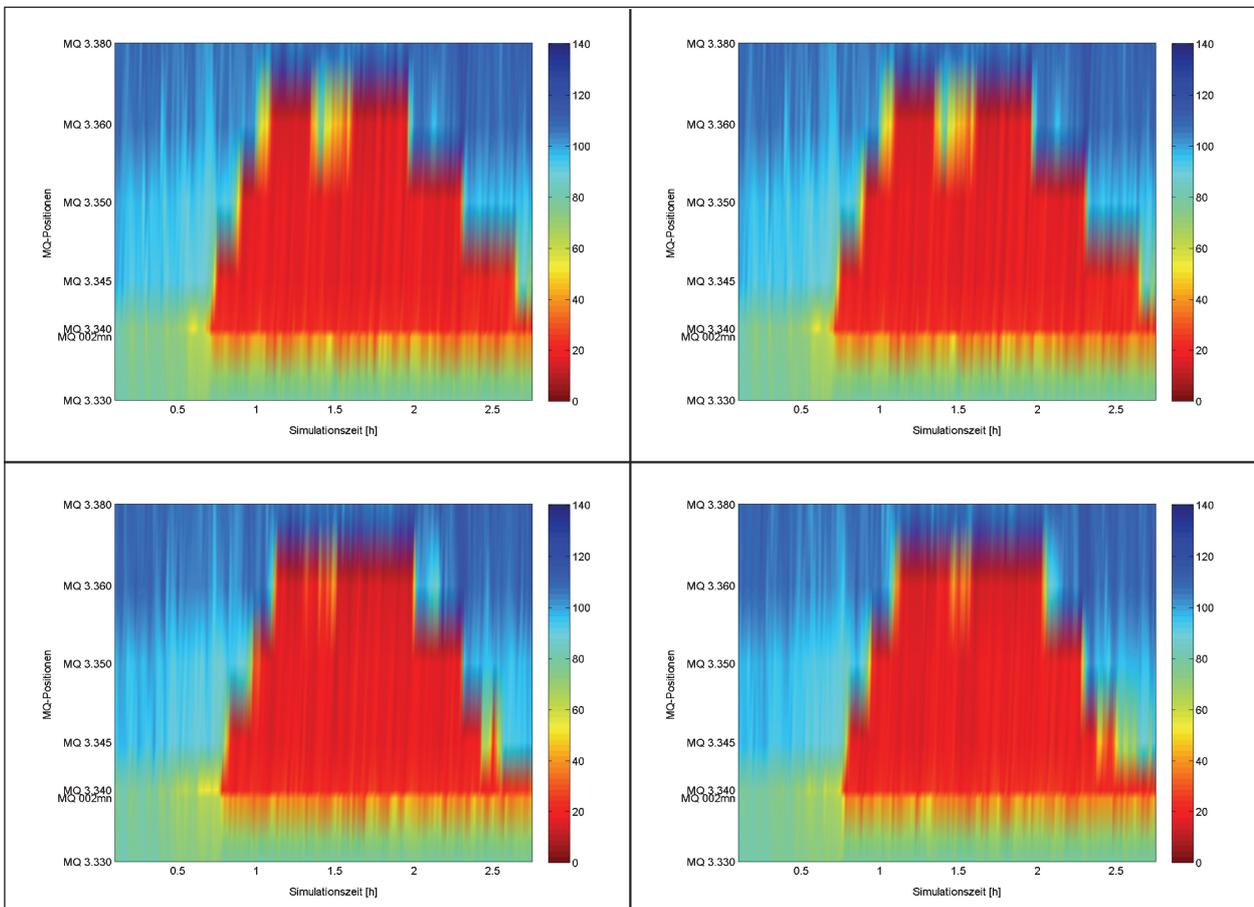


Bild 30: Geschwindigkeitskonturplots aus den 10 Durchläufen der Validierung

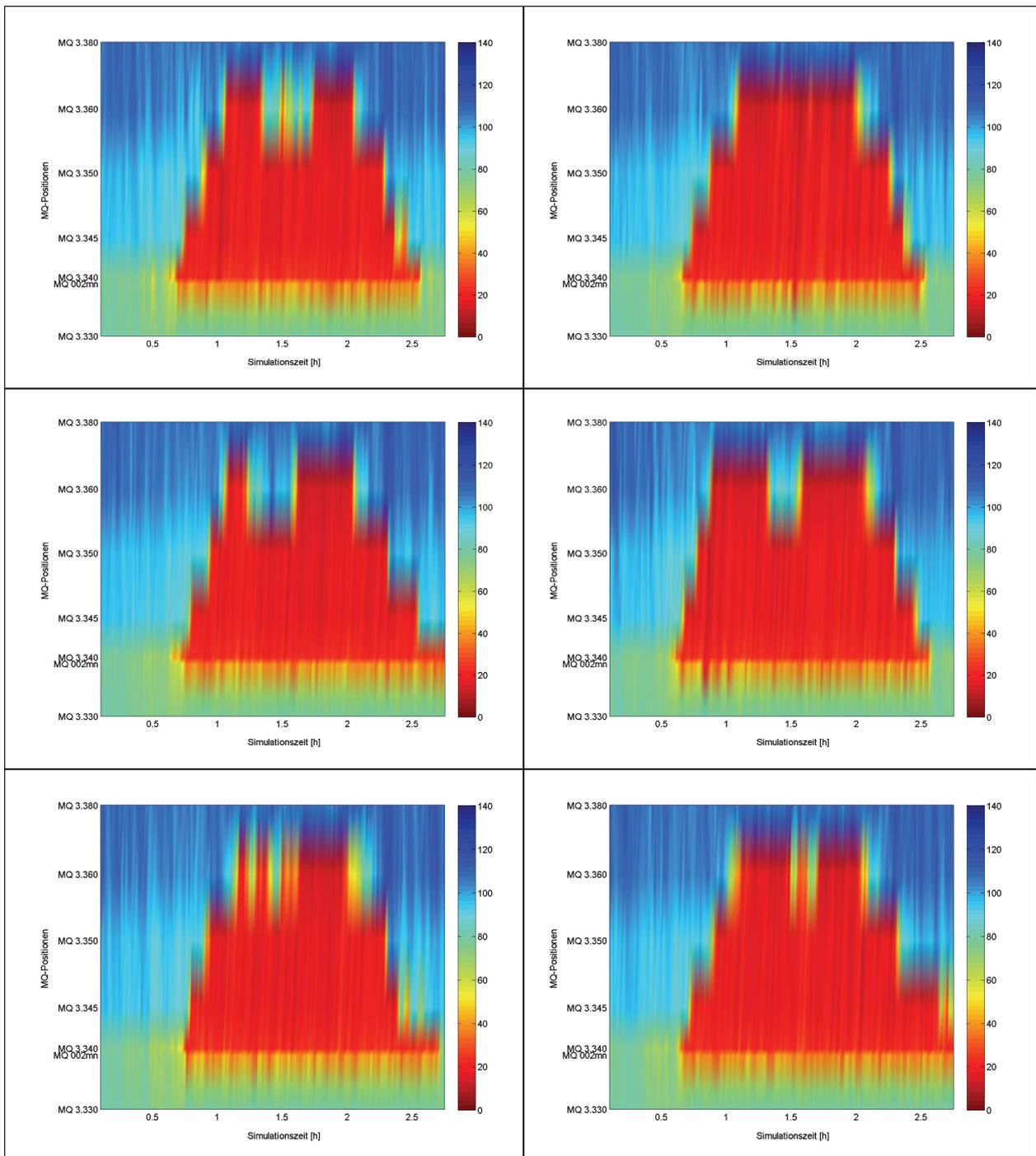


Bild 30: Fortsetzung

Obwohl die weiteren Geschwindigkeitseinbrüche mangels Daten im Arbeitsstellenbereich nicht reproduzierbar sind, gibt das Modell die Verkehrslage auch für den Zeitraum 07:30-08:30 zufrieden-

stellend wieder. Des Weiteren stimmt das Fundamentaldiagramm (Bild 31) in hohem Maße mit der Realität überein.

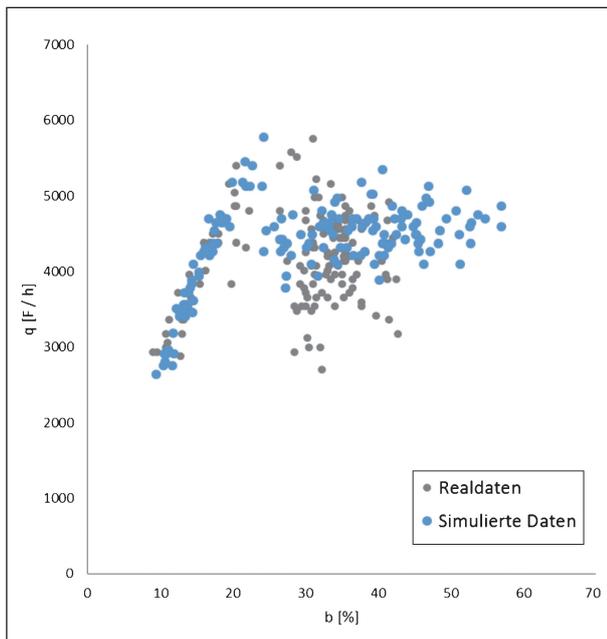


Bild 31: Fundamentaldiagramm (q-b): Gegenüberstellung von Real- und simulierten Daten (Validierung)

4 AP3: Regelungstechnischer Entwurf und Simulation

4.1 Führungs-, Stell- und Regelgrößen

4.1.1 Grundkonzept

Das angestrebte Grundkonzept der Verkehrssteuerung stromaufwärts einer Autobahn-Arbeitsstelle, das zur Festlegung der entsprechenden Führungs-, Stell- und Regelgrößen führt, ist in Bild 32 dargestellt. Die Engstelle entsteht durch die Reduktion der Fahrbahn um einen Fahrstreifen. Stromaufwärts der Engstelle sind drei Beeinflussungszonen vorgesehen, die wie folgt charakterisiert sind:

Die Beschleunigungs- und Streifenwechselzone (BSZ), die unmittelbar stromaufwärts der Engstelle liegt und eine Mindestlänge von 300 m aufweist, soll mittels geeigneter Steuerungsmaßnahmen so lange wie möglich staufrei gehalten werden. Die vorgesehene Kapazität-VGB (variable Geschwindigkeitsbeschränkung) an der stromaufwärtigen Grenze der Zone (Bild 32) schaltet verkehrabhängig auf Geschwindigkeitswerte, die zur Maximierung der Kapazität der Engstelle führen sollen. Dies entspricht der stabilisierenden Wirkung von mäßigen VGB-Werten, wie in Bild 11 angedeutet, die in einigen Fällen tatsächlich zur Erhöhung der Kapazität führen können. Solange die BSZ staufrei ist, schaltet die ebenso an der stromaufwärtigen Gren-

ze der Zone befindliche FWS auf Früh-Einfädeln. Ist hingegen die Einstauung der Zone nicht vermeidbar (z. B. wegen Rückstau von stromabwärts), so schaltet die FWS auf Einfädeln nach dem Reißverschlussprinzip.²

Die Zurückhalte- bzw. Drosselungszone (ZDZ) schließt unmittelbar stromaufwärts an die BSZ an und ist mindestens 300 m lang. Hier soll der Verkehrsfluss, sofern er die Engstellenkapazität übersteigt, durch geeignete Wirkung der ZD-VGB gedrosselt werden, wodurch die BSZ tatsächlich staufrei gehalten werden kann. Die Zurückhalte- bzw. Drosselungswirkung entsteht durch geeignetes Herabsetzen der VGB, wie in Bild 11 angedeutet ist. Die ZD-VGB befindet sich an der stromaufwärtigen Grenze der ZDZ (Bild 32) und schaltet verkehrabhängig auf ausreichend niedrige Geschwindigkeitswerte, um mittels eines entsprechenden Regelkreises die Engstelle beim kritischen Belegungsgrad (und somit mit maximalem Durchfluss) zu betreiben. Es ist der Sinn dieser Steuerungsfunktion, die Bildung eines Staus direkt an der Engstelle und den damit verbundenen Einbruch der Kapazität zu vermeiden. Da die Drosselung erst einwirkt, wenn die Kapazität der Engstelle überschritten wurde, kann sich innerhalb der ZDZ ein Stau bilden, der sich aber milder als im Fall ohne Steuerung gestaltet, da der Durchfluss im Steuerungsfall durch die Vermeidung des Kapazitätseinbruchs höher ausfällt. Je nach Höhe der ankommenden Nachfrage kann sich der ZDZ-Stau stromaufwärts ausweiten.

Die Geschwindigkeitstrichterzone (GTZ) schließt unmittelbar stromaufwärts an die ZDZ an (Bild 32) und beinhaltet eine oder mehrere (in Abständen von mindestens 500 m voneinander entfernte) Trichter-VGB. Es ist die Funktion der Trichter-VGB, die schrittweise Herabsetzung der Geschwindigkeit der ankommenden Fahrzeuge von gegebenenfalls höheren Geschwindigkeiten stromaufwärts zu den niedrigeren Geschwindigkeiten in der ZDZ zu bewirken. Darüber hinaus bewirkt das Herabsetzen der Trichter-VGB (als Folge der Reduzierung der ZD-VGB) eine zusätzliche Drosselung des ankommenden Verkehrs, die im Sinne von Bild 11 als temporär bezeichnet werden kann.

² Die genauen Inhalte der FWS-Anzeigen, die zu den entsprechenden beabsichtigten Einfädelverhalten seitens der Fahrer führen sollen, werden im Kapitel 5.1. näher untersucht.

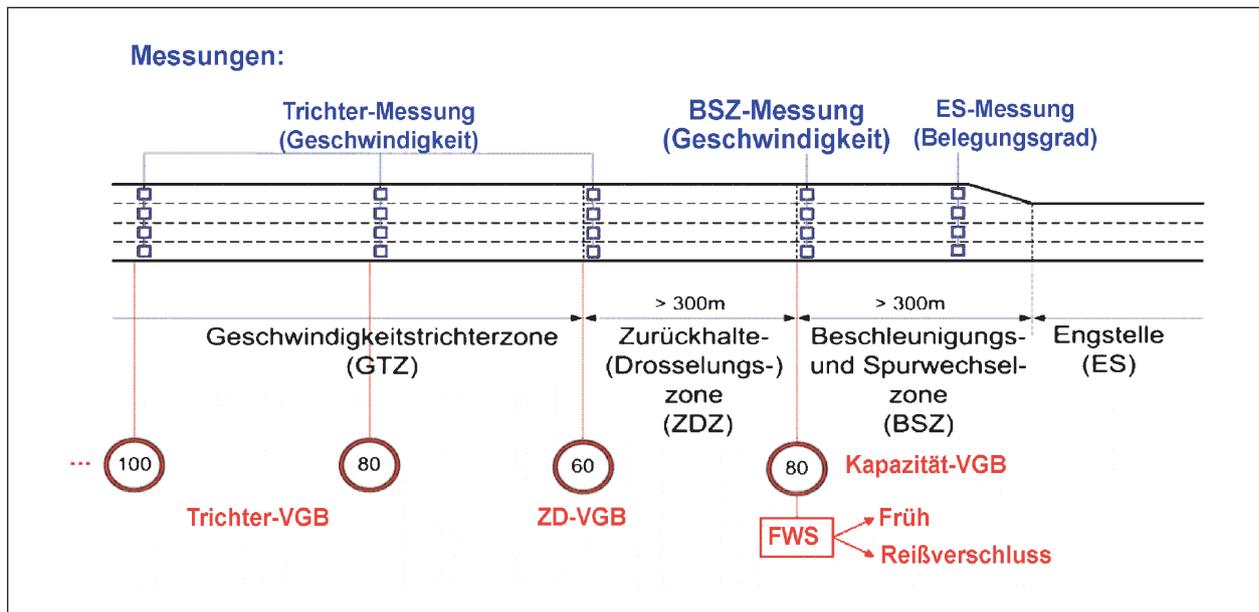


Bild 32: Grundkonzept der Verkehrssteuerung stromaufwärts einer Arbeitsstelle

Wie bereits erwähnt, strebt die ZD-VGB die Durchflussmaximierung an der Engstelle und somit auch den Schutz der BSZ vor Einstauung an. Dieses Ziel kann grundsätzlich in zwei Situationen verfehlt werden:

- Wenn ein Rückstau von stromabwärts die BSZ erreicht.
- Wenn die Drosselungsfunktion der ZD-VGB (z. B. wegen zu starker Nachfrage und nicht genügend niedrigen zulässigen VGB-Mindestwertes) sich als ungenügend erweist.

In solchen Fällen würde die Kapazität-VGB einen Geschwindigkeitswert anzeigen, der wegen des vorherrschenden Staus für die Fahrzeuge nicht erreichbar ist. Daher könnte die Kapazität-VGB in solchen Situationen auf einen Wert schalten, der knapp oberhalb der vorherrschenden mittleren Geschwindigkeit liegt; diesen Steuermodus der Kapazität-VGB nennen wir Folgefunktion. Darüber hinaus ist es in solchen Situationen ebenso unmöglich, eine Durchflussmaximierung an der Engstelle zu erzielen, weshalb die ZD-VGB auf Trichterfunktion umschalten könnte, um die Verkehrssicherheit angesichts der eingestauten BSZ zu erhöhen.

Es sei angemerkt, dass die Trichterfunktion mittels der Trichter-VGB idealerweise soweit stromaufwärts reichen sollte, wie die erwartete maximale Staulänge, die ihrerseits von der ankommenden Nachfrage und der Engstellenkapazität abhängt.

Diese volle Ausweitung der Steuerungsanlage mag unter Umständen wegen der damit verbundenen hohen Kosten nicht sinnvoll erscheinen, weshalb die Anzahl oder Dichte der Trichter-VGB entsprechend limitiert werden könnten.

4.1.2 Messungen

Bild 32 zeigt auch die Messquerschnitte, die zur Erfüllung der geschilderten Steuerungsfunktionen notwendig sind. Insbesondere:

- Ein Messquerschnitt an der Engstelle (ES-Messung) liefert den aktuellen Belegungsgrad und dient zunächst als Grundlage zur verkehrsabhängigen Schaltung der Kapazität-VGB zwecks Kapazitätsmaximierung an der Engstelle. Dieselbe Messung dient darüber hinaus der Regelung auf den kritischen Belegungsgrad (zwecks Durchflussmaximierung) mittels der ZD-VGB.
- Die an der stromaufwärtigen Grenze der BSZ befindliche BSZ-Messung liefert die aktuelle (ggf. geschätzte) mittlere Geschwindigkeit, auf deren Grundlage zunächst entschieden wird, ob die BSZ gegenwärtig eingestaut ist oder nicht. Diese Feststellung ist für die folgenden Steuerungsfunktionen entscheidend:
 - Schaltung der FWS auf Früh-Einfädeln (wenn die BSZ nicht eingestaut ist) bzw. auf Einfädeln nach dem Reißverschlussprinzip (wenn die BSZ eingestaut ist).

- Schaltung der Kapazität-VGB auf Kapazitätsmaximierung (wenn die BSZ nicht eingestaut ist) bzw. auf Folgefunktion (wenn die BSZ eingestaut ist).
- Schaltung der ZD-VGB auf Drosselungsfunktion (wenn die BSZ nicht eingestaut ist) bzw. auf Trichterfunktion (wenn die BSZ eingestaut ist).
- Die weiter stromaufwärts angeführten Trichter-Messungen sind in der Nähe der zugehörigen Trichter-VGB positioniert und liefern die aktuelle (ggf. geschätzte) mittlere Geschwindigkeit, auf deren Grundlage die Trichterfunktion der ZD-VGB (falls die BSZ eingestaut ist) sowie aller eigentlichen Trichter-VGB ausgeführt werden. Dementsprechend wird eine Trichter-Messung für die ZD-VGB und des Weiteren eine Trichter-Messung pro Trichter-VGB benötigt.

Eine weitere Messung innerhalb der Engstelle könnte ggf., z. B. zur frühzeitigen Erfassung einer von stromabwärts steigenden Staufront, vorgesehen werden, ist aber zum Betrieb des Steuerungssystems nicht unbedingt erforderlich.

4.1.3 Stellglieder

Das Steuerungssystem arbeitet im geschlossenen Wirkungskreis mit einer festgelegten Periode, die typischerweise eine Minute beträgt. Dieser Wert ermöglicht einerseits die zügige Anpassung der Steuerungsmaßnahmen an die veränderlichen Verkehrsbedingungen, ohne andererseits die Fahrer durch zu schnellen Wechsel der Steuerungsanzeigen zu irritieren. Die Steuerungsfunktionen aller im Steuerungssystem beinhalteten Stellglieder (VGB und FWS) werden im Folgenden zusammengefasst und weiter spezifiziert:

- Das primäre Steuerungsziel der Kapazität-VGB ist die Maximierung der Engstellen-Kapazität bei flüssigem Verkehrsablauf. Solange das Verkehrsaufkommen relativ gering ist, schaltet diese VGB auf einen vorab spezifizierten Wert (z. B. 100 oder 80 km/h), der ausschließlich der Erhöhung der Verkehrssicherheit in Anbetracht der nachfolgenden Fahrstreifenreduktion dient. Steigt das Verkehrsaufkommen über einen Schwellwert hinaus, so schaltet die Kapazität-VGB auf einen niedrigeren Geschwindigkeitswert, der vorab geeicht werden muss, so dass (falls überhaupt möglich) eine Erhöhung der Kapazität der Engstelle erzielt werden kann. Diese Erhöhung mag tatsächlich in vielen Fällen durch die VGB-bedingte Verkehrshomogenisierung und -stabilisierung möglich sein (Bild 11). Typische Geschwindigkeitswerte zur möglichen Kapazitätsmaximierung sind im Bereich von 70 bis 80 km/h zu erwarten. Ist aber die BSZ eingestaut, so könnte die Kapazität-VGB auf Folgefunktion umschalten, wobei der jeweils angezeigte Wert knapp oberhalb der vorherrschenden mittleren Geschwindigkeit in der BSZ gesetzt würde.
- Solange die BSZ staufrei ist, zeigt die FWS auf Früh-Einfädeln, um komfortable, sichere und effiziente Fahrstreifenwechselbedingungen zu gewährleisten. Sind hingegen die Verkehrsbedingungen in der BSZ durch niedrige Geschwindigkeiten (Stau) charakterisiert, so schaltet die FWS auf Einfädeln nach dem Reißverschlussprinzip um. Letzteres ist auf den eingestauten Verkehr besser angepasst, da es die Anzahl und Intensität von Einfädelkonflikten reduziert, wodurch die Verkehrssicherheit und möglicherweise auch der Durchfluss erhöht werden.
- Das primäre Steuerungsziel der ZD-VGB ist die Regelung auf den kritischen Belegungsgrad an der Engstelle mit dem Zweck, den Durchfluss der Engstelle zu maximieren. Bei geringem Verkehrsaufkommen schaltet die ZD-VGB auf einen vorgegebenen Geschwindigkeitswert (z. B. 100 km/h), der der Verkehrssicherheit dient. Bei steigendem Belegungsgrad an der ES-Messung, reduzieren sich (in Stufen von z. B. 10 oder 20 km/h) die angezeigten VGB-Werte unter der Wirkung eines Regelkreises mit dem Ziel, den Belegungsgrad der ES-Messung um seinen kritischen Wert zu betreiben. Diese Steuerwirkung wird durch den VGB-bedingten Zurückhalte- bzw. Drosselungseffekt auf den Verkehrsfluss (Bild 11) ermöglicht. Hierbei hängt die Intensität der Drosselungswirkung von dem zulässigen Mindestwert, den die ZD-VGB anzeigen darf, und natürlich auch von dem Befolungsgrad seitens der Fahrer ab. Der Befolungsgrad, und damit auch die Drosselungsfunktion, mag gegebenenfalls dadurch verstärkt werden, dass zwei (statt einer) ZD-VGB im Abstand von 500 m voneinander vorgesehen werden, die in gleicher Weise schalten. Dadurch wäre freilich auch die Länge der ZDZ entsprechend erweitert. Ist der erlaubte Mindestwert der

ZD-VGB nicht genügend klein, um die ankommende Nachfrage ausreichend einzudämmen, so kann der ES-Belegungsgrad nicht mehr in der Nähe des kritischen Wertes gehalten werden und die BSZ wird eingestaut. Letzteres kann auch durch Rückstau von stromabwärts geschehen, woran das Steuerungssystem nichts entgegenwirken könnte. Ist die BSZ, aus welchem Grund auch immer, eingestaut, so macht die Fortsetzung der Drosselung kaum Sinn und die ZD-VGB könnte auf Trichterfunktion umschalten.

- Wie bereits erwähnt, besteht die Funktion der Trichter-VGB darin, die schrittweise Herabsetzung der Geschwindigkeit der ankommenden Fahrzeuge von gegebenenfalls höheren Geschwindigkeiten stromaufwärts zu den niedrigeren Geschwindigkeiten in der ZDZ zu bewirken. Darüber hinaus bewirkt das Herabsetzen der Trichter-VGB (als Folge der Reduzierung der ZD-VGB) eine zusätzliche temporäre Drosselung des ankommenden Verkehrs, deren Umfang proportional der Länge der GTZ ist.

Die Schaltung der VGB soll stets unter Einhaltung der StVO-Bestimmungen erfolgen. Letztere beinhaltet zwar keine untere zulässige Grenze für die angezeigten VGB-Werte, bei einer Verkehrsbehörde könnten allerdings wohl diesbezügliche Bedenken entstehen. Um die Nützlichkeit niedriger VGB-Werte aufzuzeigen und somit die Abwägung von Vor- und Nachteilen bei der entsprechenden Entscheidungsfindung zu erleichtern, werden im Rahmen des Projektes simulierte Szenarien mit unterschiedlichen Mindestwerten für die ZD-VGB durchgeführt.

Die StVO schreibt vor: „Eine Geschwindigkeitsstufe soll höchstens 40 km/h betragen. Der Mindestabstand in Metern zwischen den unterschiedlichen Höchstgeschwindigkeiten soll das 10-fache der Geschwindigkeitsdifferenz in km/h betragen. Nach Streckenabschnitten ohne Beschränkung soll in der Regel als erste zulässige Höchstgeschwindigkeit 120 km/h angeordnet werden.“ Diese Bestimmungen sollen bei der Installation und Schaltung aller, aber insbesondere der Trichter-VGB, beachtet werden.

4.1.4 Steuerungsziele

Das geschilderte Verkehrssteuerungssystem für Autobahn-Arbeitsstellen soll sich in dreierlei Hin-

sicht positiv auswirken, nämlich auf die Effizienz des Verkehrssystems, auf die Verkehrssicherheit und auf den Fahrerkomfort. Das Ausmaß der Verbesserung hängt von den konkreten Gegebenheiten potenzieller Anwendungen (z. B. Höhe der Nachfrage, Engstellenkapazität), sowie von diversen Randbedingungen (z. B. zulässiger VGB Mindestwert, Befolungsgrad) ab. Die erzielbaren Verbesserungen werden im Rahmen des Projektes unter unterschiedlichen Bedingungen mittels mikroskopischer Simulation untersucht.

Die erwartete Effizienzsteigerung des Verkehrsgeschehens soll zunächst als Resultat des gesteigerten Engstellendurchflusses und der daraus resultierenden räumlich-zeitlichen Reduzierung der Stauausdehnung erzielt werden. Der gesteigerte Engstellendurchfluss wird durch folgende Steuermaßnahmen ermöglicht:

- die mögliche Erhöhung der Engstellen-Kapazität mittels der Kapazität-VGB und FWS,
- die Vermeidung des Kapazitätseinbruchs durch Vorverlagern des (unvermeidbaren) Staus in der ZDZ sowie
- die Regelung auf den kritischen ES-Belegungsgrad mittels der ZD-VGB.

Darüber hinaus ist durch die Erhöhung der Verkehrssicherheit statistisch eine geringere Anzahl von Unfällen zu erwarten, wodurch zusätzliche Einsparungen von Stau und Fahrverzögerungen entstehen können.

Die Verkehrssicherheit soll durch folgende Auswirkungen des Steuerungssystems verbessert werden:

- Reduktion der Unfallwahrscheinlichkeit bei den nötigen Einfädelmanövern durch das verkehrssababhängige Schalten auf Früh-Einfädeln oder Reißverschlussprinzip in der BSZ,
- Reduktion der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Sekundär-Unfällen durch die Wirkung der Trichter-VGB,
- Reduktion der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Sekundär-Unfällen durch die räumlich-zeitliche Reduzierung der Stauausdehnung.

Schließlich soll der Fahrerkomfort mittels folgender Auswirkungen des Steuerungssystems verbessert werden:

- einfacheres Einfädeln in der BSZ,
- einfacheres Auffahren durch die Trichterführung stromaufwärts der Engstelle,
- geringere Verzögerungen, geringerer staubedingter Stress wegen der räumlich-zeitlichen Reduzierung der Stauausdehnung.

4.2 Simulation des Einflusses der Stellgrößen

Bei allen nachfolgenden Untersuchungen dieses Kapitels wurde das im Rahmen des AP 2 anhand realer Verkehrsdaten validierte Simulationsmodell herangezogen.

4.2.1 Simulierte Infrastruktur und Stellglieder

Die in Bild 33 gezeigte Infrastruktur wurde im mikroskopischen Simulator AIMSUN v.8.0 (TSS, 2013) modelliert und entspricht der Grundsituation in Bild 32. Es sei angemerkt, dass sich die gesamte Steueranlage über 2.5 km erstreckt, wie in Bild 34 angedeutet, während die simulierte Autobahnstrecke eine Länge von über 3 km aufweist, um den ganzen sich bildenden Stau umfassen zu können. Die simulierte Autobahninfrastruktur weist zunächst vier (3,75 m breite) Fahrstreifen auf, die sich dann aufgrund einer Arbeitsstelle auf drei Fahrstreifen reduzieren. Die modellierte Strecke beinhaltet, eben-

so wie die reale Infrastruktur, zwei Paare von Ein- und Ausfahrten (Bild 33).

Obwohl sicherlich Arbeitsstellen mit unterschiedlichen Charakteristiken existieren, entspricht die hier zugrunde gelegte Infrastruktur, inklusive der Reduktion von vier auf drei Fahrstreifen, der Autobahnanlage, die die Verkehrsdaten für die Modellvalidierung geliefert hat. Es sollte aber auch betont werden, dass unterschiedliche Arbeitsstellen mit spezifischen geometrischen und Verkehrscharakteristiken mit dem gleichen allgemein anwendbaren Steuerungskonzept und -software behandelt werden können, was prinzipiell zu ähnlichen Eingriffen

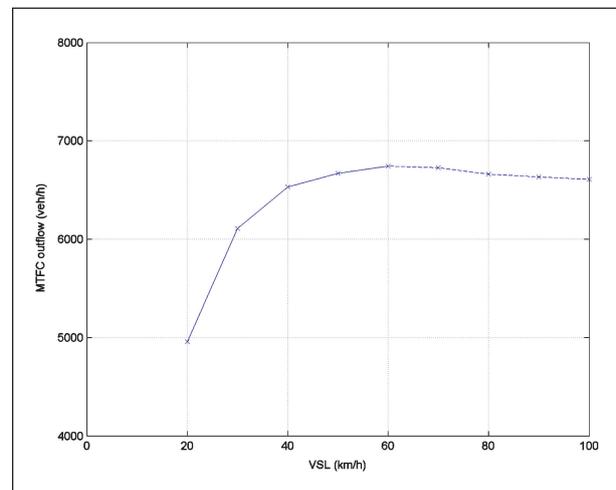


Bild 34: Quantitative Untersuchung der haltbaren Drosselungsfunktion: Verkehrsstärke in Abhängigkeit des ZD-VGB-Wertes

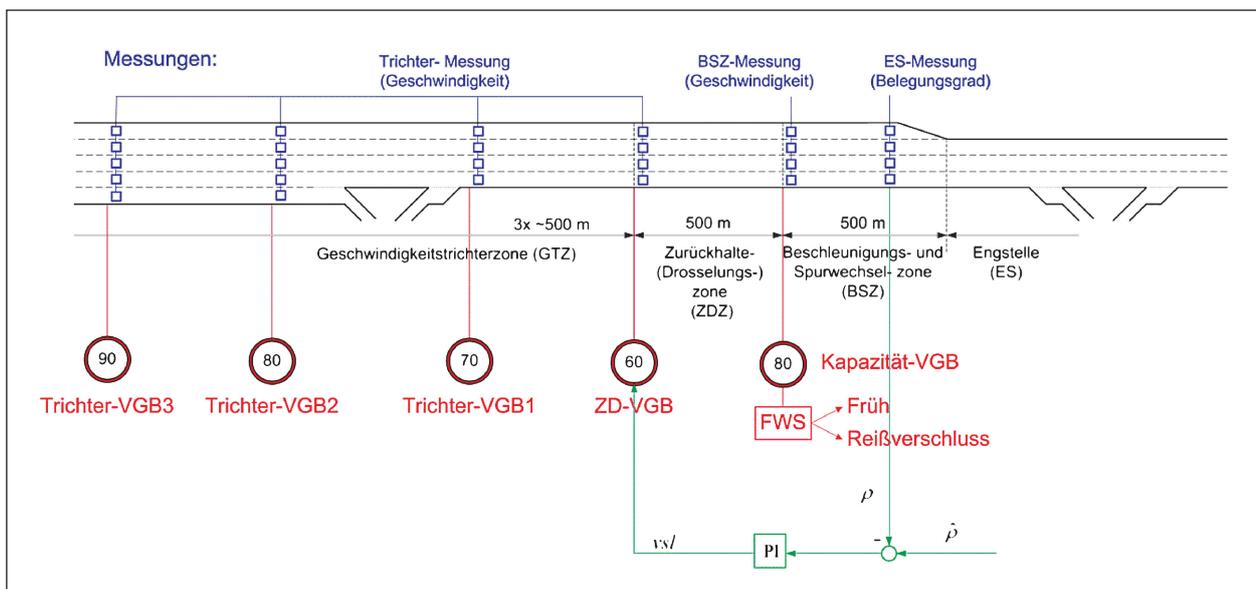


Bild 33: Simulierte Infrastruktur mit Arbeitsstelle und Einzelheiten des Drosselungsregelkreises

und Auswirkungen führen würde. Lediglich das quantitative Ausmaß dieser Auswirkungen mag unter unterschiedlichen Bedingungen von Fall zu Fall variieren.

Wie in Kapitel 3.3 beschrieben, wurde das in AIMSUN vorgegebene Fahrzeugfolge-Modell von GIPPS durch das Intelligent Driver Model (IDM) mittels der MicroSDK-Plattform von AIMSUN ersetzt, da das IDM eine realistischere Nachbildung des Kapazitätseinbruchs im Falle der Staubildung erlaubt. Die im Modell enthaltenen Parameter wurden entsprechend den Modellvalidierungsergebnissen gesetzt, um die realen Verkehrsphänomene (ohne Steuerung) so gut wie möglich nachzubilden. Ebenso wurde eine modifizierte Version des von AIMSUN vorgegebenen Fahrstreifenwechsel-Modells von GIPPS verwendet, die die Einfädelvorgänge in Situationen mit Fahrstreifenreduktion realistischer wiedergibt. Die darin enthaltenen Parameter entsprechen ebenso den bei der Modelleichung ermittelten Werten. Es wurde festgestellt, dass dieses Streifenwechselmodell bei flüssigem Verkehr ein Früh-Einfädel-Verhalten wiedergibt, während bei stauigem Verkehr spontan (ohne weitere Eingriffe) das Einfädeln nach dem Reißverschlussverfahren resultiert.

Die Nachbildung des Einflusses von (variablen oder konstanten) Geschwindigkeitsbeschränkungen erfolgt in AIMSUN wie folgt: Die stochastisch verteilte, erwünschte Fahrgeschwindigkeit jedes einzelnen Fahrzeugs wird je nach der eingestellten Geschwindigkeitsbeschränkung durch eine Höchstgeschwindigkeit gekappt. Um die unterschiedliche Befolgung der Geschwindigkeitsbeschränkung nachbilden zu können, wird vorher für jedes einzelne Fahrzeug eine individuelle Höchstgeschwindigkeit produziert, indem die angezeigte Geschwindigkeitsbeschränkung mit einem Faktor multipliziert wird, der stochastisch innerhalb eines vorgebbaren Intervalls $[a, b]$, mit $a \leq 1$ und $b \geq 1$, generiert wird. Die Modelleichung hat für diese Parameter die Werte $a = 0.9$ und $b = 1.3$ geliefert, die in den nachfolgenden Untersuchungen in diesem Kapitel auch verwendet werden, bis auf die Fälle, die die Auswirkungen einer reduzierten Befolgungsrate untersuchen sollen. In solchen Fällen werden die Werte für Parameter a und b durch einen Befolgungsrate-Faktor $CR \leq 1$ dividiert.

Es sollte auch angemerkt werden, dass sich die Änderung einer Geschwindigkeitsbeschränkung in AIMSUN sofort über die ganze zugehörige Autobahnstrecke stromabwärts der VGB-Anzeige aus-

wirkt, wodurch auch Fahrzeuge in ihrem Verhalten beeinflusst werden, die der neuen VGB-Anzeige nie begegnet sind. Dies ist sicherlich eine Modellvereinfachung, deren Auswirkung allerdings als geringfügig eingeschätzt wird.

4.2.2 Empfindlichkeitsuntersuchungen

Die durchgeführten Empfindlichkeitsuntersuchungen sollen vorab der Ermittlung und Beurteilung des Einflusses der Stellglieder im Rahmen des vorliegenden Steuerungskonzeptes dienen. Es sei allerdings angemerkt, dass die Erkenntnisse, die anhand einer realitätsnahen Simulationsuntersuchung gewonnen werden, bestenfalls qualitativer Natur sind. Selbst die Nutzung eines vorsichtig geeichten Modells kann die quantitativ genaue Nachbildung der realen Sachverhalte nicht voll garantieren. Nichtsdestotrotz ist die simulationstechnische Untersuchung des Steuerungskonzeptes sinnvoll, da sie wertvolle Hinweise auf Auswirkungen unter unterschiedlichen Verkehrs- und Randbedingungen, mögliche Mängel usw. liefert.

Die Länge der BSZ (Bild 33) sollte ausreichend dimensioniert sein, sodass:

- die Fahrzeuge angesichts der Kapazität-VGB von gegebenenfalls niedrigeren Geschwindigkeiten am Ende der ZDZ auf die typischerweise höhere kapazitätsmaximierende Geschwindigkeit beschleunigen können,
- der mit der Fahrstreifenreduktion verbundene Fahrstreifenwechsel sicher und bequem durchgeführt werden können.

Die durchgeführten Untersuchungen weisen darauf hin, dass diese beiden Ziele bei der zugrunde gelegten Länge der BSZ von 500 m, zumindest innerhalb der Simulation, gut erreichbar sind, wie die weiter unten berichteten Simulationsergebnisse auch nachweisen. Insbesondere erreichen die Fahrzeuge bei einer Kapazität-VGB von 80 km/h tatsächlich die Engstelle mit Geschwindigkeiten die, je nach Verkehrsbedingungen, zwischen 70 km/h und 80 km/h betragen.

Eine weitere Frage von Bedeutung in diesem Zusammenhang betrifft den spezifischen Wert der Kapazität-VGB, der die Engstellen-Kapazität maximiert. Eine Beurteilung anhand der realen Verkehrsdaten und des geeichten Simulationsmodells deutet darauf hin, dass der Engstellen-Durchfluss höher ist, wenn die Fahrzeuge die Engstelle mit

einer hohen Geschwindigkeit (100 km/h oder höher) erreichen. Gemäß der StVO darf aber die letzte Geschwindigkeitsbeschränkungsanzeige vor der Engstelle den Wert 80 km/h nicht übersteigen. Daher wird im Weiteren die Kapazität-VGB stets auf diesen Wert gesetzt.

Die Länge der ZDZ (Bild 32) sollte ausreichend dimensioniert sein, sodass die Fahrzeuge angesichts der ZD-VGB von gegebenenfalls höheren Geschwindigkeiten stromaufwärts auf die angezeigte, typischerweise niedrigere Geschwindigkeit verlangsamen können. Dieses Fahrverhalten ist für die Realisierung der Zurückhalte- bzw. Drosselungsfunktion von maßgeblicher Bedeutung. Die durchgeführten Untersuchungen weisen darauf hin, dass dieses Ziel bei der zugrunde gelegten Länge der ZDZ von 500 m erreicht wird.

Darüber hinaus wurde der Einfluss der angezeigten ZD-VGB auf die Stärke der (haltbaren) Zurückhalte- bzw. Drosselungsfunktion untersucht. Hierzu wurde die simulierte Autobahnstrecke an ihrem Haupteingang mit einer hohen konstanten Nachfrage von über 7.000 Fz/h beliefert, während die ZD-VGB in entsprechenden unterschiedlichen Simulationsläufen unterschiedliche konstante VGB-Werte anzeigte. Die jeweils beobachtete maximale Verkehrsstärke am Streckenausgang ermöglicht dann die quantitative Einschätzung der Drosselungsstärke bei unterschiedlichen ZD-VGB-Werten. Bild 34 visualisiert die erhaltenen Ergebnisse. Das Bild zeigt den maximalen Wert der Verkehrsstärke am Streckenausgang (Mittelwert der fünf höchsten beobachteten ein-minutigen Werte) in Abhängigkeit des eingestellten VGB-Wertes. Es sei allerdings angemerkt, dass bei dem strichlierten Teil der abgebildeten Kurve (für VGB > 60 km/h) nicht die Drosselungswirkung, sondern die Kapazität der (3-streifigen) Engstelle stromabwärts der ZD-VGB bei der maximalen beobachteten Verkehrsstärke ausschlaggebend ist. Da nämlich die Engstellen-Kapazität unterhalb von 7.000 Fz/h liegt, während die gedrosselte Verkehrsstärke bei VGB > 60 km/h diesen Wert übersteigt, kommt erstere tatsächlich zum Tragen. Bild 34 bestätigt, dass jede Herabsetzung der angezeigten ZD-VGB tatsächlich die Intensität der (haltbaren) Drosselung steigert, und zwar in einer nicht-linearen Art; sie deutet aber auch darauf hin, dass eine Mindest-VGB von 60 km/h eine haltbare Drosselungswirkung gerade noch ausüben könnte, während niedrigere Mindestwerte für eine wirkungsvolle Steuerung wünschenswert wären.

Ungeachtet dieser quantitativen Simulationsergebnisse sollte dieser Sachverhalt, angesichts seiner Bedeutung für den Erfolg des angestrebten Steuerungskonzepts, weiter diskutiert werden, um Empfehlungen darüber auszuarbeiten, wie diese für die Steuerungseffizienz ausschlaggebende Drosselungswirkung im realen Verkehrsgeschehen am besten realisiert werden könnte (s. Kapitel 4.4.7).

Des Weiteren haben die durchgeführten Untersuchungen gezeigt, dass die Funktion der Trichter-VGB problemlos erzielbar ist und dass diese praktisch keinen Einfluss auf den haltbaren Engstellendurchfluss haben.

Eine weitere bedeutungsvolle Festlegung betrifft die ES-Messung (Bild 32), wobei der entsprechende Sachverhalt ähnlich wie bei gewöhnlichen Anwendungen lokaler Zuflussdosierung mittels eines Alinea-Regelkreises ist. Wie bereits erwähnt, dient der ES-Messquerschnitt hauptsächlich der Regelung des ES-Belegungsgrades auf seinen kritischen Wert, bei dem der ES-Durchfluss maximiert wird. Die erste Frage in diesem Zusammenhang betrifft die Positionierung der ES-Messung. An der Engstelle können bei genügend hohem Verkehrsaufkommen starke Einfädelf konflikte entstehen, die lokal zu erhöhter Verkehrsdichte und nachfolgend zu einem Verkehrszusammenbruch führen. Daher sollte die erhöhte Verkehrsdichte zügig erfasst und durch die Regelungswirkung entschärft werden. Dies setzt einerseits voraus, dass die ES-Messung stromaufwärts der Örtlichkeit positioniert werden sollte, bei der solche Konflikte erwartet werden, da sich die Welle der erhöhten Verkehrsdichte stromaufwärts bewegt; andererseits sollte die Lage der ES-Messung möglichst nahe der Konfliktzone gewählt werden, um Erfassungsverzögerungen klein zu halten.

Beim realen Verkehrsgeschehen konnte in Videoaufnahmen beobachtet werden, dass der erste Verkehrszusammenbruch typischerweise einige Dutzend Meter stromaufwärts der Engstelle auftritt; dies ist in guter Übereinstimmung mit der Simulation, bei der eine Positionierung der ES-Messstelle 100 m stromaufwärts der Engstelle erforderlich ist, um jeden auftretenden Verkehrszusammenbruch erfassen zu können (Bild 33).

Die zweite Frage im Zusammenhang mit dem Drosselungsregelkreis betrifft die Bestimmung eines geeigneten Sollwertes für den Belegungsgrad, der

bekannter Weise dem kritischen Wert entsprechen sollte. Diese Frage soll mittels entsprechender quantitativer Untersuchungen bei den Simulationsuntersuchungen in den nachfolgenden Kapiteln behandelt werden.

4.3 Entwurf der Steuerungsstrategie

4.3.1 Übersicht der Steuerungsstrategie

Das in Kapitel 4.1 präsentierte Steuerungskonzept wird nun genauer spezifiziert. Bild 35 zeigt eine Übersicht aller Signalverbindungen, die in Echtzeit im vorgeschriebenen Zeittakt stattfinden sollen. Die Messquerschnitte liefern die aktuellen Messungen, die (gegebenenfalls nach geeigneter Vorverarbeitung, z. B. Glättung) in den vier Teilen des gesamten Steuerungsalgorithmus genutzt werden, um automatisch Entscheidungen über die Anzeigen der entsprechenden vier Stellglieder für das nächste Steuerungsintervall zu treffen. Ein geeigneter Wert für das Steuerungsintervall, der bei solchen Anlagen üblicherweise verwendet wird, ist eine Minute. Dieser Wert ist einerseits groß genug, um eine mögliche Irritation der Fahrer wegen zu schnellen Umschaltens der Anzeigen zu vermeiden; und andererseits klein genug, um eine zügige Reaktion des Steuerungssystems zu gewährleisten.

Im Folgenden werden die einzelnen Blöcke der Steuerungsstrategie näher erörtert.

4.3.2 Steuerungsalgorithmus für die Kapazität-VGB

Die Grundfunktion der Kapazität-VGB, nämlich die Schaltung auf die vorgeschriebene Geschwindigkeitsbeschränkung (bei schwächerem Verkehrsaufkommen) oder auf den kapazitätsmaximierenden niedrigeren VGB-Wert (bei stärkerem Verkehrsaufkommen), wird anhand der ES-Messung (Belegungsgrad) mittels eines einfachen Schwellwertalgorithmus mit Hysterese gewährleistet. Die Hysterese soll das unnötig häufige Umschalten zwischen den zwei Werten unterdrücken³. Die Wahl der entsprechenden Schwellwerte erscheint im Allgemeinen nicht kritisch. Wie bereits erwähnt, hat sich aber im hier betrachteten Fall erwiesen, dass der kapazitätsmaximierende VGB-Wert höher ist, als die vorgeschriebene Geschwindigkeitsbeschränkung; daher schaltet die Steuerungsstrategie stets auf letztere, nämlich auf 80 km/h.

Deutet die BSZ-Messung (Geschwindigkeit) anhand einer ähnlichen schwellwertbasierten Entscheidungsfindung darauf hin, dass in der BSZ Stau vorherrscht, so kann der Algorithmus auf eine Folgefunktion umschalten (siehe Kapitel 4.1). Die

³ Alle nachfolgend erwähnten schwellwertbasierten Algorithmen sind auch hysteresebehaftet, auch wenn dies zur Einfachheit nicht explizit erwähnt wird.

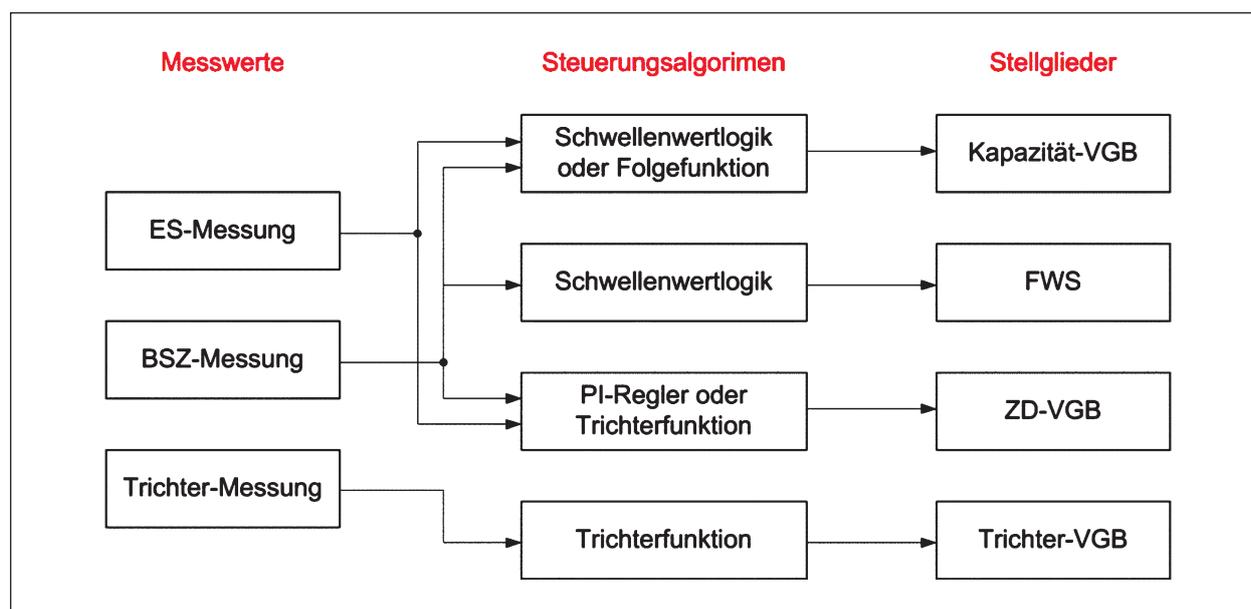


Bild 35: Übersicht der gesamten Steuerungsstrategie

gleiche Entscheidung (Stau in BSZ oder nicht) wird auch in den nächsten zwei Teilalgorithmen benötigt und soll im Weiteren als BSZ-Entscheidung bezeichnet werden.

4.3.3 Steuerungsalgorithmus für die FWS

Die Schaltung der FWS erfolgt anhand der BSZ-Entscheidung auf Früh-Einfädeln (wenn die BSZ nicht eingestaut ist) bzw. auf Einfädeln nach dem Reißverschlussprinzip (wenn die BSZ eingestaut ist).

4.3.4 Steuerungsalgorithmus für ZD-VGB

Die Grundfunktion der ZD-VGB (und in der Tat Kernfunktion des gesamten Steuerungssystems) ist die Regelung auf den kritischen Wert des ES-Belegungsgrades. Hierzu wird die ES-Messung innerhalb eines PI-Reglers verwendet, der einen provisorischen (reellen) Wert für die ZD-VGB liefert. Dieser Drosselungsregelkreis ist in Bild 33 illustriert. Hierbei bedeuten $\rho(k)$ die Verkehrsdichte (oder Belegungsgrad) zum Zeitintervall k und $\hat{\rho}$ den entsprechenden Sollwert, dem maximaler Durchfluss erreicht wird. Die entsprechende Regeldifferenz wird im Rahmen des PI-Reglers wie folgt verarbeitet:

$$vsl(k) = vsl(k-1) + K_I(\hat{\rho} - \rho(k)) + K_P(\rho(k-1) - \rho(k))$$

wobei $vsl(k)$ [km/h] der Reglerausgang, d. h. der (provisorische) VGB-Wert für das nächste Intervall ist, während K_I bzw. K_P (beide in [km²/(veh*h)]) die Reglerparameter für den integralen bzw. proportionalen Regleranteil sind. Die Reglerparameter können manuell (durch trial-and-error) festgelegt werden. Im vorliegenden Fall wurden die Reglerparameter $K_P = 1$ [km²/(veh*h)] und $K_I = 1.5$ [km²/(veh*h)] festgelegt. Ist ein geeigneter Wertebereich gefunden, so ist die Empfindlichkeit der Regelungsergebnisse bei moderater Veränderung der Reglerparameter typischerweise gering. Eine systematische Auffindung geeigneter Parameterwerte kann nach verschiedenen praktischen Entwurfsvorgehensweisen der Regelungstechnik vorgenommen werden. Eine in (ELLIS, 2004) angeregte Vorgehensweise sieht vor, dass in einer Simulationsumgebung die Schrittantwort des Regelkreises in zwei Phasen untersucht wird, um geeignete Parameterwerte festzulegen:

1. Phase: K_I wird gleich null gesetzt und K_P , von einem kleinen Wert anfangend, schrittweise erhöht, bis Überschwinger auftreten.

2. Mit dem gefundenem Wert von K_P , wird nun K_I schrittweise erhöht, bis Überschwinger auftreten.

Der Reglerausgang $vsl(k)$ wird anschließend gekappt, falls er außerhalb des zulässigen Bereichs $[vsl_{\min}, vsl_{\max}]$ liegt. Die gekappten Werte werden im nächsten Zeitintervall als $k-1$ -Werte im Regelkreis verwendet, um den bekannten windup-Effekt von PI-Reglern zu umgehen.

Der provisorische Wert wird dann wie folgt weiterverarbeitet:

- Die reellwertige VGB wird auf den nächsten, zulässigen, diskreten VGB-Wert gerundet.
- Der resultierende diskrete VGB-Wert wird gegebenenfalls weiter verändert, falls er vorgeschriebene zulässige Grenzen der zeitlichen und örtlichen VGB-Differentiale verletzt. Das zeitliche Differential ist die Änderung der eigenen VGB von einem Zeitintervall auf das nächste. Das örtliche Differential (Geschwindigkeitsstufe) ist die Differenz der eigenen VGB von der stromabwärts, unmittelbar nächsten VGB (hier der Kapazität-VGB).

Fällt allerdings die BSZ-Entscheidung auf Stau in BSZ, so kann die Regelungsfunktion nicht aufrechterhalten werden und die ZD-VGB könnte auf Trichterfunktion umschalten, die nachfolgend genauer festgelegt wird.

4.3.5 Steuerungsalgorithmus für Trichter-VGB

Es ist die Aufgabe der Trichter-VGB, Fahrzeuge, die mit hoher Geschwindigkeit von stromaufwärts ankommen, zu führen, sodass sie stufenweise ihre Geschwindigkeit an die vorherrschenden Bedingungen nahe der Engstelle anpassen. Hierbei müssen freilich bestimmte Beschränkungen berücksichtigt werden. Die Abhandlung der Trichter-VGB erfolgt sequentiell, angefangen von der ersten stromabwärts liegenden Anlage. Folgende Berechnungen sind für jede Anlage erforderlich:

- Im Prinzip sollte die Trichter-VGB einen VGB-Wert anzeigen, der um ΔVGB höher ist, als der VGB-Wert der nächsten stromabwärts liegenden VGB-Anlage. Hierbei ist ΔVGB ein vorgeschriebener Stufenwert (z. B. 10 km/h), der je nach Situation vorab festgelegt wird.

- Ist aber dieser Wert höher als die aktuelle mittlere Geschwindigkeit der Fahrzeuge (die aus der zugehörigen Trichter-Messung bekannt ist), so wird ein VGB-Wert knapp über die mittlere Geschwindigkeit festgelegt.
- Übersteigt die zeitliche Veränderung (vom letzten Steuerungsintervall) eine vorab vorgeschriebene Grenze (z. B. 10 km/h), so wird der VGB-Wert entsprechend angepasst.
- Die implementierte Geschwindigkeitsstufe darf unter keinen Umständen den von der StVO vorgeschriebenen Wert von 40 km/h übersteigen.
- Der anzuzeigende VGB-Wert darf einen vorab vorgeschriebenen Höchstwert nicht überschreiten.
- Die stromaufwärts erste Trichter-VGB soll gemäß StVO nicht weniger als 120 km/h anzeigen, sofern weiter stromaufwärts keine Höchstgeschwindigkeit angezeigt wird.

4.3.6 Softwareentwicklung

Die Implementierung der Steuerungsstrategie erfolgt mittels des AIMSUN API, das die Simulation eines echtzeitgesteuerten Prozesses ermöglicht (siehe Kapitel 3.2). Hierzu liefert der Simulator zu jedem Steuerungsintervall emulierte aktuelle Messwerte, aufgrund derer die Steuerungsstrategie die Anzeigen aller Stellglieder berechnet und an den Simulator zur Anwendung während des nächsten Steuerungsintervalls zurückreicht.

4.4 Simulationstechnische Überprüfung

Die entwickelte Steuerungsstrategie soll anhand diverser Szenarien bezüglich ihrer Eignung und Effizienz untersucht und mit dem Fall ohne Steuerung verglichen werden. Ebenso sollen gezielte Empfindlichkeitsuntersuchungen besser gesicherte Erkenntnisse über Relevanz und Einfluss einzelner Festlegungen, Randbedingungen und Parameterwerte liefern.

4.4.1 Simuliertes Verkehrsszenario

Die Simulationsdauer beträgt 3 Stunden und der Simulationsschritt 0.2 s. Bild 36 zeigt die zeitliche Entwicklung der echten gemessenen Nachfrage am

Eingang der simulierten Autobahnstrecke, die auch für das Simulationsmodell als Eingabe dient. Diese Nachfrage beinhaltet auch einen (emulierten) Lkw-Anteil, der dem realen Lkw-Anteil an der simulierten Autobahnstrecke entspricht. Es sei angemerkt, dass die in Bild 36 abgebildete Haupteingang-Nachfrage wegen der dazwischenliegenden seitlichen Aus- und Einfahrt (Bild 33) nicht exakt der Engstellen-Nachfrage entspricht. Letztere ist wegen des auftretenden Rückstaus in der realen Autobahnstrecke nicht exakt ermittelbar. Die vierstreifige Fahrbahnkapazität stromaufwärts der Engstelle ist ausreichend, um diese Nachfrage problemlos aufzunehmen. Die Nachfrage weist anfänglich Werte von etwa 4.000 Fz/h auf. In den ersten 40 Minuten steigt die Nachfrage graduell bis zum Höchstwert von 8.000 Fz/h und fällt dann wieder graduell auf Werte um 6.000 Fz/h ab, was in etwa der Kapazität der Engstelle entspricht. Während der Zeitspanne [30 min, 120 min] weist die Nachfrage meist Werte auf, die der Kapazität der Engstelle entsprechen oder diese (zum Teil deutlich) übersteigen, was erwartungsgemäß zu Stau vor der Engstelle führen wird. In der letzten Simulationsstunde beträgt die Nachfrage ca. 5.000 Fz/h und liegt damit definitiv unterhalb der Engstellenkapazität. Dieses Nachfrageszenario ermöglicht die Überprüfung der Funktionsweise der Steuerungsstrategie unter unterschiedlichen Verkehrsbedingungen, sowie den Vergleich mit dem Fall ohne Steuerung unter den gleichen Anfangs- und Endbedingungen (siehe Bild 36).

Im Fall ohne Steuerung zeigen die ersten zwei stromaufwärts liegenden VGB stets auf 120 km/h, während die nächsten zwei VGB stets 100 km/h und die Kapazität-VGB stets 80 km/h anzeigen.

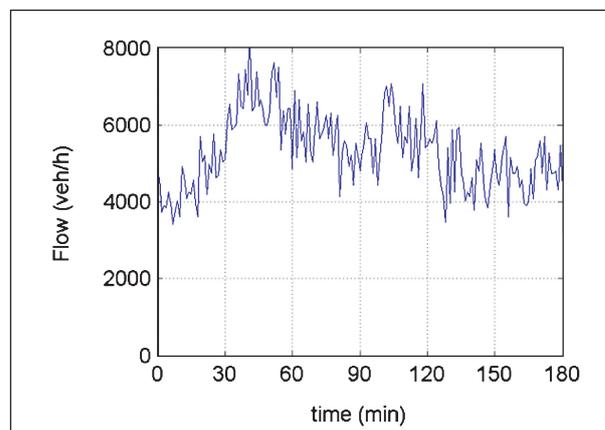


Bild 36: Echte gemessene Nachfrage am Streckeneingang

Im Fall mit Steuerung erhalten alle Stellglieder ihre Anzeigen anhand der Entscheidungen der Steuerungsstrategie in Echtzeit. Zu jedem Steuerintervall von einer Minute liefern die emulierten Messquerschnitte die aktuellen Messungen, die von dem einprogrammierten Steuerungsalgorithmus genutzt werden, um automatisch Entscheidungen über die Anzeigen aller Stellglieder für das nächste Steuerungsintervall zu treffen (Bild 21).

Die drei Trichter-VGB werden in der Simulation gemäß dem Steuerungskonzept betrieben. Das Steuerungskonzept beinhaltet allerdings diverse Optionen, die nach Wunsch aktiviert werden können. In diesem Sinn, wurde bei der Simulationsuntersuchung die Anpassung der Trichter-VGB an die vorherrschende mittlere Geschwindigkeit aktiviert, die im Fall eines Staus einer Art von Stauwarnung entspricht. Andererseits wurde auf die stetige Schaltung der Trichter-VGB auf 120 km/h verzichtet, um die eigentliche Trichterfunktion besser zu testen und vorzuzeigen. Es sei angemerkt, dass diese Festlegungen auf die Effizienz der Steuerung keinen Einfluss haben.

Wie bereits erwähnt, lässt sich die Kapazität der Engstelle mittels niedrigerer Kapazität-VGB-Werte als die ohnehin vorgeschriebenen 80 km/h nicht weiter steigern. Daher zeigt die Kapazität-VGB auch im gesteuerten Fall stets diesen Wert an.

Somit gilt das Interesse bei dieser Simulationsstudie primär der Überprüfung der Drosselfunktion mittels der ZD-VGB, die bei ausreichender Nachfrage im Rahmen eines Regelkreises den kritischen Wert des Belegungsgrades kurz vor der Engstelle aufrechterhalten soll. Hierbei hat sich bei AIMSUN, wie auch in diversen früheren Projektstudien, gezeigt, dass der Belegungsgrad bei Einfädelfunktionen unrealistisch abrupt und stark steigt, was die Funktion des Regelkreises unnötigerweise beeinträchtigt. Dieses Problem wird typischerweise dadurch umgangen, dass die Verkehrsdichte anstelle des Belegungsgrades als Regelgröße zugrunde gelegt wird. Hierzu wurde im vorliegenden Fall eine 200 m lange Strecke definiert, die sich von 100 m bis 300 m stromaufwärts der Engstelle ausstreckt. Die Verkehrsdichte (in Fz/km/Streifen) dieser Strecke dient nun als die Regelgröße des Drosselungsregelkreises für die Simulationsstudie mit Steuerung.

Die Bestimmung der Reglerparameter für den PI-Regler des Drosselungsregelkreises wurde mit-

tels manueller Eichung erreicht. Die benutzten Parameterwerte scheinen auch bei diversen getesteten moderaten Modifikationen ihre Wirksamkeit voll zu bewahren.

Die in Kapitel 4.3 präsentierte Steuerungsstrategie sieht als Möglichkeit vor, dass die Kapazität-VGB bzw. ZD-VGB bei eingestauter BSZ auf Folgefunktion bzw. Trichterfunktion umschalten könnten. Im realen Verkehr soll diese Umschaltung (wenn sie überhaupt tatsächlich erwünscht ist) keine direkte Wirkung auf das Verkehrsgeschehen haben; sie soll lediglich vermeiden, dass den Fahrern, die im Stau fahren müssen, durch die weit höhere angezeigte VGB Zweifel an der Pertinenz der dahinterstehenden Steuerungsstrategie entstehen. Bei den Simulationsuntersuchungen mit AIMSUN hat sich aber gezeigt, dass diese Umschaltung den Durchfluss im Stau herabsetzt und somit die Effizienz der Steuerungsstrategie verzerrt. Daher wurde diese Möglichkeit durch geeignete Parametrierung der entsprechenden Schwellwertalgorithmen ausgeschaltet.

AIMSUN ist ein stochastischer Simulator, der diverse Simulationsparameter mit zufälligen Werten (auf Grundlage geeigneter Verteilungen) besetzt. Daher liefern Simulationsläufe mit unterschiedlichen Anfangswerten des beinhalteten Zufallsgenerators unterschiedliche Simulationsergebnisse. Aus diesem Grund ist es bei Evaluierungsstudien üblich, mehrere Simulationsläufe (Replikationen) mit unterschiedlichen Zufalls-Anfangswerten vorzunehmen, um die Zuverlässigkeit der erhaltenen Ergebnisse zu steigern und zu statistisch sinnvollen Schlussfolgerungen zu gelangen. Im vorliegenden Fall werden für jedes untersuchte Szenario 10 Replikationen durchgeführt, von denen die erste dem ursprünglichen Fall der Modelleichung entspricht.

Wie bereits erwähnt, sind die Erkenntnisse, die anhand einer realitätsnahen Simulationsuntersuchung gewonnen werden, qualitativer Natur, da selbst die Nutzung eines vorsichtig geeichten Modells, die quantitativ genaue Nachbildung der realen Sachverhalte nicht voll garantieren kann. Aus diesem Grund könnten die quantitativen Ergebnisse bei einem möglichen praktischen Einsatz der Steuerungsstrategie im Vergleich mit den Simulationsergebnissen mehr oder weniger unterschiedlich ausfallen. Die Grundfunktionen und positiven Auswirkungen der Steuerungsstrategie werden aber auch im praktischen Einsatz (möglicherweise nach kleinen Veränderungen gewisser Steuerparameter)

erwartungsgemäß beibehalten. Dies kann nicht zuletzt wegen der bekannten Robustheit von Regelkreisen und reaktiven Steuerungsstrategien erwartet werden.

4.4.2 Ergebnisse ohne Steuerung

Im Fall ohne Steuerung fahren die Fahrzeuge problemlos über die simulierte Autobahnstrecke, solan-

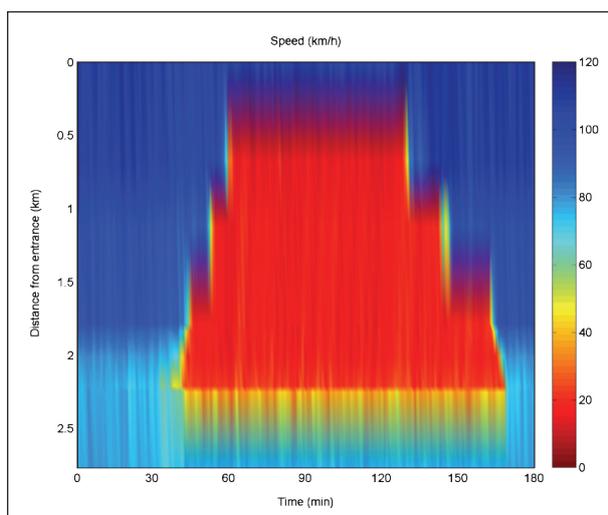


Bild 37: Örtlich-zeitliche Entwicklung der mittleren Geschwindigkeit ohne Steuerung (Replikation ID 378)

ge die Nachfrage unterhalb der Kapazität der Engstelle liegt. Wenn aber die Kapazität überschritten wird, werden nach der 42. Minute scharfe Fahrzeugkonflikte kurz vor der Engstelle beobachtet, die zu starken Abbremsmanövern, einem Geschwindigkeitszusammenbruch und Stau in der BSZ führen. In Anbetracht der starken Nachfrage (Bild 36) breitet sich der gebildete Stau schnell stromaufwärts aus, wie Bild 37 entnommen werden kann, und reicht fast bis zum Haupteingang der Autobahnstrecke. Bild 38 zeigt die zeitliche Entwicklung der resultierenden Verkehrsstärke, der mittleren Geschwindigkeit, des Belegungsgrades und der Verkehrsdichte kurz vor der Engstelle (an der ES-Messung), sowie das entsprechende Fundamentaldiagramm für die Replikation ID 378. Auch hier ist zu sehen, dass in den ersten 40 Minuten der Belegungsgrad unterkritisch bleibt, während der Durchfluss entsprechend der ankommenden Nachfrage steigt und sogar den Wert von 6.000 Fz/h kurz übersteigt. Kurz danach ist aber ein steiler Anstieg des Belegungsgrades (Stau) zu sehen, der zum Zusammenbruch der Geschwindigkeit bei Werten nahe 25 km/h führt. Infolgedessen fällt nun auch der Durchfluss auf Werte um 5.000 Fz/h (Kapazitätseinbruch), was auf die staubedingten Abbrems- und Beschleunigungsmanöver der Fahrzeuge zurück-

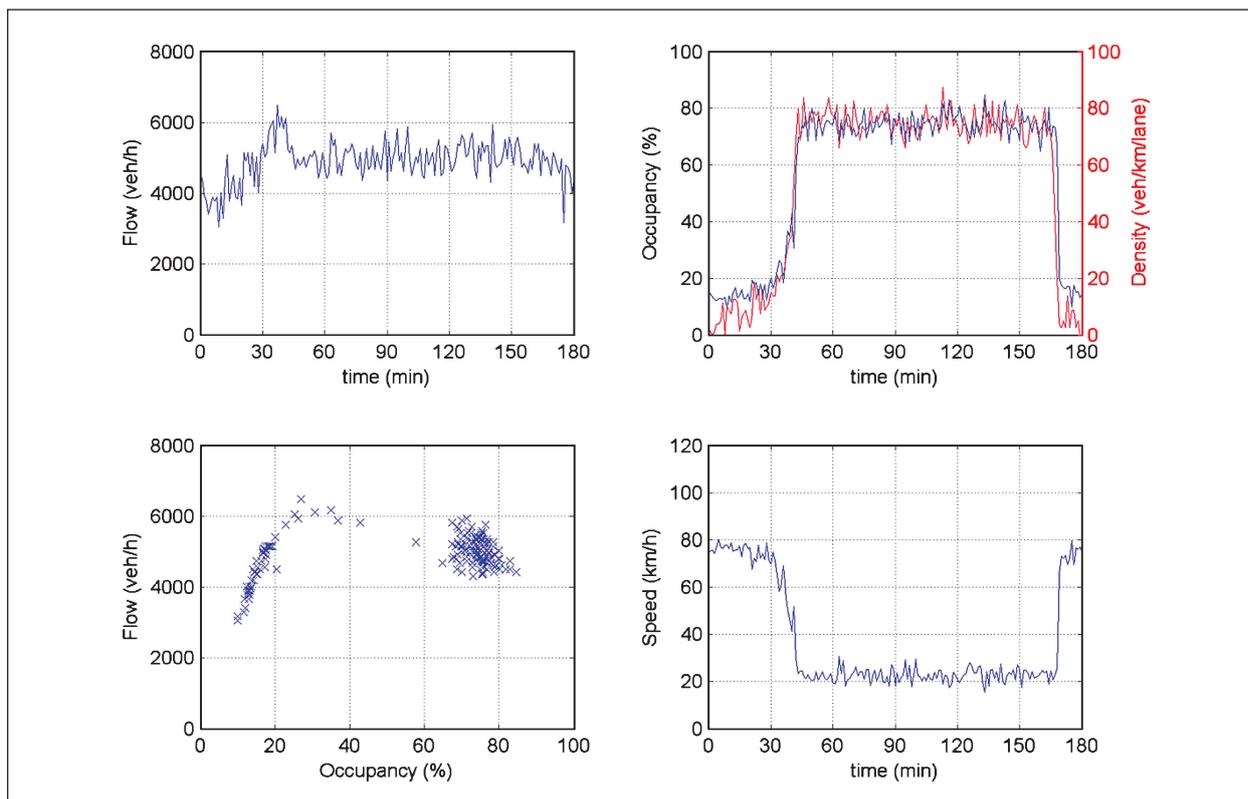


Bild 38: Zeitliche Entwicklung des Verkehrszustandes kurz vor der Engstelle ohne Steuerung (Replikation ID 378)

Replikation ID	AVD (s/Fz/km)	AD (Fz/km)	AHS (km/h)	TDT (km)	TTT (h)	Stops (#/Fz/km)
378	53.8	32.4	39.6	54.922	1.485	0.124
477	50.6	31.4	41.0	55.266	1.439	0.129
478	50.4	31.3	41.1	55.275	1.433	0.133
479	44.1	29.3	44.3	56.038	1.343	0.113
480	57.0	33.4	38.2	54.641	1.532	0.131
481	56.6	33.3	38.4	54.906	1.529	0.132
482	49.6	31.3	41.5	55.981	1.438	0.118
483	60.6	34.9	36.8	54.612	1.594	0.134
484	51.7	31.5	40.5	54.851	1.447	0.130
485	53.4	32.3	39.8	55.075	1.480	0.126
Mittelwert	52.8	32.1	40.1	55.157	1.472	0.127
Standardabweichung	4.6	1.5	2.1	501.3	69.2	0.007

Tab. 12: Gütekriterien für 10 Replikationen ohne Steuerung

zuführen ist. Der Stau dauert bis zur 170. Minute an, wo er wegen der geringeren Nachfrage aufgelöst wird. Die vom Simulator gelieferten globalen Effizienzkriterien betragen im Fall ohne Steuerung: Average Vehicle Delay (AVD) (in s/Fz/km) 53.8, Average Density (AD) (in Fz/km) 32.4 und Average Harmonic Speed (AHS) (in km/h) 39.6.

Tabelle 12 präsentiert die einzelnen Werte diverser Gütekriterien für alle 10 Replikationen ohne Steuerung, sowie die entsprechenden Mittelwerte und Standardabweichungen. Es ist ersichtlich, dass sich trotz unterschiedlicher Kriterienwerte die grundlegende Verkehrssituation von Replikation zu Replikation ähnlich gestaltet.

4.4.3 Ergebnisse mit Steuerung

Mithilfe des erhaltenen Fundamentaldiagramms ohne Steuerung wurde, nach grober Eichung, der Wert der kritischen Verkehrsdichte für den PI-Regler auf 20 Fz/km/Streifen gesetzt. Der zulässige Mindestwert für alle VGB wurde zunächst auf 20 km/h gesetzt, um der Steuerungsstrategie einen weiten Handlungsspielraum zu gewähren. Die diversen Geschwindigkeitsstufen wurden alle auf 10 km/h gesetzt.

Bild 39 zeigt die örtlich-zeitliche Entwicklung der mittleren Geschwindigkeit, nunmehr mit Steuerung fuer die gleiche Replikation ID 378. Da die ankommende Nachfrage die Kapazität der Engstelle zeitweise übersteigt, ist die entsprechend kurzfristige

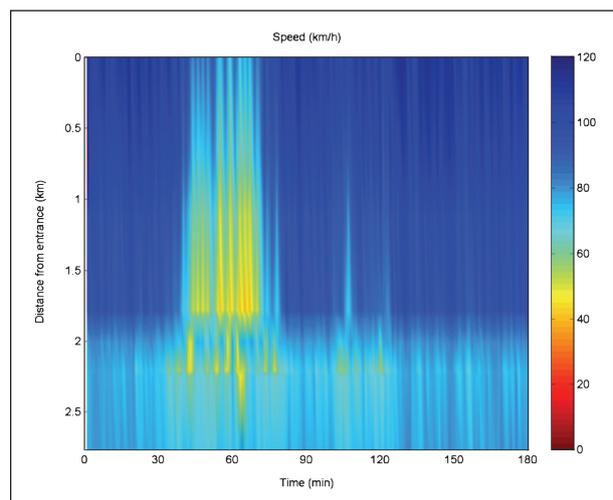


Bild 39: Örtlich-zeitliche Entwicklung der mittleren Geschwindigkeit mit Steuerung (Replikation ID 378)

Staubildung auch hier unvermeidbar und reicht durch die Wirkung der Trichter-VGB ca. 1 km zurück. Eine Betrachtung des Bildes 39 zeigt aber, dass sich dieser Stau als Resultat der Drosselfunktion mittels der ZD-VGB hauptsächlich in der ZDZ bildet, während die BSZ meist staufrei bleibt. Dadurch wird der Kapazitätseinbruch vermieden und eine deutliche Steigerung des Durchflusses an der Engstelle (verglichen mit dem Fall ohne Steuerung) erzielt. Der höhere Durchfluss führt rasch zur Entschärfung der Verkehrssituation und zur Auflösung des Staus bereits in der 70. Minute.

Bild 40 bis Bild 45 zeigen die zeitliche Entwicklung aller Mess- und Stellwerte und erlauben somit eine

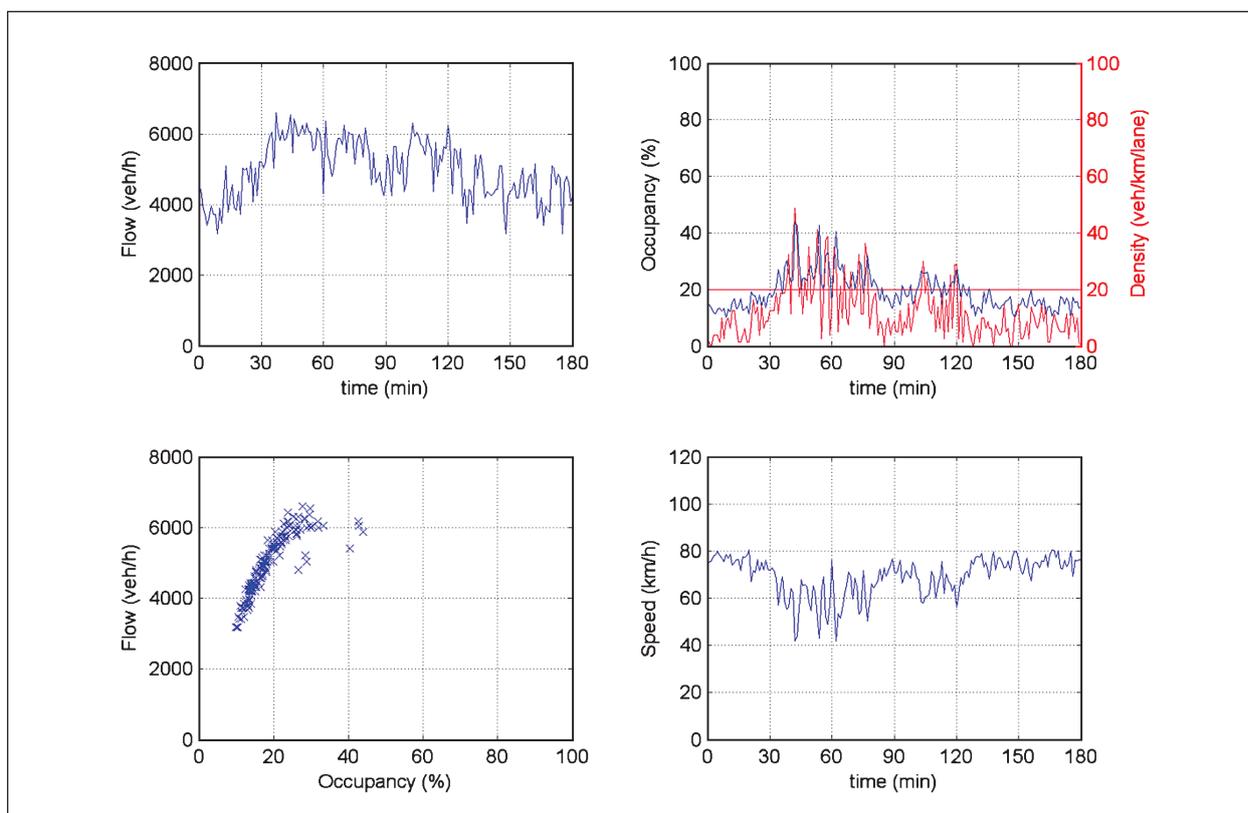


Bild 40: Zeitliche Entwicklung des Verkehrszustandes kurz vor der Engstelle mit Steuerung (Replikation ID 378)

genauere Einschätzung und Interpretation der Steuerungsergebnisse und -auswirkungen. Bei der anfänglich niedrigen Nachfrage zeigt die ZD-VGB zunächst den maximal zulässigen Wert 100 km/h an. Mit steigender Nachfrage steigt die Verkehrsdichte ebenso bis an Werte nahe des kritischen Wertes (Sollwert), was den Drosselungsregler veranlasst einzugreifen. Die entsprechende Reaktion mittels der ZD-VGB, die durch ausreichend niedrige VGB-Werte (Bild 42) die Verkehrsdichte nahe des Sollwertes von 20 Fz/km/Streifen hält etabliert durch Vermeidung des Kapazitätseinbruchs einen hohen Durchfluss an der Engstelle (um die 6.000 Fz/h Marke in Bild 40), solange die Nachfrage hierzu ausreichend ist. Natürlich verursacht das Herabsetzen der ZD-VGB zeitweise einen (leichteren als im Fall ohne Steuerung) Stau in der ZDZ, der sich stromaufwärts fortpflanzt und die Trichter-VGB nacheinander aktiviert. Letztere erfüllen ihre Aufgabe wie vorgeschrieben. Es sei angemerkt, dass in diesem Szenario der zulässige Mindestwert der ZD-VGB zu keinem Zeitpunkt benötigt wird, wie Bild 42 zeigt.

Die vom Simulator gelieferten globalen Effizienzkriterien betragen im Fall mit Steuerung (Replikation ID 378): Average Vehicle Delay (AVD) (in s/Fz/km)

8.3, d. h. Reduktion um 84.6 % verglichen mit dem Fall ohne Steuerung; Average Density AD (in Fz/km) 15.2, d. h. Reduktion um 53.1 % verglichen mit dem Fall ohne Steuerung; und Average Harmonic Speed (AHS) (in km/h) 79.23, d. h. Erhöhung um 100.3 % verglichen mit dem Fall ohne Steuerung. Natürlich hängen diese Verbesserungswerte im Allgemeinen von dem jeweils zugrunde gelegten Nachfrageszenario ab.

Tabelle 13 präsentiert die einzelnen Werte diverser Gütekriterien für alle 10 Replikationen mit Steuerung, während Tabelle 14 die entsprechenden mittleren Verbesserungen im Vergleich zu dem Fall ohne Steuerung wiedergibt. Der Index TDT (Total Distance Traveled) ist verständlicherweise praktisch unverändert (da alle Fahrzeuge in beiden Fällen die Autobahnstrecke voll durchfahren), während sich alle anderen Gütekriterien stark verbessern. Es sei angemerkt, dass alle Gütekriterien und entsprechenden Verbesserungen auch getrennt für Pkw und Lkw berechnet wurden. Da aber die Verbesserungen per Fahrzeugklasse sehr ähnlich wie für die Gesamtwerte ausfielen, wird hier auf die entsprechende detaillierte Ergebnisaufstellung verzichtet.

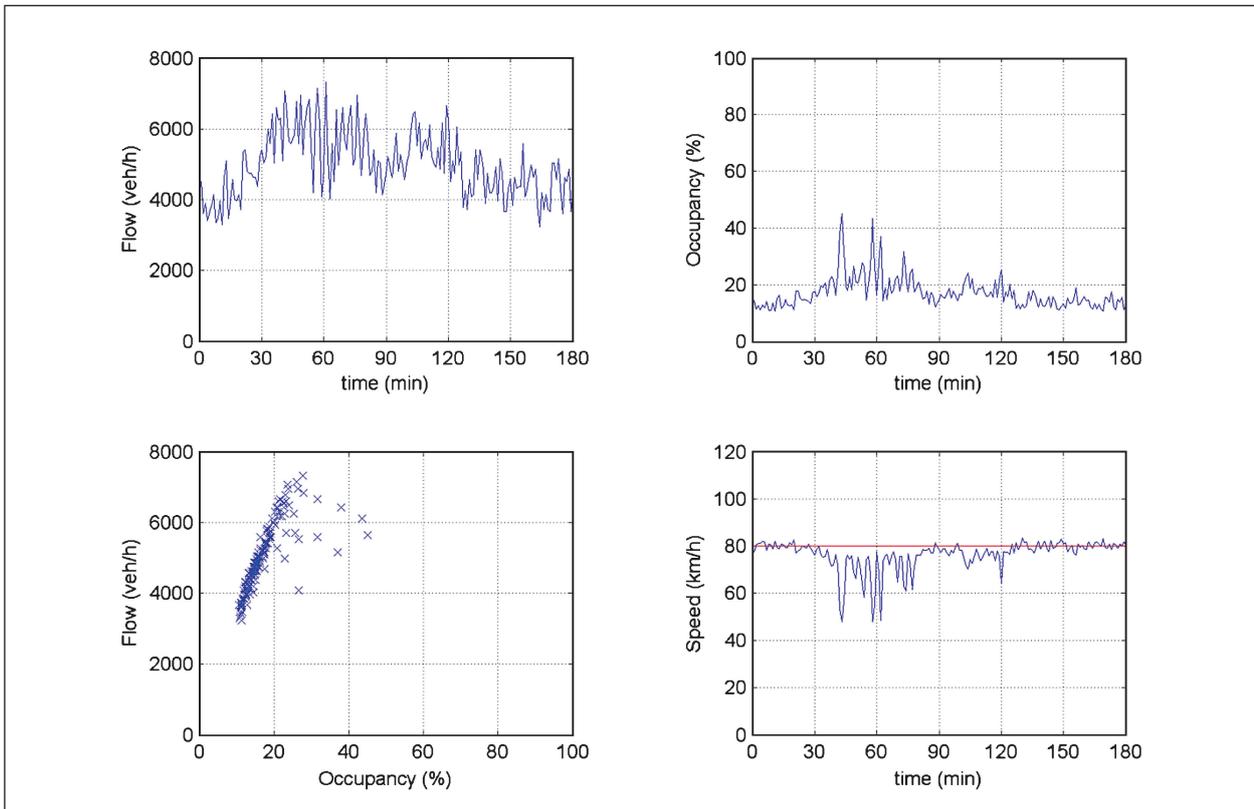


Bild 41: Zeitliche Entwicklung des Verkehrszustandes an der BSZ-Messung und der Kapazität-VGB (rot) mit Steuerung (Replikation ID 378)

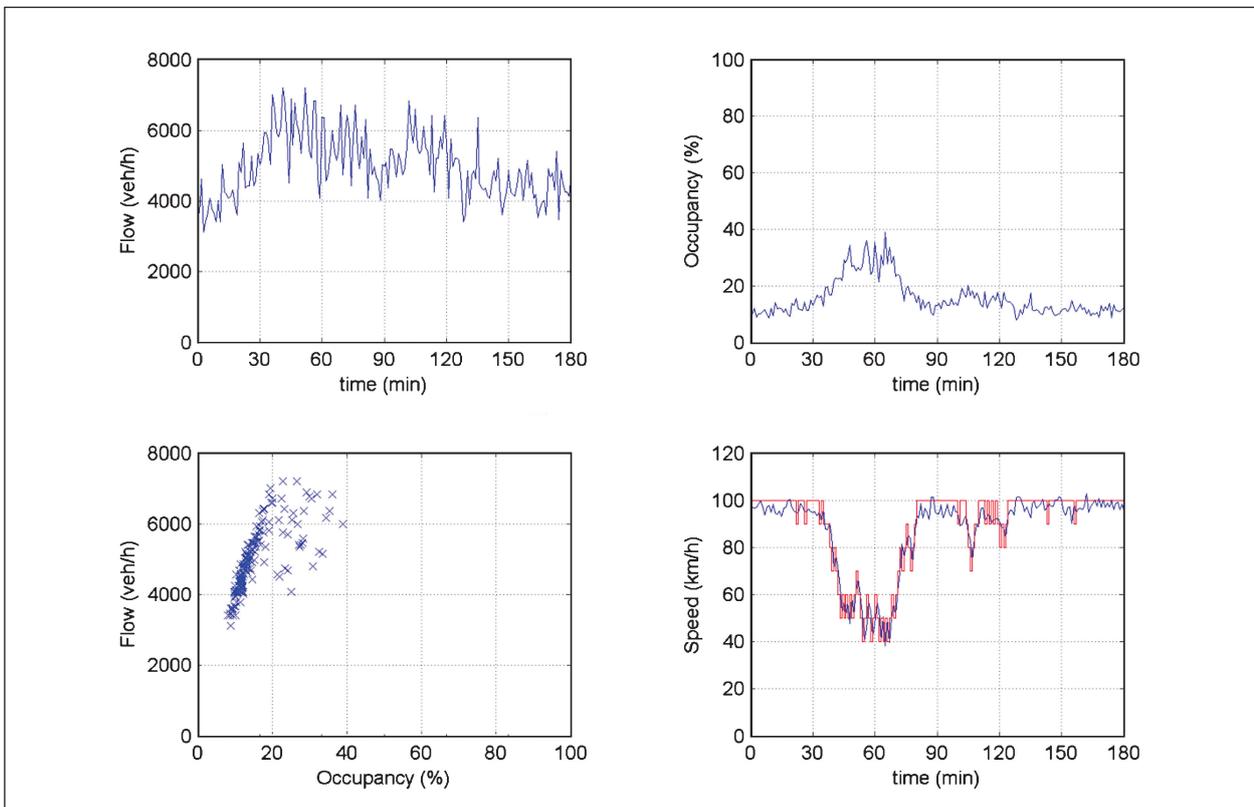


Bild 42: Zeitliche Entwicklung der ZD-VGB (rot) und des entsprechenden Verkehrszustands mit Steuerung (Replikation ID 378)

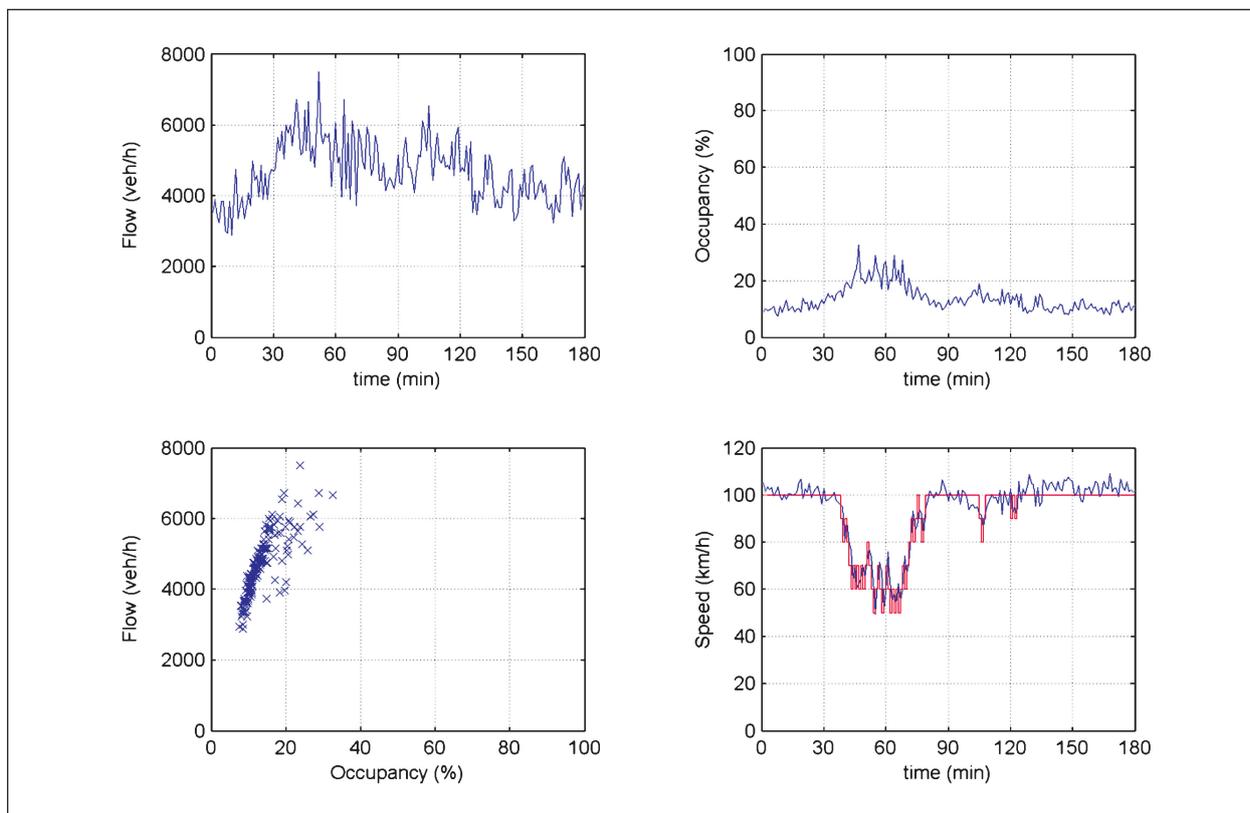


Bild 43: Zeitliche Entwicklung der Trichter-VGB 1 (rot) und des entsprechenden Verkehrszustands mit Steuerung (Replikation ID 378)

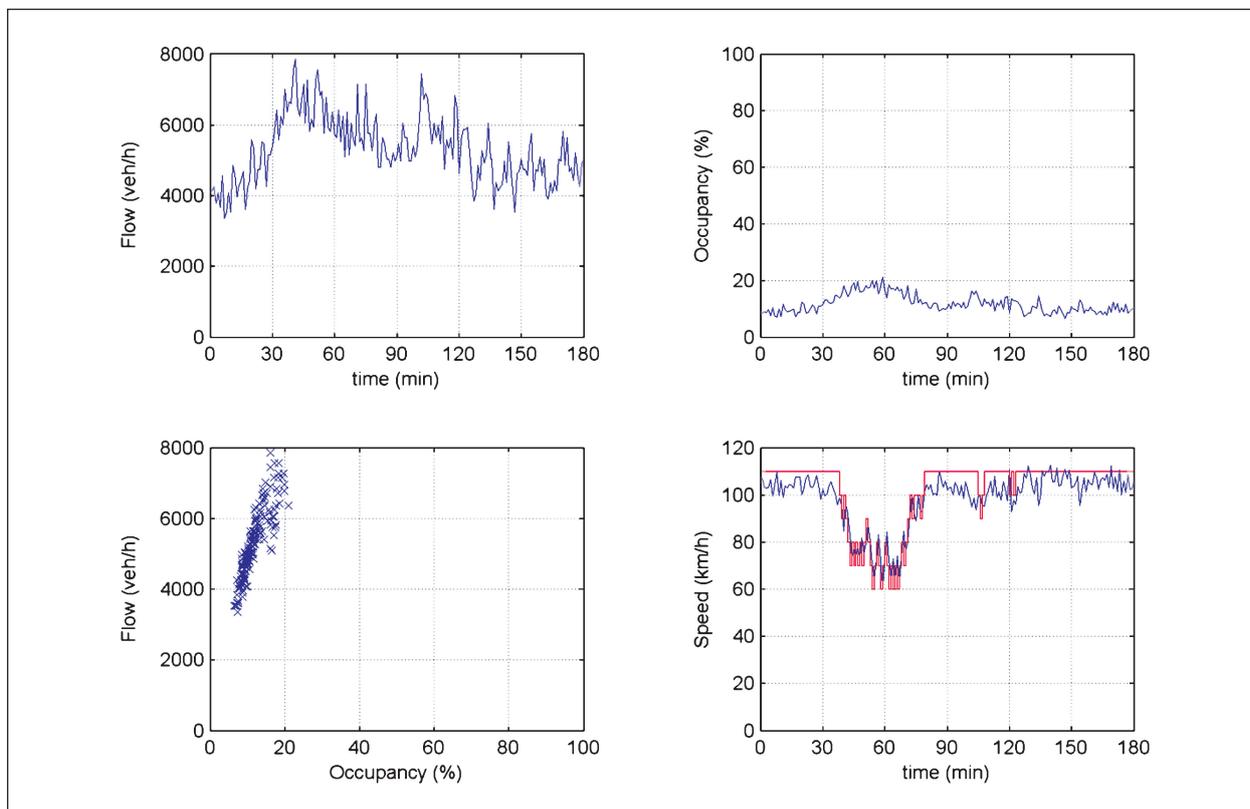


Bild 44: Zeitliche Entwicklung der Trichter-VGB 2 (rot) und des entsprechenden Verkehrszustands mit Steuerung (Replikation ID 378)

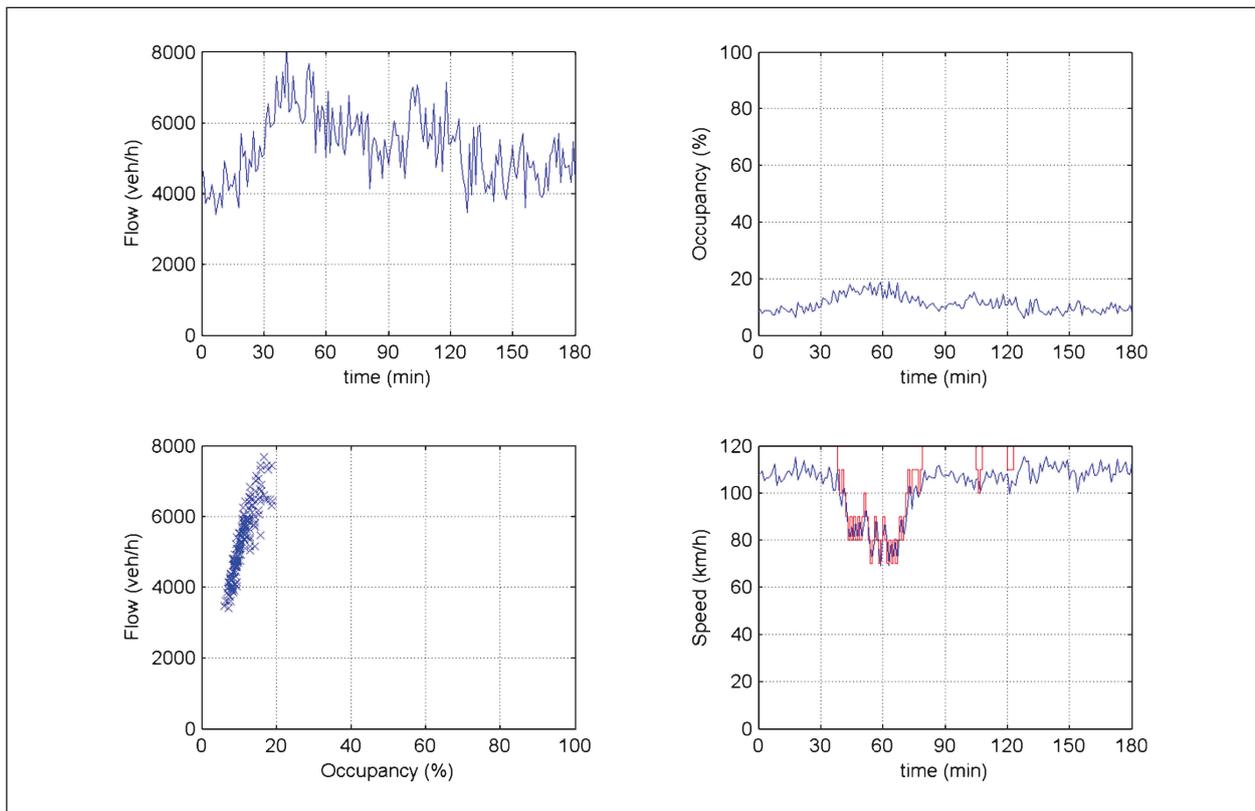


Bild 45: Zeitliche Entwicklung der Trichter-VGB 3 (rot) und des entsprechenden Verkehrszustands mit Steuerung (Replikation ID 378)

Replikation ID	AVD (s/Fz/km)	AD (Fz/km)	AHS (km/h)	TDT (km)	TTT (h)	Stops (#/Fz/km)
378	8.3	15.2	79.2	55.551	696	0.011
477	13.2	16.9	71.5	55.413	775	0.029
478	8.3	15.2	79.1	55.632	698	0.008
479	14.4	17.5	69.8	56.019	802	0.032
480	12.8	16.8	72.0	55.347	768	0.020
481	12.9	16.9	71.8	55.513	771	0.025
482	13.5	17.2	71.1	56.095	789	0.027
483	12.6	16.7	72.4	55.468	766	0.022
484	10.7	15.9	75.2	55.022	729	0.016
485	7.8	15.0	80.1	55.462	687	0.008
Mittelwert	11.5	16.3	74.2	55.552	748	0.020
Standardabweichung	2.5	0.9	3.9	312.4	42.2	0.009

Tab. 13: Gütekriterien für 10 Replikationen mit Steuerung

	AVD (s/Fz/km)	AD (Fz/km)	AHS (km/h)	TDT (km)	TTT (h)	Stops (#/Fz/km)
Mittelwert	78.3 %	49.2 %	-85.0 %	-0.7 %	49.2 %	84.5 %

Tab. 14: Mittlere Verbesserung der Gütekriterien bei dem Fall mit Steuerung

4.4.4 Untersuchung des Einflusses der Befolgungsrate

Es wurden Untersuchungen durchgeführt, um den Einfluss der Befolgungsrate CR auf die erzielten Ergebnisse im Steuerungsfall zu eruieren. Es sei daran erinnert, dass bei den bisherigen Ergebnissen $CR = 1$ galt. Die Simulationsergebnisse werden in Bild 46, nunmehr auch für CR-Werte von 0.9, 0.8 und 0.7 und jeweils 10 Replikationen anhand des Gütekriteriums AVD zusammengefasst, während die Ergebnisse für die anderen Gütekriterien analog ausfallen.

Es wird ersichtlich, dass die auftretende Verschlechterung wegen einer geringeren modellierten Befolgungsrate im Fall der Steuerung sehr mäßig ausfällt. Dies kann auf zwei Faktoren zurückgeführt werden:

- Den Rückführ-Charakter der Regelung, der bei nicht ausreichender Befolgung seitens der Fahrer die ZD-VGB Anzeige weiterhin, so weit wie erforderlich und möglich, heruntersetzt, bis die erforderliche Wirkung tatsächlich erreicht wird.

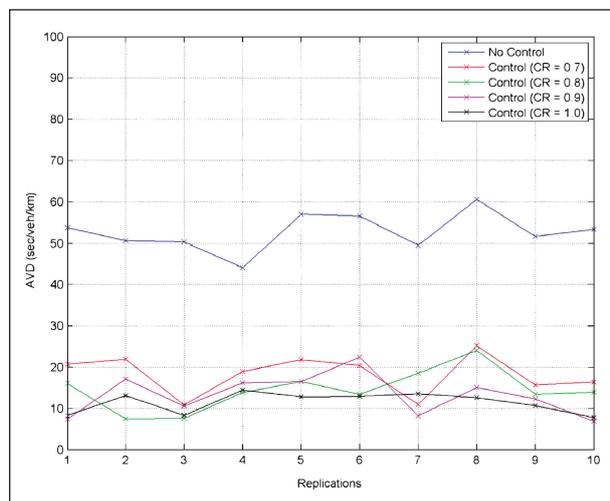


Bild 46: Average Vehicle Delay (AVD) per Replikation für die Fälle ohne Steuerung und mit Steuerung, letztere mit 4 unterschiedlichen Werten für die Befolgungsrate CR

- Die gute Befolgungsrate einiger Fahrer kann in Anbetracht der beschränkten Streifenwechselmöglichkeiten weniger disziplinierte Fahrer daran hindern, hohe Geschwindigkeiten zu erreichen, wodurch die faktische Befolgungsrate des Ensembles der Fahrzeuge erhöht wird.

Tabelle 15 fasst die resultierenden mittleren Verbesserungen (im Vergleich zum Fall ohne Steuerung) für alle Gütekriterien und alle untersuchten Befolgungsraten CR zusammen, die die geringe Empfindlichkeit der Steuerungseffizienz von der Befolgungsrate bestätigen.

4.4.5 Untersuchung des Sollwertes (kritische Verkehrsdichte)

Die soweit berichteten, äußerst positiven Ergebnisse sind bekanntlich in erster Linie das Resultat der Durchflussmaximierung an der Engstelle, die indirekt, mittels der Regelung der Verkehrsdichte auf deren kritischen Wert, erreicht wird. Der bislang verwendete Sollwert für den Drosselungsregelkreis beträgt 20 Fz/km/Streifen. Da aber der jeweilige kritische Wert vorab unbekannt ist und möglicherweise in der Praxis auch eine stochastische Komponente aufweisen könnte, erscheint es sinnvoll, den Einfluss des, als kritische Dichte angenommenen, Sollwertes auf die erzielbaren Steuerungsergebnisse zu untersuchen.

Hierzu wurden die Simulationsuntersuchungen erneut mit unterschiedlichen Sollwerten für den Drosselungsregelkreis, durchgeführt. Die nunmehr untersuchten Sollwerte betragen 18 und 22 Fz/km/Streifen, und die entsprechenden Ergebnisse der jeweils 10 Replikationen werden in Bild 47 anhand des Gütekriteriums AVD zusammengefasst. Die Ergebnisse für die anderen Gütekriterien fallen analog aus. Die Ergebnisse deuten auf eine geringe Empfindlichkeit der Regelungsgüte in Abhängigkeit des verwendeten Sollwertes hin, solange dieser innerhalb eines geeigneten Wertebereiches gewählt wird. Infolgedessen wird der erwartete Eichungs-

CR	AVD (s/Fz/km)	AD (Fz/km)	AHS (km/h)	TDT (km)	TTT (h)	Stops (#/Fz/km)
0.9	74.8 %	47.2 %	-79.5 %	-0.6 %	47.2 %	83.7 %
0.8	72.5 %	45.9 %	-75.1 %	-0.6 %	45.9 %	81.4 %
0.7	65.3 %	41.7 %	-62.9 %	-0.4 %	41.7 %	72.0 %

Tab. 15: Mittlere Verbesserungen (im Vergleich zum Fall ohne Steuerung) für alle Gütekriterien und alle untersuchten Befolgungsraten CR

Sollwert (Fz/km/Streifen)	AVD (s/Fz/km)	AD (Fz/km)	AHS (km/h)	TDT (km)	TTT (h)	Stops (#/Fz/km)
18	73.4 %	46.4 %	-76.4 %	-0.5 %	46.4 %	81.4 %
20	78.3 %	49.2 %	-85.0 %	-0.7 %	49.2 %	84.5 %
22	77.1 %	48.5 %	-82.6 %	-0.7 %	48.5 %	82.6 %

Tab. 16: Mittlere Verbesserungen (im Vergleich zum Fall ohne Steuerung) für alle Gütekriterien und alle untersuchten Sollwerte

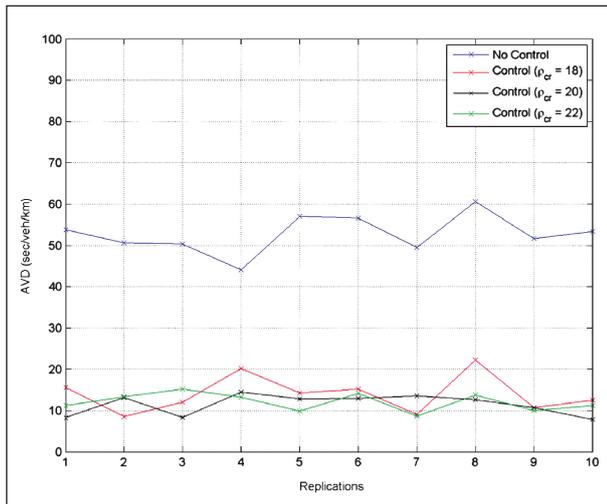


Bild 47: Average Vehicle Delay (AVD) per Replikation für die Fälle ohne Steuerung und mit Steuerung, letztere mit 3 unterschiedlichen Sollwerten (kritische Verkehrsdichte)

aufwand zur Festlegung eines geeigneten Sollwertes in der Praxis als gering eingeschätzt.

Tabelle 16 fasst die resultierenden mittleren Verbesserungen (im Vergleich zum Fall ohne Steuerung) für alle Gütekriterien und alle untersuchten Sollwerte zusammen, die die geringe diesbezügliche Empfindlichkeit der Steuerungseffizienz bestätigen.

4.4.6 Untersuchung des zulässigen VGB-Mindestwertes

Wie bereits erwähnt, beruht der Hauptteil der Steuerungseffizienz auf der Möglichkeit, die Engstelle mittels der Wirkung des Drosselungsregelkreises weitgehend staufrei zu halten (wodurch der Kapazitätseinbruch vermieden wird) und sie darüber hinaus bei ihrer Kapazität zu betreiben. Das zuständige Stellglied für diese Funktion ist die ZD-VGB, die bisher VGB-Werte bis zum zulässigen Mindestwert von 20 km/h anzeigen durfte. Obwohl dieser Mindestwert bei der Replikation in Bild 42 zu keinem Zeitpunkt erreicht wurde, könnte dies in anderen Fällen erforderlich sein.

Gemäß Bild 34 beträgt bei VGB = 20 km/h der gedrosselte 4-streifige Zufluss knapp 5.000 Fz/h, d. h. 1.250 Fz/h/Streifen. Die entsprechenden Werte für VGB = 30 km/h bzw. VGB = 40 km/h betragen ca. 1.500 Fz/h/Streifen bzw. 1.600 Fz/h/Streifen. Bei einer Arbeitsstelle mit Streifenreduktion von drei auf zwei Fahrstreifen würde die Kapazität der Engstelle ca. 4.000 Fz/h betragen. Daher sollte der notwendige gedrosselte Zufluss diesen Wert zeitweise auch unterschreiten können. Offenbar wäre dies bei einem Mindestwert von VGB = 20 km/h noch möglich. Höhere VGB-Mindestwerte würden dies aber nicht erlauben. Es sei auch angemerkt, dass sich die genannten Zahlen im realen Verkehr von den Daten der Simulation leicht unterscheiden können und dass sie auch von dem Befolgungsgrad der Fahrer abhängig sind.

Zusammenfassend ist es für die Erzielung der maximal möglichen Effizienz erforderlich, dem Drosselungsregelkreis inklusive seines Stellglieds bei der automatischen Ausführung seiner Funktion unter diversen Bedingungen ausreichenden Freiraum zu verschaffen. In diesem Sinn stellt der festgesetzte zulässige Mindestwert für die ZD-VGB eine potenzielle Einschränkung dar, da die angezeigte VGB gemäß Bild 34 mit dem (haltbaren) Drosselungseffekt direkt zusammenhängt. Wenn also der Regelkreis zu gewissen Zeitpunkten einen Drosselungseffekt benötigt, der wegen des festgesetzten zulässigen Mindestwertes nicht erzielbar ist, dann könnte die BSZ wegen zu hohem Zuflusses eingestaut werden, wodurch die Wirkung des Regelkreises faktisch deaktiviert wäre.

Der bisher verwendete Mindestwert von 20 km/h erscheint ungewöhnlich klein für eine Autobahninfrastruktur. Obwohl, selbst wenn es paradox klingt, dieser Wert die Fahrzeiten drastisch verkürzen kann, ist die Frage der Akzeptanz so niedriger VGB seitens der Fahrer oder der Autobahnbetreiber sicherlich berechtigt. Um bei der entsprechenden Diskussion weitere Entscheidungsgrundlagen zu beschaffen, wurden die Simulationsuntersuchungen erneut, mit unterschiedlichen zulässigen Mindestwerten für die ZD-VGB, durchgeführt.

Die nunmehr untersuchten Mindestwerte für die ZD-VGB betragen 40 km/h und 60 km/h, und die entsprechenden Ergebnisse der jeweils 10 Replikationen werden in Bild 48 anhand des Gütekriteriums AVD zusammengefasst, während die Ergebnisse für die anderen Gütekriterien analog ausfallen. Es wird ersichtlich, dass das Ergebnis dieser kritischen Empfindlichkeitsanalyse anders als in den zwei vorherigen Analysen ausfällt, da die Steuerungseffizienz tatsächlich stark von dem zulässigen VGB-Mindestwert abhängt. Bei einem Mindestwert von 40 km/h beobachtet man zwei Klassen von Replikationen. Die erste Klasse betrifft die Replikationen 1, 2, 3 und 10, bei denen die Steuerungseffizienz, verglichen mit dem ursprünglichen Fall eines Mindestwertes von 20 km/h, keine Einbußen erleidet. Die zweite Klasse betrifft die restlichen sechs Replikationen, bei denen die Steuerungseffizienz zwar deutlich besser als im Fall ohne Steuerung ausfällt, jedoch, verglichen mit dem ursprünglichen Fall eines Mindestwertes von 20 km/h, deutliche Einbußen erleidet. Bei dem Mindestwert von 60 km/h beobachtet man auch zwei Klassen von Replikationen, wobei die erste Klasse nunmehr Replikationen 1, 2 und 3 beinhaltet, bei denen die Steuerungseffi-

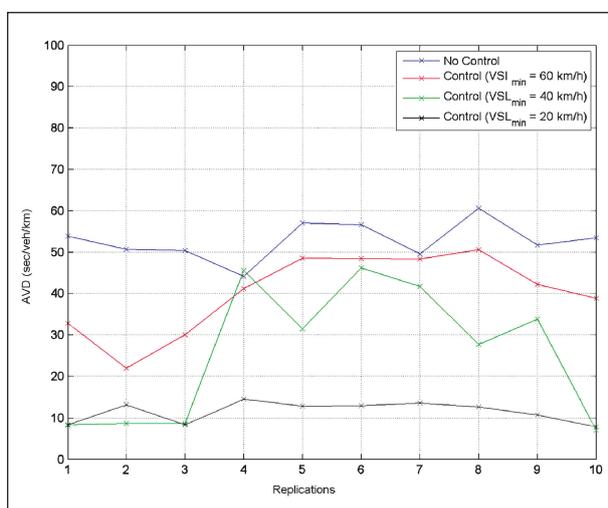


Bild 48: Average Vehicle Delay (AVD) per Replikation für die Fälle ohne Steuerung und mit Steuerung, letztere mit 3 unterschiedlichen zulässigen Mindestwerten für die ZD-VGB

zienz, verglichen mit dem ursprünglichen Fall eines Mindestwertes von 20 km/h, eine kleine Verschlechterung erleidet. Die zweite Klasse beinhaltet die restlichen sieben Replikationen, bei denen die Steuerungseffizienz zwar besser als im Fall ohne Steuerung ausfällt, jedoch, verglichen mit dem ursprünglichen Fall eines Mindestwertes von 20 km/h, starke Einbußen erleidet.

Tabelle 17 fasst die resultierenden mittleren Verbesserungen (im Vergleich zum Fall ohne Steuerung) für alle Gütekriterien und alle untersuchten Mindestwerte zusammen. Die beobachtete unterschiedliche Steuerungseffizienz bei unterschiedlichen Replikationen wird nun in entsprechenden Mittelwerten über alle Replikationen subsumiert. Somit verschlechtert sich die Reduktion des mittleren AVD Index von 78 % bei einem Mindestwert von 20 km/h auf 51 % bei 40 km/h. Bei dem Mindestwert von 60 km/h erhält man eine mittlere Verbesserung von 24 %, was einerseits eine deutliche Verbesserung gegenüber dem Fall ohne Steuerung darstellt; andererseits fällt diese Verbesserung aber weitaus geringer aus, als im Fall einer praktisch unbeschränkten Drosselung.

Gründe für die inhomogene Verteilung der Steuerungseffizienz bei den unterschiedlichen Replikationen, die in den Fällen eines höheren Mindestwertes für die ZD-VGB beobachtet wurde, sollen nachfolgend diskutiert werden. Im Fall ohne Steuerung erleidet die Infrastruktur eine Degradation, sobald die Engstelle wegen hohen Zuflusses eingestaut wird, weil dann der Durchfluss wegen des Kapazitätseinbruchs deutlich vermindert wird. Jede Steuerungsaktion, die den Zufluss zeitlich (kurz vor dem Stauausbruch) reduziert, führt zu entsprechender zeitlicher Verschiebung der Staubildung und somit auch der Durchflussreduktion. Die ZD-VGB Aktivierung führt gemäß Bild 11 zu zwei Arten von Zuflussdrosselung (CARLSON et al., 2010):

- Eine temporäre Drosselung tritt bei jeder Herabsetzung der VGB auf, weil die niedrigere Geschwindigkeit eine entsprechende Steigerung der Verkehrsdichte in der ZDZ mit sich bringt.

Mindestwert (km/h)	AVD (s/Fz/km)	AD (Fz/km)	AHS (km/h)	TDT (km)	TTT (h)	Stops (#/Fz/km)
20	78.3 %	49.2 %	-85.0 %	-0.7 %	49.2 %	84.5 %
40	50.9 %	32.2 %	-51.8 %	-0.5 %	32.2 %	49.5 %
60	23.7 %	15.3 %	-17.6 %	-0.3 %	15.2 %	12.9 %

Tab. 17: Mittlere Verbesserungen (im Vergleich zum Fall ohne Steuerung) für alle Gütekriterien und alle untersuchten Mindestwerte

Letztere kommt durch kurzfristige Zuflussreduktion zustande. Das Ausmaß dieser Zuflussreduktion hängt offenbar auch von der Länge der Zone, die die Dichtesteigerung erfährt.

- Eine haltbare Drosselung tritt auf, wenn bei genügend niedrigen VGB die Flusskapazität reduziert wird (Bild 34).

Die temporäre Drosselung vermag die Staubildung entsprechend kurzfristig aufzuschieben. Die haltbare Drosselung kann einen haltbaren Effekt ausüben, sofern die mittels reduzierter VGB entstehende reduzierte Kapazität ausreichend geringer ist als die Kapazität der nachfolgenden Engstelle.

Im behandelten Fall tritt demnach bei Einsatz der Steuerung der Effekt der temporären Drosselung immer auf und führt auf alle Fälle durch das Aufschieben der Staubildung zu einer kleinen Verbesserung gegenüber dem Fall ohne Steuerung. Die haltbare Drosselung hat aber nur so lang eine Wirkung, wie sie die vom Drosselungsregelkreis verordneten Werte tatsächlich einstellen kann. Wird dies über etliche nachfolgende Zeitintervalle wegen eines hohen Mindestwertes der ZD-VGB verhindert, so kann der nicht genügend gedrosselte Zufluss zur Staubildung an der Engstelle führen und somit die Steuerung faktisch ausschalten. Ob und wann dies tatsächlich geschieht, hängt von dem Mindestwert der ZD-VGB und der ankommenden Nachfrage ab. Bei einem Mindestwert von 20 km/h tritt dies nie auf, und die Steuerung erreicht ihre maximale Effizienz. Bei einem Mindestwert von 40 km/h tritt dies bei Replikationen der ersten Klasse auch nie auf, weshalb die Steuerung ebenso ihre maximale Effizienz erreicht. Bei den Replikationen der zweiten Klasse mit dem gleichen Mindestwert von 40 km/h ist aber die Nachfrage zufällig so gestaltet, dass, nach einer Periode erfolgreicher Regelung, die von dem Regler geforderte VGB mitunter auch den Mindestwert unterschreitet und daher nicht implementiert werden kann. Wenn dies über einige nachfolgende Zeitintervalle fort dauert, dann wird die Engstelle eingestaut und die Steuerung faktisch ausgeschaltet. Je nach dem Zeitpunkt, an dem dies auftritt, gestaltet sich die entsprechende Effizienz der entsprechenden Replikation. Ähnliches gilt auch für den Mindestwert von 60 km/h, die Wahrscheinlichkeit eines frühen Stau einbruchs ist jedoch entsprechend höher.

Zur Illustration dieser Sachverhalte sollen die detaillierten Ergebnisse beobachtet werden. Da die Effizienz der Steuerung bei der bisher betrachteten

Replikation 1 keine Einbußen aufzeigt, soll im Weiteren die Replikation 5 unter die Lupe genommen werden. Bild 49 und Bild 50 zeigen die Entwicklung des Verkehrszustands ohne Steuerung, nunmehr für Replikation 5. Die gezeigten Ergebnisse ähneln sich natürlich denen der Bilder 37 und 38.

Bild 51 zeigt (für die gleiche Replikation) die örtlich-zeitliche Entwicklung der resultierenden mittleren Geschwindigkeit im Fall mit Steuerung bei einem zulässigen VGB-Mindestwert von 40 km/h. Bild 52 bzw. Bild 53 zeigen die zeitliche Entwicklung der Mess- und Stellwerte kurz vor der Engstelle bzw. an der ZD-VGB. Bei der anfänglich niedrigen Nachfrage zeigt die ZD-VGB zunächst für die Dauer von 35 Minuten den maximal zulässigen Wert 100 km/h an. Mit steigender Nachfrage steigt die Verkehrsdichte ebenso bis an Werte nahe des kritischen Wertes (Sollwert), was den Drosselungsregler veranlasst einzugreifen. Danach sind die vom Drosselungsregelkreis geforderten ZD-VGB-Werte über die Dauer von 30 Minuten höher als der Mindestwert (Bild 53), daher können über diese Dauer die Verkehrsdichte nahe des Sollwertes von 20 Fz/km/Streifen gehalten und der Durchfluss an der Engstelle maximiert (Bild 52) werden. Gegen die 55. Minute fordert aber der Regelkreis wiederholt ZD-VGB-Werte an, die geringer als der zulässige Mindestwert sind und daher nicht implementiert werden können. Als Konsequenz führt der hohe Zufluss zu einem Stauausbruch und einem Kapazitätseinbruch wie im Fall ohne Steuerung. Insgesamt führt also die Steuerung in diesem Fall zu einem Aufschub der Staubildung um ca. 30 Minuten. Während dieser Zeit erfolgt ein höherer Durchfluss

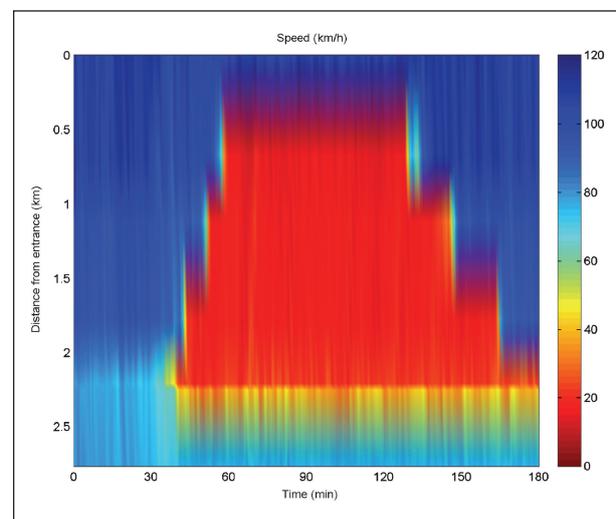


Bild 49: Örtlich-zeitliche Entwicklung der mittleren Geschwindigkeit ohne Steuerung (Replikation 5)

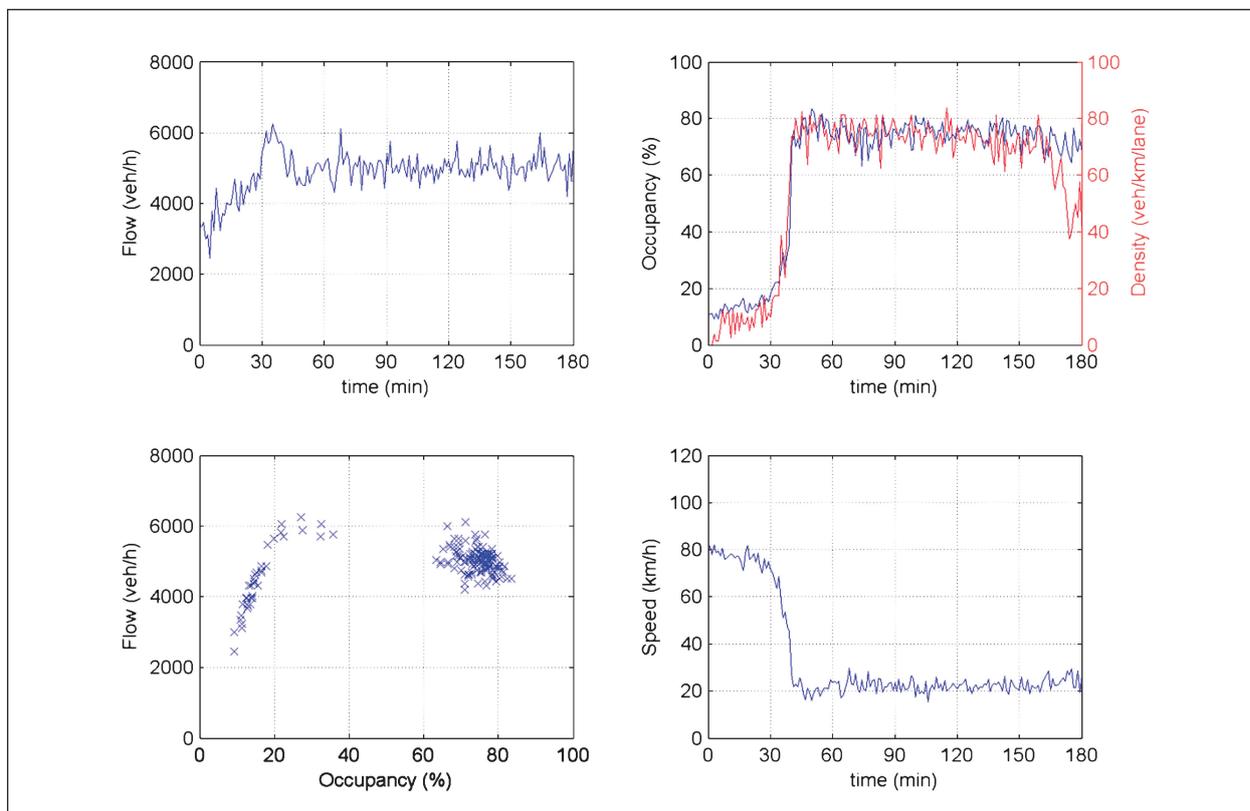


Bild 50: Zeitliche Entwicklung des Verkehrszustandes kurz vor der Engstelle ohne Steuerung (Replikation 5)

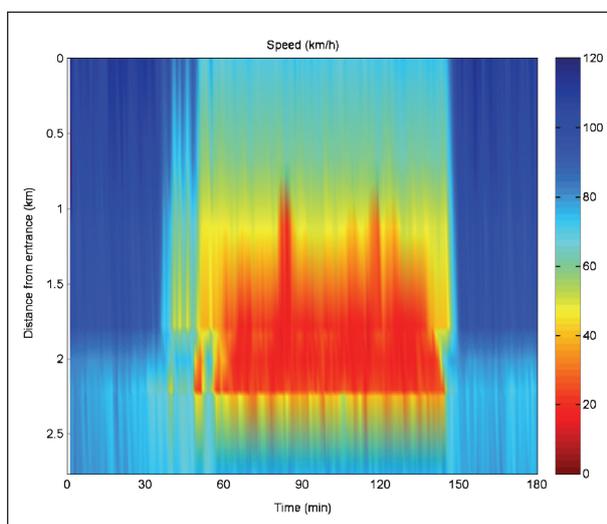


Bild 51: Örtlich-zeitliche Entwicklung der mittleren Geschwindigkeit mit Steuerung und ZD-VGB Mindestwert 40 km/h (Replikation 5)

in der Engstelle im Vergleich zum Fall ohne Steuerung. Daher ist die räumlich-zeitliche Ausdehnung des nachfolgend gebildeten Staus entsprechend geringer (Bild 51) und die Gütekriterien, verglichen mit dem Fall ohne Steuerung, deutlich besser.

Bild 56 zeigt (für die gleiche Replikation) die örtlich-zeitliche Entwicklung der resultierenden middle-

ren Geschwindigkeit im Fall mit Steuerung bei einem zulässigen VGB-Mindestwert von 60 km/h. Bild 54 bzw. Bild 55 zeigen die zeitliche Entwicklung der Mess- und Stellwerte kurz vor der Engstelle bzw. an der ZD-VGB. Auch hier zeigt die ZD-VGB bei der anfänglich niedrigen Nachfrage zunächst für die Dauer von 35 Minuten den maximal zulässigen Wert 100 km/h an. Mit steigender Nachfrage steigt die Verkehrsdichte ebenso bis an Werte nahe des kritischen Wertes (Sollwert), was den Drosselungsregler veranlasst einzugreifen. Jedoch sind die vom Drosselungsregelkreis geforderten ZD-VGB-Werte schon bald (kurz nach der 40. Minute) geringer als der zulässige Mindestwert von 60 km/h, weshalb sie BSZ wegen zu hohem Zuflusses eingestaut und die Regelungswirkung faktisch ausgeschaltet wird. Somit konnte in diesem Fall die Staubildung durch die Steuerungswirkung lediglich um ca. 10 Minuten aufgeschoben werden. Während dieser Zeit erfolgt ein höherer Durchfluss in der Engstelle im Vergleich zum Fall ohne Steuerung, daher ist die räumlich-zeitliche Ausdehnung des nachfolgend gebildeten Staus entsprechend geringer (Bild 54) und die Gütekriterien, verglichen mit dem Fall ohne Steuerung, entsprechend besser.

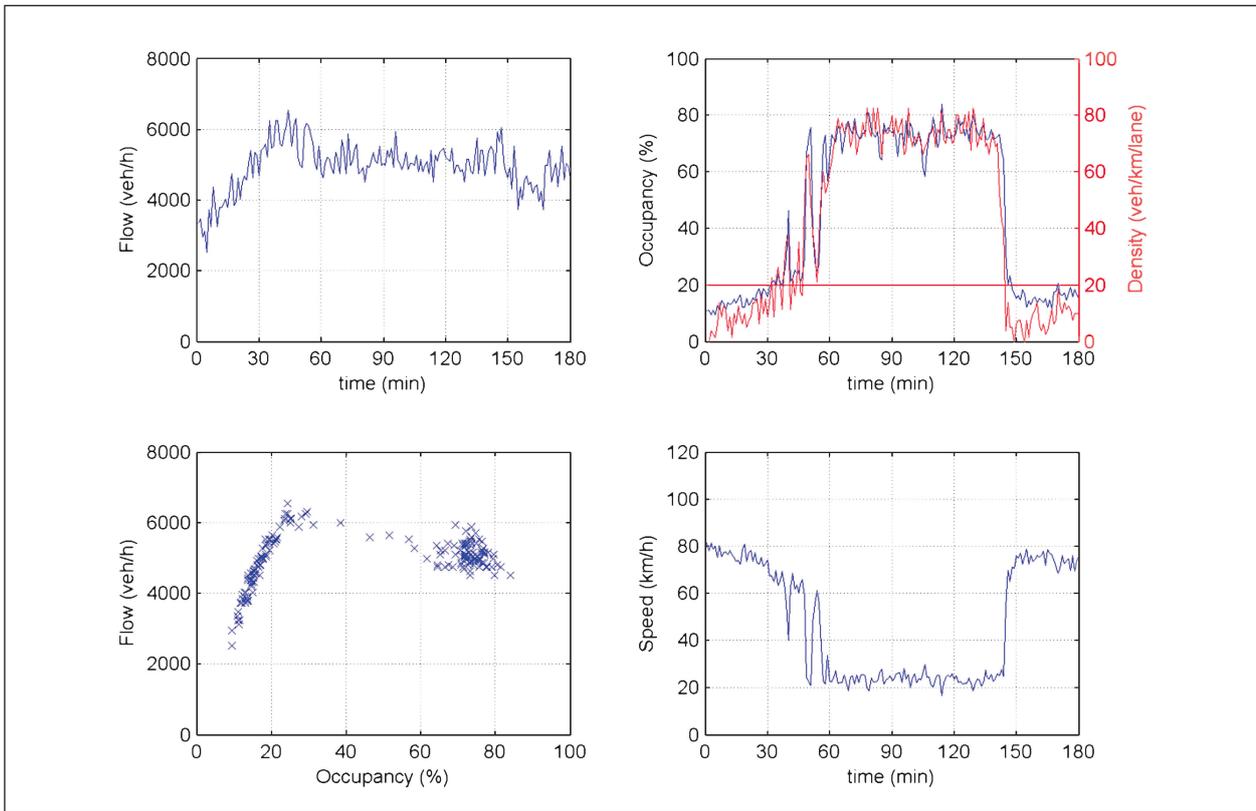


Bild 52: Zeitliche Entwicklung des Verkehrszustandes kurz vor der Engstelle mit Steuerung und ZD-VGB Mindestwert 40 km/h (Replikation 5)

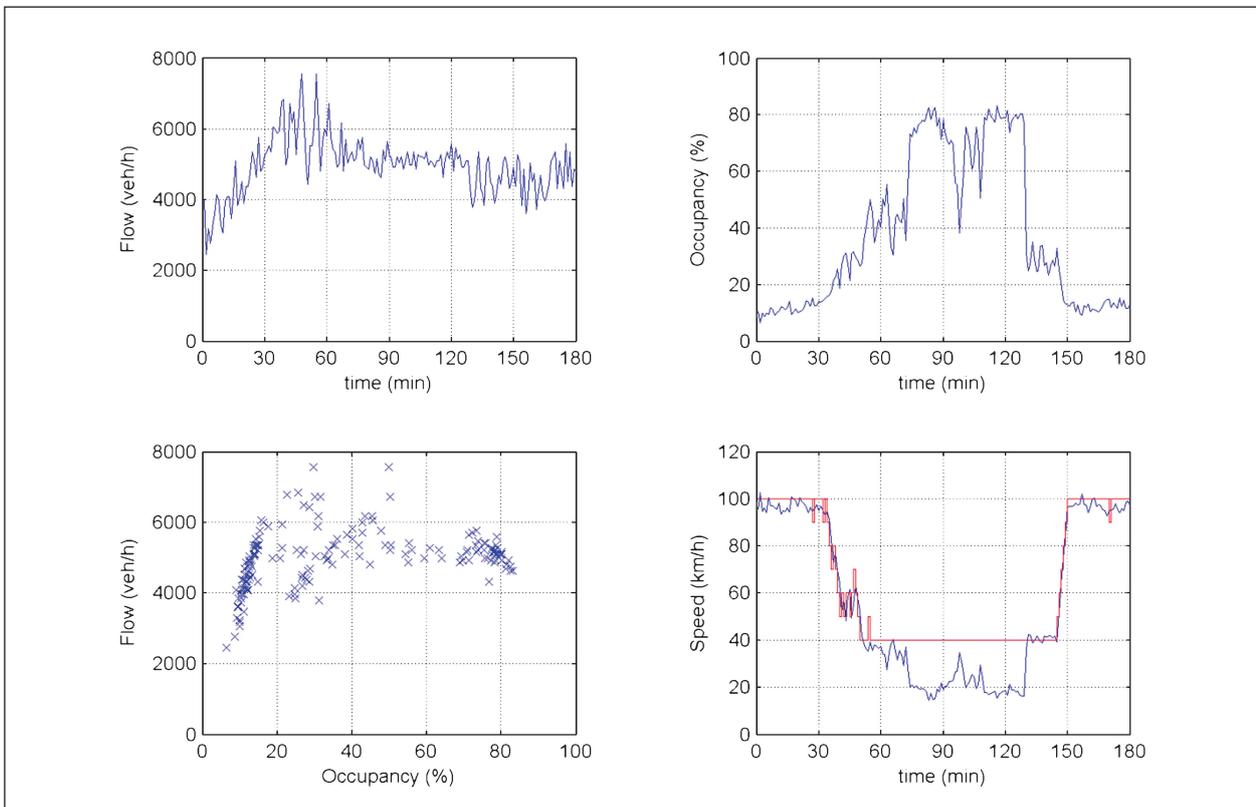


Bild 53: Zeitliche Entwicklung der ZD-VGB (rot) und des entsprechenden Verkehrszustands mit Steuerung und ZD-VGB Mindestwert 40 km/h (Replikation 5)

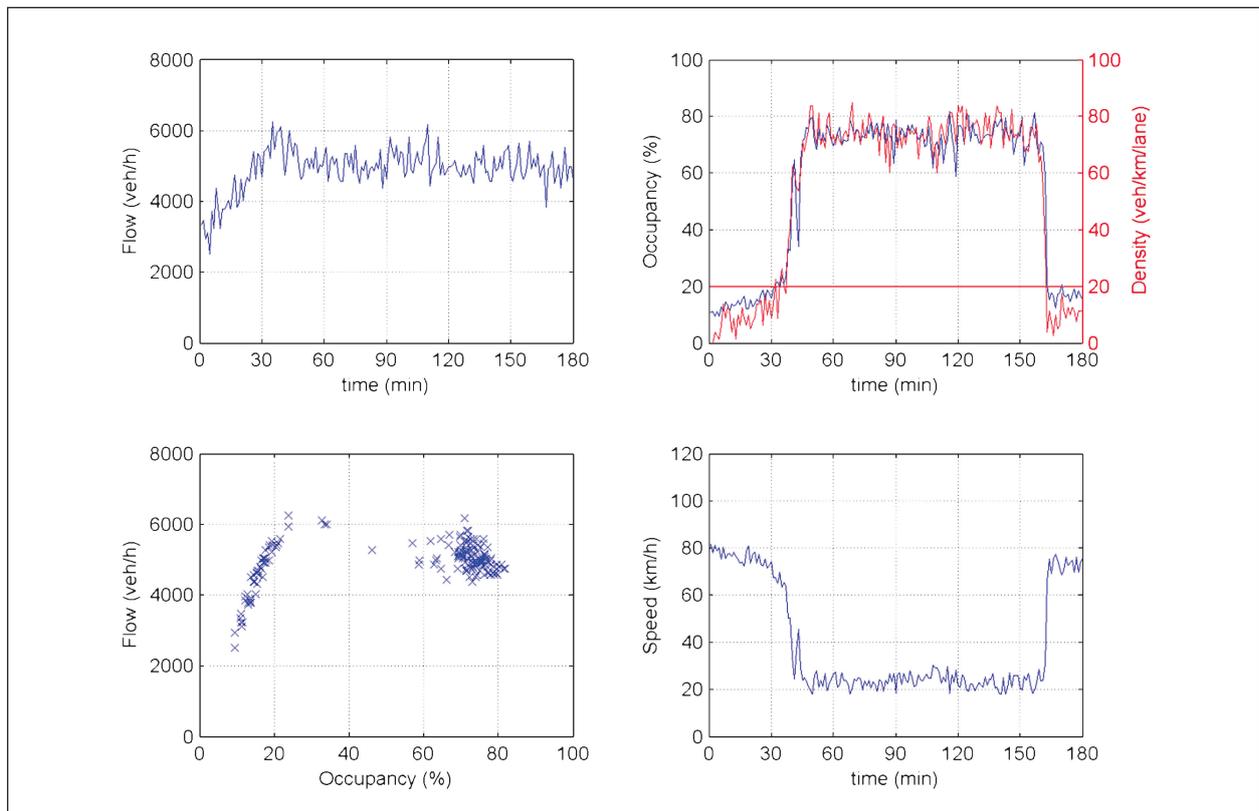


Bild 54: Zeitliche Entwicklung des Verkehrszustandes kurz vor der Engstelle mit Steuerung und ZD-VGB Mindestwert 60 km/h (Replikation 5)

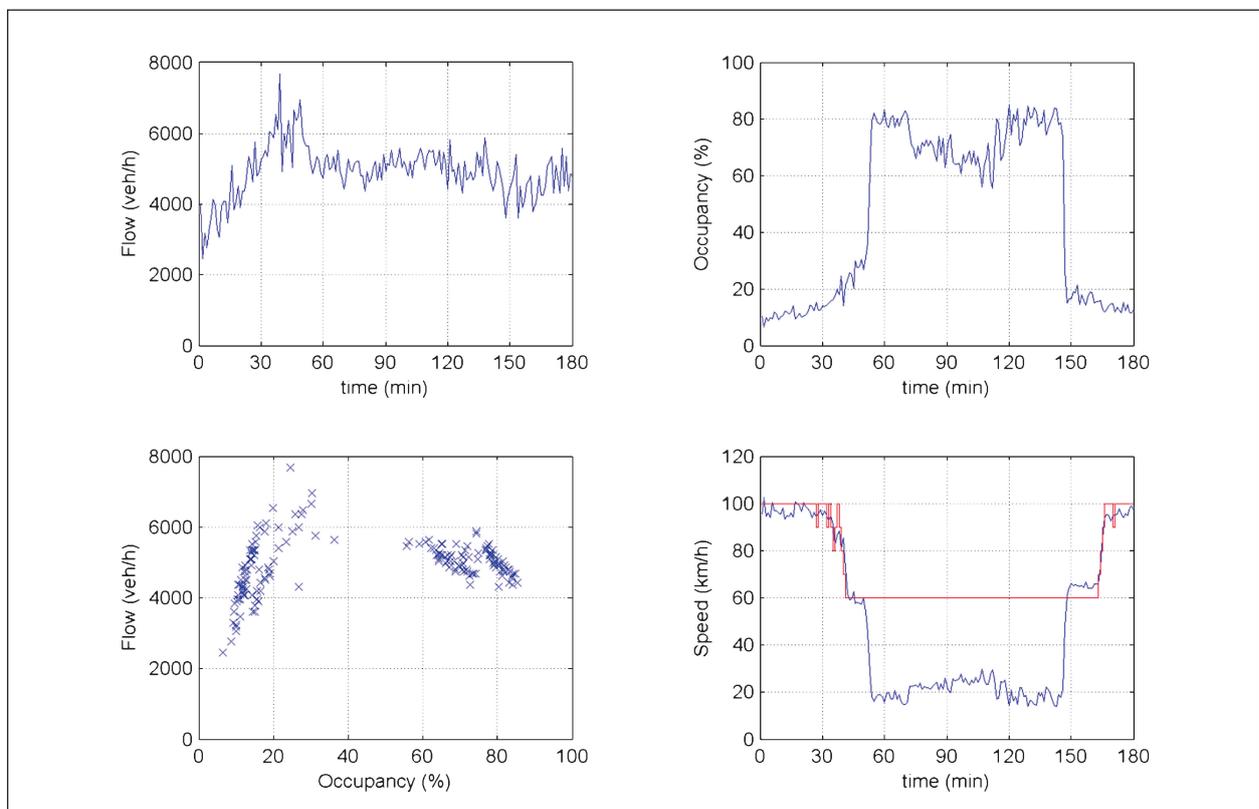


Bild 55: Zeitliche Entwicklung der ZD-VGB (rot) und des entsprechenden Verkehrszustands mit Steuerung und ZD-VGB Mindestwert 60 km/h (Replikation 5)

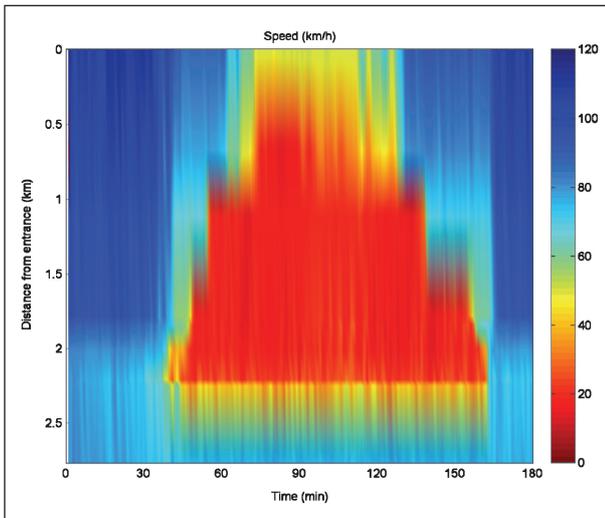


Bild 56: Örtlich-zeitliche Entwicklung der mittleren Geschwindigkeit mit Steuerung und ZD-VGB Mindestwert 60 km/h (Replikation 5)

4.4.7 Diskussion und Eignung der Steuerungsstrategie für andere Arten von Autobahn-Engstellen

Autobahn-Engstellen entstehen an Stellen, wo die Fahrbahnkapazität stromaufwärts höher ist als die Fahrbahnkapazität stromabwärts. Wenn die höhere Kapazität stromaufwärts durch eine höhere Anzahl von Fahrstreifen als stromabwärts entsteht (z. B. bei Arbeitsstellen, Einfahrten, Mautstellen, Autobahnkreuzen, Verkehrseignissen), dann handelt es sich um Einfädel-Engstellen (merge bottlenecks). Wenn die Anzahl der Fahrstreifen stromaufwärts wie stromabwärts der Engstelle gleich bleibt (z. B. bei Tunneln, Brücken, scharfen Kurven, Aufstieg), dann handelt es sich um Kapazität-Engstellen.

Das untersuchte Steuerungskonzept ist prinzipiell geeignet für die Behandlung aller erwähnten Arten

von Autobahn-Engstellen. Möglicherweise sind dabei bei unterschiedlichen Engstellenarten kleine Modifikationen des Konzeptes erforderlich. So käme z. B. der Einbezug der FWS nur bei Einfädel-Engstellen infrage. Das hier verfolgte Grundziel der Durchflussmaximierung an der Engstelle durch Vermeidung des Kapazitätseinbruchs mittels ausreichender Drosselung des Zuflusses lässt sich aber in ähnlicher Weise auch bei anderen Engstellenarten anwenden. Die Art der Drosselung wäre nicht unbedingt nur auf VGB beschränkt, sondern könnte sich auch auf Lichtsignalanlagen ausweiten, wie z. B. bei Zuflussdosierung oder bei manchen existierenden Steuerungssystemen stromaufwärts von Tunneln, Brücken oder Mautstationen. Der zusätzliche Einsatz von Zuflussdosierung (ggf. an mehr als einer Einfahrt stromaufwärts der Engstelle) ist insbesondere bei Einfädel-Engstellen zwecks stärkerer Verkehrsflussdrosselung zu berücksichtigen (IORDANIDOU et al., 2016). Bild 57 visualisiert eine solche Möglichkeit.

Generell sei hier auch erwähnt, dass die zwei Komponenten der Steuerungsstrategie, nämlich die Verkehrsdrosselung und die FWS, auch getrennt eingesetzt werden können (letztere freilich nur bei Einfädel-Engstellen), wobei aber die Steigerung der Verkehrseffizienz in erster Linie durch die Drosselungswirkung zu erwarten ist.

Wie die Diskussion der Steuerungsergebnisse gezeigt hat, ist zur Gewährleistung der maximal möglichen Steuerungseffizienz eine möglichst unbeschränkte Zuflussdrosselung erforderlich. Daher sollten bei Einfädel-Engstellen möglichst alle einfahrenden Streifen (mittels VGB oder Lichtsignalanlagen) mit möglichst geringen Restriktionen steuerbar sein. Bei Kapazität-Engstellen hingegen ist bei

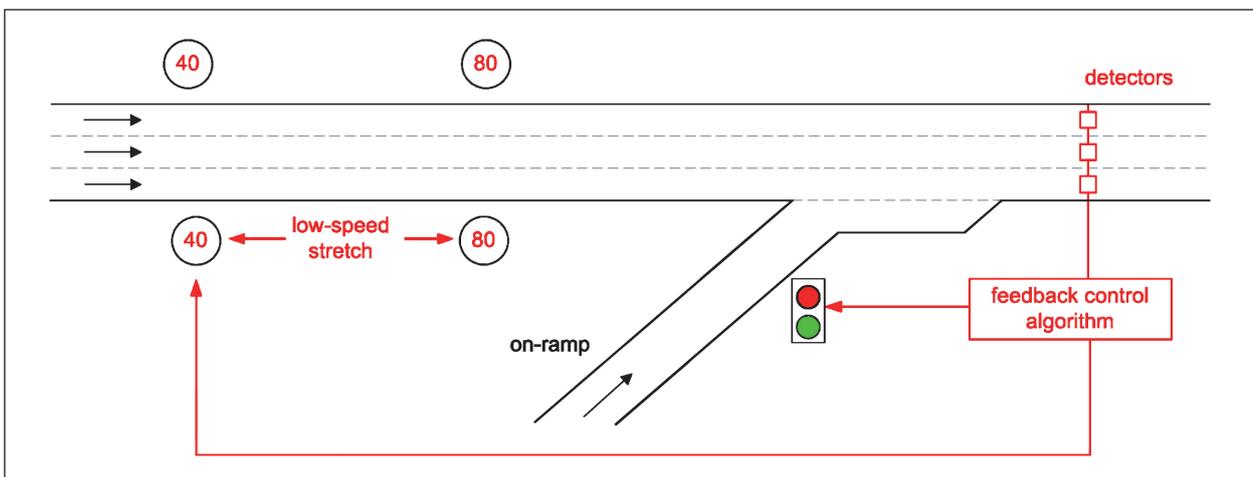


Bild 57: Kombinierte Zuflussdrosselung (mittels VGB) und Zuflussdosierung stromaufwärts einer Engstelle

Nutzung von VGB die Frage des ausreichenden VGB-Mindestwertes weniger kritisch, da selbst bei einem Mindestwert von 60 km/h der resultierende Drosselungseffekt ausreichend sein kann, um die nachfolgende gleichstreifige Engstelle stets staufrei zu halten.

Eine weitere Möglichkeit, den Fall von Einfädel-Engstellen erfolgreich zu behandeln, wenn keine Zuflussdosierung vorhanden ist und keine ausreichende Drosselung wegen hoher VGB-Mindestwerte erreicht wird, kann durch eine Ausweitung der ZDZ erreicht werden. Diese Möglichkeit soll hier erläutert werden.

Wie Bild 11 illustriert, kann die Drosselung temporär oder haltbar sein.

Die temporäre Drosselung entsteht bei unterkritischen Verkehrszuständen als Resultat der Verkehrsverdichtung, die jede Herabsetzung der VGB mit sich bringt; sie ist temporär, weil die Drosselungswirkung aufhört, sobald der neue (der neuen VGB entsprechende) Verkehrszustand erreicht wird. Der Umfang der temporären Drosselung hängt von der angewandten VGB-Stufe, sowie von der Länge der Anwendungsstrecke ab. Die temporäre Drosselung kann von der Steuerung genutzt werden, um die Staubildung an der Engstelle aufzuschieben, wobei die Dauer der zeitlichen Verlagerung von dem Umfang der temporären Drosselung abhängt.

Die haltbare Drosselung entsteht wegen der niedrigeren Kapazität, die eine (ausreichend) niedrige VGB verursacht; ihre Stärke hängt (gemäß Bild 34) ausschließlich von dem Wert der angewandten VGB ab. Bei ausreichend niedriger VGB besteht somit die Möglichkeit, durch die Steuerungswirkung die Staubildung an der Engstelle komplett zu vermeiden.

Nach diesen Erklärungen, haben die Trichter-VGB offensichtlich keinen Einfluss auf die Stärke der haltbaren Drosselung, die allein von der niedrigeren ZD-VGB bestimmt wird. Jedoch setzen die Trichter-VGB, ihrer Funktion nach, ihren VGB-Wert herab, sobald die ZD-VGB (im Rahmen des Drosselungsregelkreises) ihren eigenen VGB-Wert herabsetzt. Demnach entsteht eine gesamte (ZD-, wie auch Trichter-VGB bedingte) temporäre Drosselungswirkung, deren Umfang von der Gesamtlänge der ZDZ und GTZ abhängt.

Das Steuerungskonzept macht von dem Drosselungspotenzial aller verfügbaren (ZD- wie auch

Trichter-)VGB-Gebrauch. In der Simulation sind wir von 3 Trichter-VGB in Abständen von 500 m voneinander, d. h. von einer 1.5 km langen GTZ, ausgegangen. Diese Wahl wurde getroffen, weil:

1. die benutzten realen Infrastruktur- und Verkehrsdaten über diese Streckenlänge verfügbar waren,
2. der vor der realen Arbeitsstelle auftretende Stau diese maximale Länge aufweist und
3. eine provisorische Steuerungsanlage für eine Arbeitsstelle diese Länge mit vertretbaren Kosten kaum übersteigen dürfte.

Den obigen Ausführungen zufolge ist aber der Umfang der (temporären) Flussreduzierung proportional zu der Länge der VGB-Anwendungsstrecke, daher besteht die Möglichkeit, die zeitliche Verlagerung der Staubildung bei entsprechender Verlängerung der Anwendungsstrecke zu verlängern. Daher wäre die Untersuchung einer VGB-Zone von z. B. 10 oder 20 km höchst interessant für den Fall permanenter Autobahn-Engstellen, bei denen die notwendige, entsprechend umfangreiche Steuerungsinfrastruktur (und entsprechende Kosten) vertretbar wäre.

Eine Steuerungsanlage dieser Dimension könnte tatsächlich auch bei niedrigsten VGB von 60 km/h zu einer ähnlichen Steuerungsgüte führen, wie hier bei einer niedrigsten VGB von 20 km/h erreicht wurde. Dies würde natürlich die Berücksichtigung einer entsprechend langen Autobahnstrecke voraussetzen. Diese erweiterte Aufgabenstellung könnte gegebenenfalls zu einer Modifikation des hier verwendeten Drosselungskonzepts mit PI-Regler führen, da die lange VGB-Zone mit entsprechend hohen Fahrzeiten bis zur Engstelle (also mit langen Totzeiten im regelungstechnischen Sinne) verbunden wäre. Andere regelungstechnische Konzepte könnten sich hier als geeigneter erweisen, so z. B. eine Mehrgrößen-Regelung oder ein Smith-Prädiktor oder die Variierung des aktiven Teils der VGB-Zone, gleichzeitig mit den VGB-Werten, als zusätzlicher Eingangsgröße des Drosselungsregelkreises.

Entsprechende Simulations- oder gar Feldstudien würden die Eignung des Grundkonzeptes bei anderen Engstellenarten untermauern und sind daher besonders empfehlenswert. Bei der Auswahl einer möglichen Teststelle sollte vorab die Erfüllung von zwei wichtigen Voraussetzungen gesichert werden:

1. Die verfügbaren Stellglieder erlauben eine ausreichende (haltbare oder temporäre) Drosselungsstärke im Sinne der obigen Diskussion und
2. der ohne Steuerung auftretende Stau ist das Resultat der Überlastung der Engstelle durch das ankommende Verkehrsaufkommen, d. h. der Stau steigt nicht von stromabwärts der Engstelle.

5 AP4: Detektions- und Signalisierungskonzept

Im Kapitel 2.9 Verkehrstechnische Infrastruktur, wurden die Anforderungen an die Detektion, die Signalisierung, die Stromversorgung und die Datenübertragung definiert. Die Grundlage für die Konzepte bilden dabei die in Kapitel 2.3 umrissenen relevanten Vorgaben aus Regelwerken und Normen.

Nachfolgend werden die jeweiligen Anforderungen bewertet und die einzelnen Technologien bestimmt, welche für die Anwendungen am besten geeignet sind. Voraussetzung für diese Bewertung ist zunächst die Bestimmung der Anzeigehalte für die verkehrsabhängige Geschwindigkeitsbeschränkung (VGB) in der Trichterzone (Trichter-VGB), der Zuflussdosierungszone (ZD-VGB) und der Beschleunigungs- und Fahrstreifenwechselzone (Kapazität-VGB) sowie der Fahrstreifenwechsell-signalisierung (FWS) in der Beschleunigungs- und Fahrstreifenwechselzone (BSZ).

5.1 Anzeigehalte

Wie bereits beim regelungstechnischen Entwurf in AP 3 erwähnt, hängt die Wirkung der FBA entscheidend von der Akzeptanz bzw. der Befolgung der Schaltungen durch die Fahrer ab. Um eine möglichst hohe Befolgung der Anzeigen (auch ohne Überwachung) und eine hohe Verkehrssicherheit (geringe Ablenkung) zu erreichen, sollten die Anzeigen möglichst einfach (schnell erfassbar, leicht verständlich) und nachvollziehbar (Schaltgrund erkennbar) sein. Außerdem sollte die Signalisierung dabei den Anforderungen aus der Straßenverkehrsordnung (StVO) und den gültigen Richtlinien (z. B. Richtlinie für die Sicherung von Arbeitsstellen – RSA, Richtlinien für Wechselverkehrszeichenanlagen an Bundesfernstraßen – RWVZ) genügen, um

erforderliche Anpassungen und Sonderregelungen zu vermeiden.

Die Anzeigehalte müssen a-priori definiert werden, um darauf aufbauend geeignete Anzeigetechnologien wählen zu können. In der Praxis kommen bei Fahrstreifenreduktionen in Deutschland bereits heute unterschiedliche Anzeigehalte zum Einsatz.

Neben StVO-konformen Anzeigehalten, wie z. B. Einengungstafeln (Zeichen 531-21), Geschwindigkeitsbegrenzungen oder Entfernungsangaben, werden auch nicht StVO-konforme Anzeigehalte, wie z. B. Textzusätze wie Einfädeln lassen und animierte Piktogramme auf fahrbaren Vorwarn- oder Absperrtafeln, zur Kenntlichmachung von Engstellen verwendet.

Eine Recherche zu internationalen Anzeigehalten (bspw. Frankreich, Niederlande, die USA oder Großbritannien) hat ergeben, dass bei Fahrstreifenreduktionen im Ausland ähnliche Inhalte für statische und dynamische Signalisierungen wie in Deutschland eingesetzt werden. Diese beinhalten zumeist eine Kombination der Anzeige der Geschwindigkeitsbegrenzung, den Hinweis zum Einfädeln und die Entfernung bis zur Engstelle.

Anzeigehalte für VGB

Die Signalisierung der Geschwindigkeitsbeschränkungen soll im vorliegenden Konzept zwecks einer dynamischen Steuerung grundsätzlich mit Wechselverkehrszeichen (WVZ) erfolgen. Die Signalisierung soll dabei nicht von den Regelungen, die in der StVO sowie der VwV-StVO enthalten sind, abweichen (RWVZ, 1997). Die Regelungen wurden in Kapitel 2.3 erläutert und beziehen sich auf einzuhaltende Geschwindigkeitsstufen und Signalisierungsabstände sowie die Darstellungsformen. Eine Umkehrung der Darstellung von dunklen Zeichen auf hellem Grund zu hellen Zeichen auf dunklem Grund ist bei der Erzeugung der Signalisierung durch leuchtende Elemente zulässig (RWVZ, 1997).

Anzeigehalte für FWS

Bisher ist bei Fahrstreifenreduktionen in Deutschland das Reißverschlussverfahren direkt vor der Engstelle vorgeschrieben. Das vorliegende Konzept sieht bei bestimmten Verkehrsbedingungen aber auch einen früheren Fahrstreifenwechsel weiter stromaufwärts der Engstelle vor.

Wie in Kapitel 4.1.3 erläutert wurde, soll die FWS dynamisch erfolgen und je nach Erfordernis zwischen den Zuständen früher Fahrstreifenwechsel (bei staufreier BSZ) und später Fahrstreifenwechsel (bei unvermeidbarer Einstauung der BSZ) unterscheiden. Es müssen also unterschiedliche Anzeigeninhalte für die Zustände früher und später Fahrstreifenwechsel vorgehalten werden. Über die dynamische Steuerung der VGB und FWS an den für beide Fälle gleichen Standorten und über die gleichen ortsfesten Vorwarntafeln soll ein situationsabhängiger Einfluss auf das Verhalten der Verkehrsteilnehmer ausgeübt werden.

Zugunsten einer leichten Erkennbarkeit, leichten Verständlichkeit, guten Akzeptanz und Erkennbarkeit als aktives Verkehrszeichen wurden für die Vorwarntafeln verschiedene Darstellungen diskutiert. Die Signalisierung unterschiedlichen Fahrstreifenwechselverhaltens könnte z. B. über die Darstellung von animierten Piktogrammen erfolgen. Ergänzend soll durch Angabe der Entfernung zur Engstelle und einen entsprechenden Textzusatz vor der Engstelle gewarnt werden. Andere Möglichkeiten die FWS umzusetzen sind WVZ des Typs A zur Streckenbeeinflussung nach RWVZ (1997). Diese können z. B. als Dauerlichtzeichen nach § 37 Abs. 3 StVO als gelb blinkender und nach rechts unten gerichteter Schrägpfeil eingesetzt werden. Es wird damit der Wechsel eines Fahrstreifens, z. B. des äußeren linken Fahrstreifens, angeordnet.

5.2 Anzeigentechnologien

Die Anzeigentechnologien von Vorwarntafeln sind in Deutschland vielfältig. Prinzipiell kann statische Beschilderung (Blechschilder) von der Signalisierung mithilfe von Wechselverkehrszeichen in Prisma- oder LED-Technik unterschieden werden. In Bild 58 ist, basierend auf einer Praxisrecherche, exemplarisch, eine Auswahl der in Deutschland angewendeten Fahrstreifenwechselsignalisierungen mit Vorwarntafeln nach unterschiedlichen Technologien und unterschiedlichen Kombinationsmöglichkeiten der einzelnen Elemente dargestellt.

Es sind drei grundsätzliche Arten der Signalisierung zu unterscheiden. Während herkömmliche Verkehrszeichen als statische Verkehrszeichen zu bezeichnen sind, werden dynamische Verkehrszeichen nach der Art ihrer Anzeigenaktualisierung und Technologie unterschieden. Bei Wechselverkehrszeichen mit Prisma-Technik können bis zu drei Inhalte je Verkehrszeichen über einzelne Prismen, die um ihre Achse rotieren können, dargestellt werden. Wechselverkehrszeichen mit Prisma-Technik zeigen einen Inhalt solange an, bis einer der zwei anderen Inhalte, die jedes Verkehrszeichen in einem determinierten Repertoire besitzt, angewählt wird. Mit ihnen sind daher nur Inhalte aus dem Repertoire wählbar, haben jedoch einen relativ geringen Energieverbrauch. Dynamische Wechselverkehrszeichen in LED-Technik sind in der Lage, eine

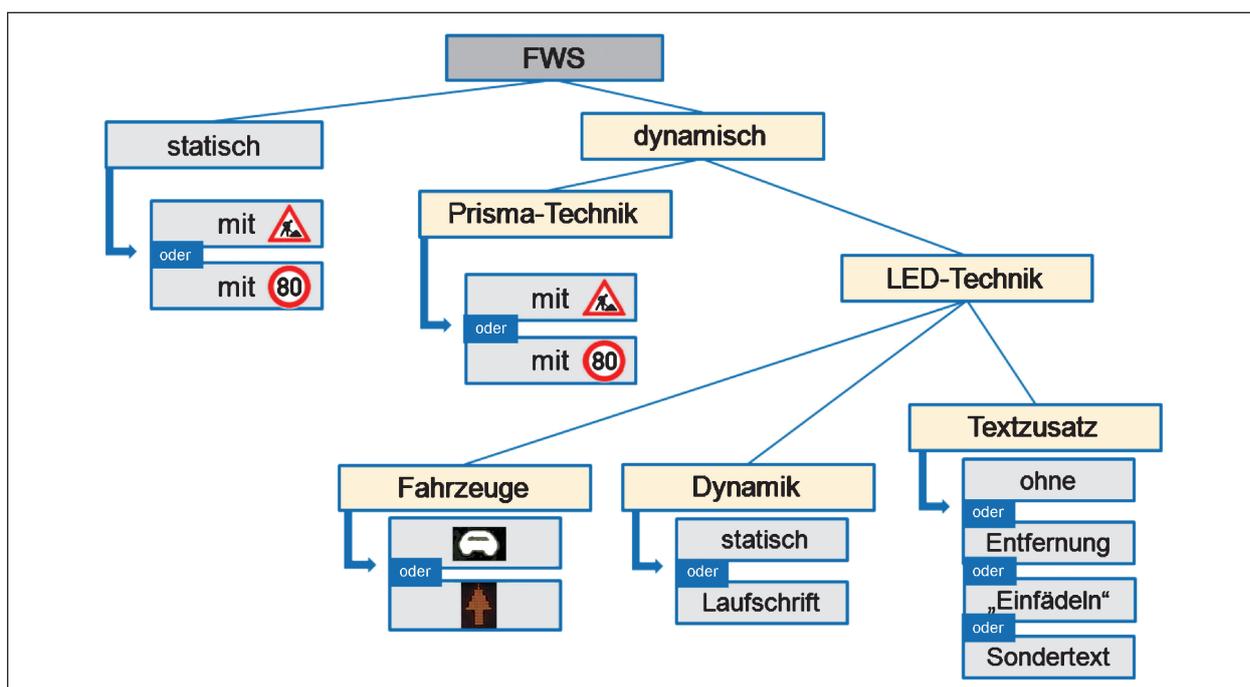


Bild 58: Beispiele für Fahrstreifenwechselsignalisierung

sehr hohe Anzahl von Inhalten anzuzeigen, haben eine sehr gute Sichtbarkeit und werden durch Verkehrsteilnehmer auch eher als aktive Verkehrszeichen wahrgenommen.

Aufgrund der Anzahl der anzuzeigenden Anzeigehalte, welche sich aus dem Steuerungskonzept ergeben, kommt als dynamisches Wechselverkehrszeichen die LED-Technologie in Frage. Die dynamische Signalisierung kann als freiprogrammierbares RGB-Wechselverkehrszeichen oder als limitiertes LED-Wechselverkehrszeichen ausgeführt werden. Für eine dynamische FWS können statische Signalisierungen nicht angewendet werden. In Tabelle 18 ist der zusammenfassende Vergleich dargestellt. Inwieweit und wo ein Einsatz von statischen Beschilderungen dennoch sinnvoll ist, ergibt sich aus den in einem ganzheitlichen Konzept gleichbleibenden Beschilderungen (vgl. Kapitel 5.8).

Aus den Erkenntnissen in Kapitel 5.1 und der Anwendung von WVZ in LED-Technik sind dynamische Anzeigen von Vorwarneinrichtungen wie sie bereits heute von Straßenausstattern angeboten werden, möglich. Die Vorwarnung des Fahrstreifen-einzuges kann zugunsten der Erkennbarkeit für die Fahrzeugführer und den Möglichkeiten, die eine WVZ in LED-Technik bietet, über eine Piktogramm-darstellung von Fahrstreifen und Fahrzeugen realisiert werden. Der Textteil der dynamischen Vorwarn- tafel kann je nach Erfordernis den frühen oder späten Fahrstreifenwechsel empfehlen. Die Ergän-

zung von Entfernungsangaben ist beim Reißverschlussverfahren notwendig (vgl. Kapitel 2.3). Text-zusätze oder der Verzicht auf Entfernungsangaben sowie die Anwendbarkeit als Zusatz oder Ersatz von statischen Beschilderungen nach StVO sind auf Zulässigkeit und Akzeptanz zu prüfen.

Die WVZ des Typs A zur Streckenbeeinflussung nach RWVZ (1997) sollen als limitierte WVZ in LED-Technik ausgeführt werden, sodass das WVZ in Betrieb (gelb blinkend) oder außer Betrieb (aus, Grundzustand) genommen werden kann.

5.3 Detektionskonzept

Die Detektoren liefern die Messwerte, welche in den Steuerungsalgorithmen genutzt werden, um automatisch Entscheidungen über die Anzeige zu treffen (vgl. Kapitel 4.3). Eine korrekte und genaue Erfassung der Messwerte bildet die wesentliche Grundlage für ein funktionierendes Steuerungssystem. Die Echtzeitdaten sind im Minutenintervall an die Steuerung zu übermitteln. Eine Fahrzeugklassifizierung nach TLS 2012 in Lkw und Pkw (2+1) ist nicht zwingend erforderlich.

Da es sich um eine temporäre Anlage handelt, sind unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten die Detektoren an einem Mast im Seitenbereich zu montieren. Die Energieversorgung und die Kommunikation der Detektoren mit der Vorortsteuerung soll sowohl netzgebunden als auch drahtlos möglich sein, um

Nummer	Titel	Beschreibung		Muss	Option	WVZ in LED Tech.	Prismentechnik	statische VZ	Zusatzkommentare
		erfüllt	C						
		teilweise erfüllt	PC						
		wird nicht erfüllt	NC						
2000									
Feat. 2001	Zuverlässigkeit			x		C	C	C	
Feat. 2002	Sichtbarkeit			x		C	C	C	
Feat. 2003	Energieverbrauch			x		PC	C	C	
Feat. 2004	Bildinhalte			x		C	NC	NC	
Feat. 2005	Wahrnehmung	mehr als 3 Bildinhalte sind anzuzeigen			x	C	PC	PC	aktive WVZ werden besser wahrgenommen als inaktive
	Auswahl								erfüllt die meisten Kriterien

Tab. 18: Vergleich von Technologien zur Signalisierung

den standortspezifischen Gegebenheiten gerecht werden zu können.

Es wurden unterschiedliche Detektionstechnologien wie Video, Induktionsschleifen, Magnetfeldsensoren und Seitenradar auf ihre Eignung grob bewertet. Tabelle 19 zeigt, dass das Seitenradar die wesentlichen Anforderungen am besten erfüllt und für unseren Anwendungsfall geeignet ist. Um Abschattungen im Detektionsbereich durch vorbeifahrende Lkw zu vermeiden, ist der Detektions-

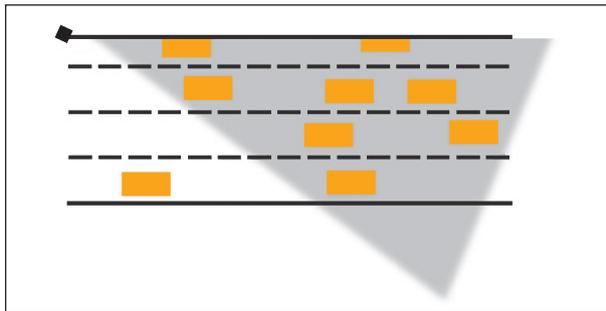


Bild 59: Seitenradar mit in Fahrtrichtung (von rechts nach links) ausgerichtetem Detektionsfeld

bereich entgegen der Fahrtrichtung auszurichten (Bild 59). Der Seitenradar sollte idealerweise 6 m über Oberkante Boden am Mast montiert werden. Bei der Aufstellung der Detektoren im Seitenstreifen sind die einschlägigen Richtlinien zur Aufrechterhaltung der Verkehrssicherheit zu beachten.

5.4 Energieversorgung

Die Energieversorgung der temporär zu errichtenden Anlagenkomponenten wie WVZ, Vorortsteuerung und Detektoren hat aufgrund wirtschaftlicher Gesichtspunkten netzautark zu erfolgen. Um eine kostengünstige Energieversorgung zu gewährleisten, sind energieeffiziente Komponenten einzusetzen. Wenn es die örtlichen Gegebenheiten erlauben, können zur Kostenoptimierung die Radar-detektoren über die Vorortsteuerung mit Energie versorgt werden. Eine Kabelverlegung über die Fahrbahn ist nicht erforderlich, da die Detektorstandorte und Vorortsteuerungen im Seitenstreifen aufgestellt werden.

Nummer	Titel	Beschreibung								Zusatzkommentare
			Muss	Option	Seitenradar	Magnetfeld	Induktionsschleifen	Video		
		erfüllt	C							
		teilweise erfüllt	PC							
		wird nicht erfüllt	NC							
2000										
Feat. 2001	Erfassung	Fahrzeugmenge, Verkehrsdichte bzw. Geschwindigkeit		x		C	C	C	C	
Feat. 2002	Fahrzeugklassifizierung	2 + 1 Klassen (PKW und LKW)			x	C	C	C	C	
Feat. 2003	Aufstellung im Seitenbereich	als Mastmontage		x		C	NC	NC	C	
Feat. 2004	Videobilder	zur Beobachtung des Verkehrsverhalten nicht für das Steuerungsverfahren relevant			x	NC	NC	NC	C	über separate IP Kamera realisierbar
Feat. 2005	Drahtlose Kommunikation	GPRS oder Funk mit zusätzlicher Kommunikationssteuer-einheit am Detektorstandort		x		C	C	C	C	
Feat. 2006	kostengünstig	Montage, Unterhalt, Anschaffung		x		C	C	C	NC	
Feat. 2007	geringer Energieverbrauch			x		C	C	C	NC	
	Auswahl					x				erfüllt die meisten Kriterien

Tab. 19: Bewertung von Detektionstechnologien

Im Einzelnen wurden die Energiequellen Photovoltaik, Brennstoffzellen, Windenergie und Generatoren auf ihre Eignung hin untersucht. Wie die Auswertung der Tabelle 20 zeigt, erfüllt die Photovoltaikanlage die zugrunde gelegten Anforderungen am besten. Die Dimensionierung der PV-Anlage ist standort- und jahreszeitabhängig und muss projektspezifisch erfolgen. Ein autarker Betrieb von sieben Tagen ist bei der Auslegung zugrunde zu legen. Eine Kombination unterschiedlicher Energiequellen wie z. B. Photovoltaik und Brennstoffzelle

kann in Einzelfällen in Betracht gezogen werden, wobei die Brennstoffzelle nur im Bedarfsfall zugeschaltet werden soll, um deren Betriebsdauer zu erhöhen und den Wartungsaufwand gering zu halten.

5.5 Datenübertragung

Analog dem Energieversorgungskonzept ist die Datenkommunikation aus wirtschaftlichen Gründen zwischen den Anlagenkomponenten wie WVZ,

Nummer	Titel	Beschreibung		Muss	Option	Photovoltaik	Brennstoffzelle	Windenergie	Generator	Zusatzkommentare
		erfüllt	C							
		teilweise erfüllt	PC							
		wird nicht erfüllt	NC							
2000										
Feat. 2001	Energiemenge ausreichend	ausreichende Energiemenge für eine Standzeit von 7 Tagen		x		C	C	NC	C	
Feat. 2002	Wartungsaufwand gering			x		C	NC	C	NC	
Feat. 2003	Anschaffungskosten günstig			x		C	NC	C	NC	
Feat. 2004	Installationsaufwand gering				x	C	PC	C	C	
	Auswahl									erfüllt die meisten Kriterien

Tab. 20: Bewertung von Energieversorgungstechnologien

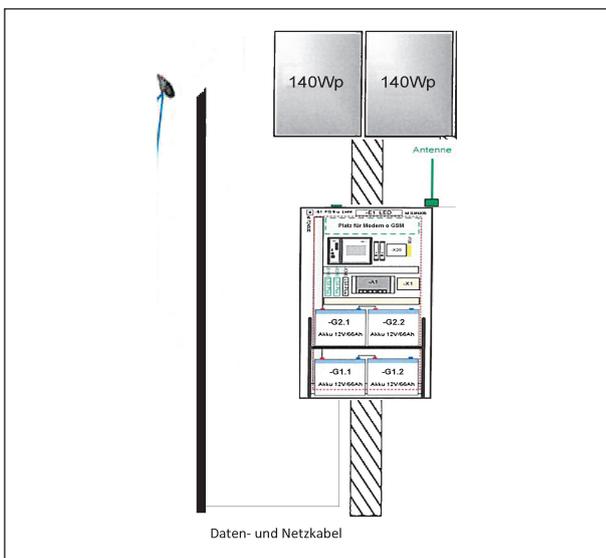


Bild 60: Energieversorgung Vorortsteuerung und Seitenradar

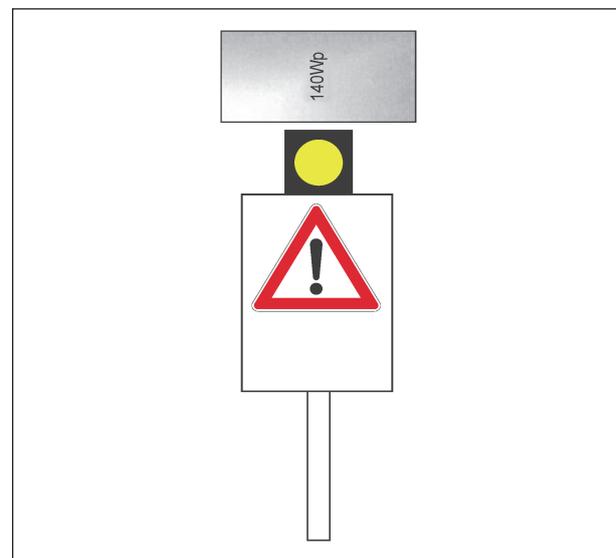


Bild 61: Energieversorgung WVZ

Detektoren, Vorortsteuerung und Zentrale drahtlos auszuführen. Sofern es aber die örtlichen Verhältnisse zulassen, kann zur Erhöhung der Datensicherheit und der Datenübertragungsrate eine drahtgebundene Kommunikationsstrecke zwischen Detektoren und Vorortsteuerung sinnvoll sein, zumal das Datenaufkommen bei den Detektoren relativ hoch ist.

Nachfolgend wurden die Datenübertragungstechnologien und Datenübertragungsmedien wie Mobilfunk (GPRS), Datenfunk und Kabel näher untersucht.

Wie Tabelle 21 zeigt, konnte anhand der zugrunde gelegten Kriterien keine Technologie gänzlich ausgeschlossen werden, was zu nachfolgend beschriebenen Mischsystem führt. Dieses Mischsystem vereint die Vorteile der unterschiedlichen Datenübertragungstechnologien.

Die Datenübertragung zwischen der Vorortsteuerung und den WVZ erfolgt per Datenfunk. Die Vorteile sind:

- kostengünstig,
- zuverlässig,
- Datensicherheit aufgrund eigener Funkfrequenz gegeben.

Die Funkstrecken müssen projektspezifisch überprüft werden.

Es können 868 MHz-Funktransceiver (Sender und Empfänger), welche mit einer 128 Bit AES-Datenverschlüsselung ausgestattet sind, eingesetzt werden.

Wenn es die Vorortsituation zulässt und die Vorortsteuerung zwischen den Detektorstandorten positioniert werden kann, um die Entfernungen nicht zu groß werden zu lassen (< 800 m), bietet sich eine drahtgebundene Kommunikation zwischen Vorortsteuerung und Detektoren an.

Die Vorteile hierbei sind:

- kostengünstig,
- zuverlässig,
- geringe Latenzzeit,
- gute Datensicherheit.

Die Datenübertragung zwischen der Vorortsteuerung und der Zentrale erfolgt mittels Mobilfunk (GPRS). Die Vorteile hierbei sind:

- hohe Bandbreite,
- gute Netzabdeckung, welche projektspezifisch zu überprüfen und zu optimieren ist,
- gute Datensicherheit auf Basis einer VPN-Verbindung.

Die Datenübertragung zwischen der Vorortsteuerung und der Steuerzentrale erfolgt am besten über

Nummer	Titel	Beschreibung						Zusatzkommentare	
			Muss	Option	Mobilfunk (GPRS)	Datenfunk	Kabelgebung		
		erfüllt	C						
		teilweise erfüllt	PC						
		wird nicht erfüllt	NC						
2000									
Feat. 2001	Verfügbarkeit			x		PC	PC	C	Modem mit automatischer Netzwahl (von GSM, UTMS, LTE)
Feat. 2002	Zuverlässigkeit			x		PC	PC	C	
Feat. 2003	Datensicherheit			x		PC	PC	C	GPRS Kommunikation über VPN Verbindung
Feat. 2004	kostengünstig			x		PC	C	NC	
Feat. 2005	geringer Installationsaufwand				x	C	C	NC	
	Auswahl								erfüllt die meisten Kriterien

Tab. 21: Bewertung von Datenübertragungstechnologien

Mobilfunk (GPRS), und um die Bandbreite zu gewährleisten und die Daten über eine große Entfernung übertragen zu können. Über eine VPN-Verbindung ist eine relative Datensicherheit gegeben.

Mit dem entsprechenden Modem kann die Datenübertragung der Anlagenkomponenten auch nach dem neuen Mobilfunkstandard G5 erfolgen.

5.6 Ausfallkonzept

5.6.1 Kommunikationsstörung

Zur Gewährleistung der Verkehrssicherheit im Falle von Anlagenstörungen, Kommunikationsstörungen und Störungen infolge fehlender Energieversorgung sind folgende Maßnahmen vorzusehen.

Beim Ausfall der Kommunikation zur SST gehen die WVZ-LED in einen definierten Grundzustand. Wobei als Grundzustand ein Geschwindigkeitstrichter nach den Notwendigkeiten der RSA definiert wird. Die ist auch der Fall, wenn nur vereinzelte WVZ-LED-Kommunikationsstörungen aufweisen.

Alternativ ist es sinnvoll, den letzten Anzeigehalt beizubehalten, wenn bei einer Drahtlosverbindung mit vereinzelten Kommunikationsunterbrüchen zu rechnen ist.

5.6.2 Störungen WVZ-LED

Um die Verkehrssicherheit bei Ausfällen einzelner WVZ-LED gewährleisten zu können, sind die letzten beiden Anzeigequerschnitte (600 m und 1.000 m) vor der Engstelle zusätzlich mit WVZ in Prismen-Technik (WVZ-PR) auszustatten, welche im Störfall der WVZ-LED automatische in einen Grundzustand (Geschwindigkeitstrichter 120 km/h auf 80 km/h) einlaufen. Die WVZ in Prismen-Technik können mittels einer mechanischen Bildrückführung, selbst bei Unterbrechung der Stromversorgung sicher in einen verkehrssicheren Grundzustand einlaufen. Alternativ können die WVZ in Prismen-Technik mit eigenen Akkus ausgestattet werden, wobei hierbei die Funktionsfähigkeit der Akkus regelmäßig zu prüfen ist.

Grundzustand der WVZ-PR im Störfall:

- AQ 600 m vor der Engstelle => 80 km/h,
- AQ 1.000 m vor der Engstelle => 120 km/h.

5.7 Kommunikationskonzept nach TLS

Die Kommunikation mit den Außenanlagen erfolgt gemäß TLS 2012. Die Steuerung besitzt eine aufeinander abgestimmte Funktionsverteilung, wobei die einzelnen Funktionsgruppen und das Steuermodul folgende Aufgaben übernehmen.

Das Steuermodul (SM) übernimmt die

- Steuerung des Datenaustausches zwischen Zentrale und E/A-Konzentratoren,
- Steuerung des Abfragerhythmus und der Übertragungsprozedur für die E/A-Konzentratoren auf dem Lokalbus.

Die E/A-Konzentratoren übernehmen die

- Erfassung und Aggregation von Verkehrsdaten der angeschlossenen Radardetektoren (FG1),
- Erfassung von Umfelddaten (Helligkeit) (FG3),
- Weitergabe von Steuerungsbefehlen an Wechselverkehrszeichen (FG4),
- Funktionsüberwachung und Statusmeldungen (FG6).

Die FG6 überträgt neben der Betriebsart Türkontakt-Steuerung auch den Akku-Ladezustand der

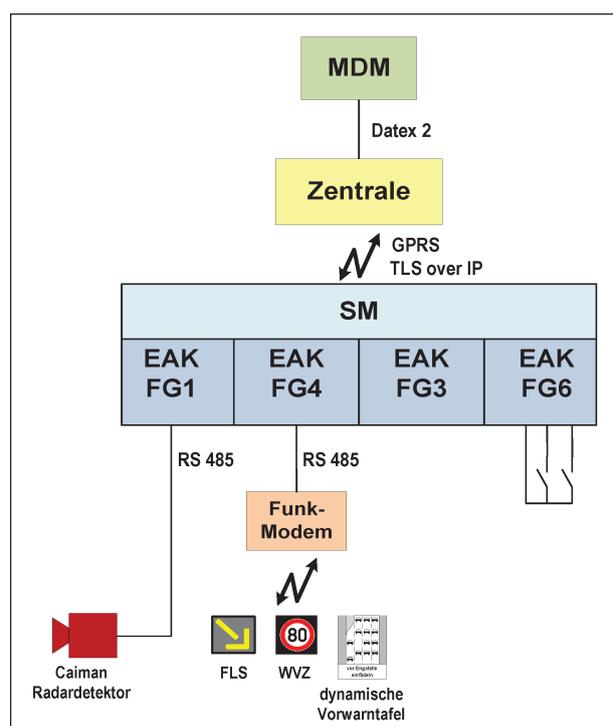


Bild 62: Übersicht Kommunikationskonzept

solarbetriebenen Anlagenkomponenten über das SM an die Zentrale.

In der Zentrale werden die erfassten Daten dem Steuerungsalgorithmus zur Weiterverarbeitung zur Verfügung gestellt.

Über die Zentrale können relevante Daten an den MDM weitergeleitet werden.

5.8 Signalisierungskonzept

Die Erkenntnisse zu Anzeigeninhalten und Anzeigentechnologien unter Berücksichtigung von Richtlinien sollen unter Anpassung auf den regelungstechnischen Entwurf in einem Signalisierungskonzept zusammenfließen.

Das Vorgehen bei der Entwicklung des Konzeptes beruht auf der Erkenntnis, dass sowohl den Vorgaben aus Richtlinien und Gesetzen, als auch den Ideen des erarbeiteten Steuerungskonzeptes genügt werden soll. Daher bietet sich eine Überlagerung der Anforderungen von RSA (blau dargestellt in Bild 63) und Steuerungskonzept (grün dargestellt in Bild 63). Nicht dargestellt, aber dennoch berücksichtigt werden Forderungen aus der StVO wie beispielsweise Mindestabstände von Geschwindigkeitsbeschränkungen im Geschwindigkeitstrich-

ter GTZ. Es ergibt sich im Endeffekt ein Konsens, der das Signalisierungskonzept beschreibt (gelb dargestellt in Bild 63).

Die Steuerung wird über VGB und die FWS signalisiert. Die FBA sowie deren Signalisierungskonzept sollen dabei als eigenständige, temporäre und mobile Anlage entwickelt werden.

Die ZD-VGB ist als maßgebende Geschwindigkeitsbeschränkung anzusehen, die die nachfolgende Geschwindigkeitsbeschränkung und die Signalisierung im Geschwindigkeitstrichter stromaufwärts beeinflusst. Es muss dabei ein Längsabgleich zwischen den einzelnen Signalisierungen stattfinden. Dies liegt zum einen an der Logik und dem Fluss der Steuerung und zum anderen an den einzuhaltenden maximalen Geschwindigkeitsstufen.

Hat die BSZ eine Länge von 600 m wie in Bild 63 gezeigt, so endet diese an einer Position, an der nach RSA die Einrichtung der Vorwarntafeln beginnt. Eine Einflussnahme auf das Fahrstreifenwechselverhalten soll damit, in Übereinstimmung mit dem erarbeiteten Steuerungskonzept, nur in der BSZ stattfinden.

Da die Geschwindigkeitsbeschränkung innerhalb der Engstelle unabhängig von der dynamischen FWS angeordnet werden muss, kann die Signali-

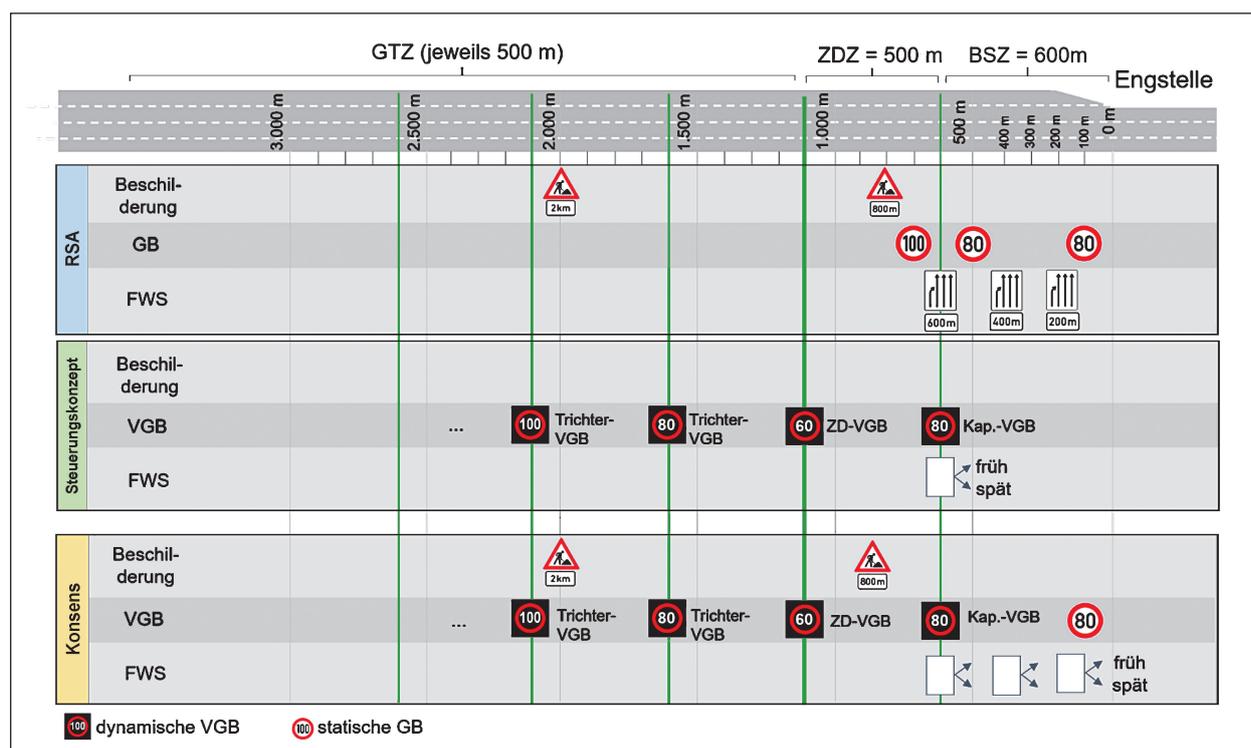


Bild 63: Signalisierungskonzept

5.8.1 Signalisierungskonzept 1

Signalisierungskonzept 1a

Signalisierungskonzept 1a beruht auf der Überlegung, für die Fahrstreifenwechselsignalisierung einen blinkenden Ankündigungspfeil (AP) bzw. Blinkpfeil für den linken Fahrstreifen mit 13 oder 15 Warnleuchten nach RSA oder aber auch nur 8 Warnleuchten, neben der Fahrbahn angebracht, einzusetzen. Dieser Pfeil ist ein Element der RSA und wird üblicherweise in Arbeitsstellen kürzerer Dauer wie beispielsweise in Regelplan D III/2b eingesetzt. Der Einsatz in Arbeitsstellen längerer Dauer wird jedoch in der RSA nicht explizit ausgeschlossen. Er wird neben der Fahrbahn angebracht, ist ein RSA-Element und kein Verkehrszeichen der StVO. Er ist demnach keine Anordnung, sondern dient der Vorwarnung.

Da AP als Element der Vorwarnung nicht an einem gemeinsamen Ort wie die Vorwarntafeln errichtet werden sollen, wird vorgeschlagen, den AP 500 m (anstatt 600 m) stromaufwärts der Engstelle anzubringen (vgl. Bild 65). Der geringe Versatz zwischen der ersten Vorwarntafel und dem Pfeil von 100 m wird als nicht wesentlich nachteilig für die Kommunikationswirkung, jedoch als regelkonform eingeschätzt. Eine Überforderung der Verkehrsteilnehmer und Schwierigkeiten bei der gemeinsamen Anbringung von VGB, Vorwarntafeln und AP an einem Standort werden so vermieden.

Technisch sollen die AP über umfahrbare Anlagen auf dem Mittelstreifen, wie es die RSA z. B. bei Arbeitsstellen kürzerer Dauer in Regelplan D III/3b vorsieht, realisiert werden.

Die Vorwarntafeln werden als statische Schilder nach RSA angebracht und weisen das Reißverschlussverfahren an.

Für den frühen Fahrstreifenwechsel wird der AP 500 m vor der Engstelle aktiviert und für den späten Fahrstreifenwechsel deaktiviert (Bild 66). Im Falle des frühen Fahrstreifenwechsel wird demnach ein gegenüber dem Reißverschlussverfahren verfrühter Fahrstreifenwechsel empfohlen bzw. über die Vorwarnung werden die Verkehrsteilnehmer animiert, bereits zu einem früheren Zeitpunkt (wenn möglich) den Fahrstreifen zu wechseln.

Nach RSA sollen statische Vorwarntafeln mit einem Seitenabstand von 1,50 m innerhalb von Arbeitsstellen aufgestellt werden (RSA 1995, S. 12). Die Warnung vor der Baustelle mit Zeichen 123 StVO von dem Steuerungskonzept unbeeinflusst.

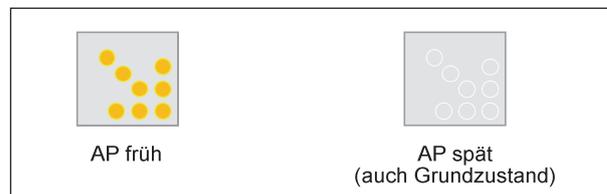


Bild 66: Signalisierungskonzept 1a – FWS (neben der Fahrbahn)

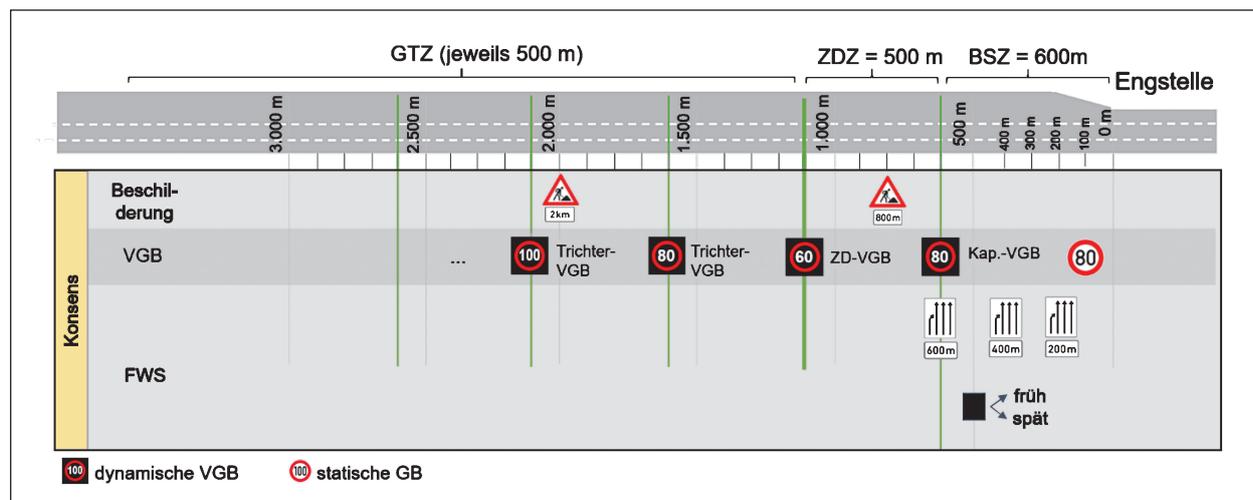


Bild 65: Signalisierungskonzept 1a

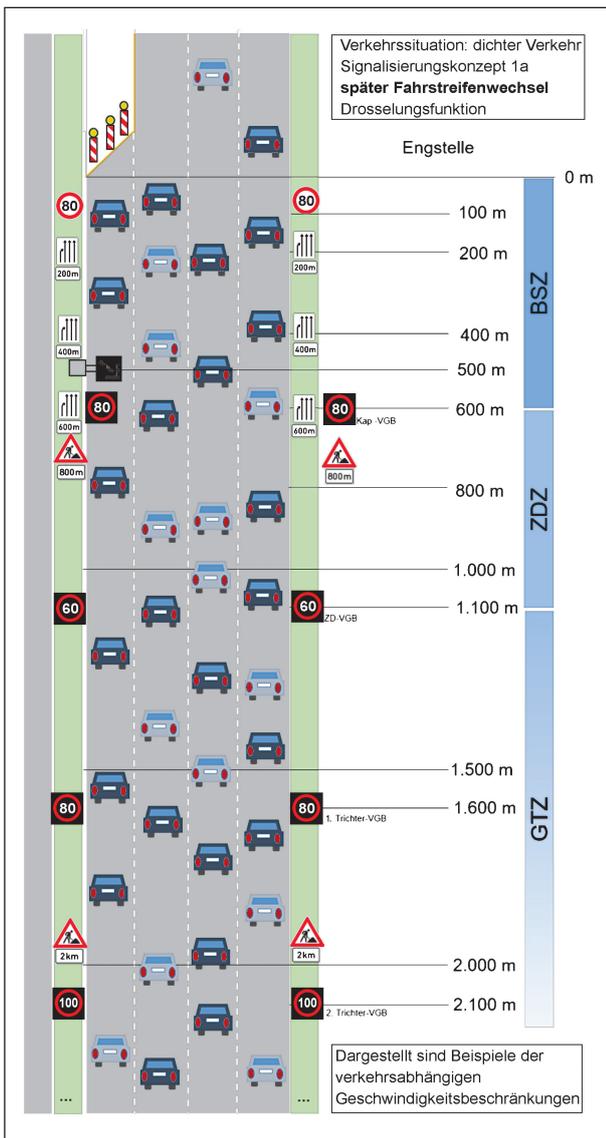


Bild 67: Signalisierungskonzept 1a – Streckenplan später FWS (ZD-VGB = 60 km/h)

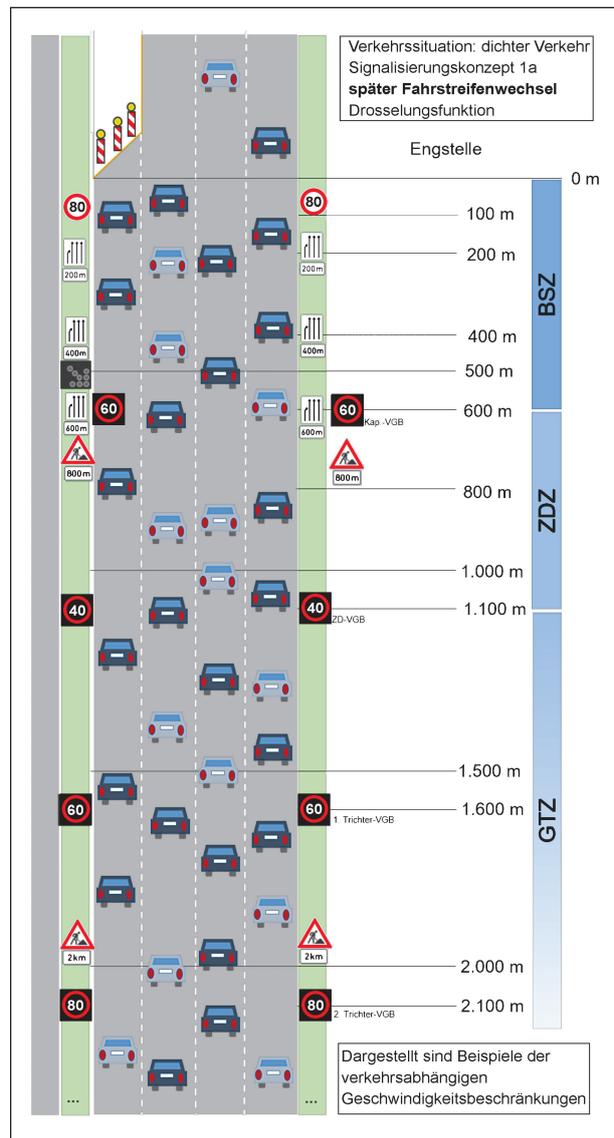


Bild 68: Signalisierungskonzept 1a – Streckenplan später FWS (ZD-VGB = 40 km/h)

Zur Illustration sind in den Bildern 67 bis 69 in Vereinfachung folgende Fälle dargestellt:

- Signalisierungskonzept 1a: Stauzustand, ZD-VGB = 60 km/h und entsprechender Geschwindigkeitstrichter nach RSA (Bild 67),
- Signalisierungskonzept 1a: Stauzustand, ZD-VGB = 40 km/h und entsprechender Geschwindigkeitstrichter nach RSA (Bild 68),
- Signalisierungskonzept 1a: kein Stauzustand, einfacher Geschwindigkeitstrichter nach RSA (Bild 69).

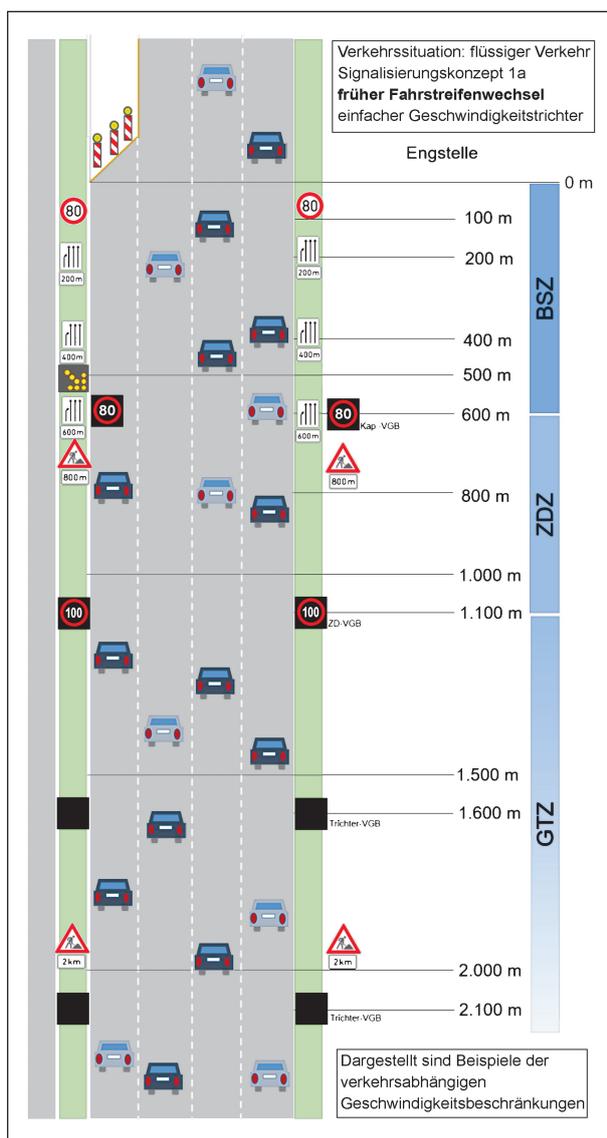


Bild 69: Signalisierungskonzept 1a – Streckenplan früherer FWS

Signalisierungskonzept 1b

Im Signalisierungskonzept 1b wird vorgeschlagen, den Fahrstreifenwechsel über Dauerlichtzeichen (WVZ Typ A zur Streckenbeeinflussung) anzuordnen.

Das Dauerlichtzeichen „gelb blinkender, schräg nach unten gerichteter Pfeil“ ordnet an „Fahrstreifen in Pfeilrichtung wechseln“ (§ 37 Abs. 3 StVO). Derartige Lichtzeichen sind nach VwV-StVO zu § 37 Abs. 3 StVO, falls erforderlich, in angemessenen Abständen zu wiederholen. Auf den Positionen 400 m und 200 m vor der Engstelle wird auf die Darstellung eines weiteren Dauerlichtzeichens (DLZ) verzichtet. Dies wird damit begründet, dass



Bild 70: Signalisierungskonzept 1b – FWS (über der Fahrbahn)

eine weitere Wiederholung des Zeichens an diesen Stellen nicht erforderlich ist und möglicherweise der Idee des frühen Fahrstreifenwechsels entgegenstehen würde, indem die Ausdehnung der Wechselzone bis an die Engstelle heran verdeutlicht wird. Es wird angenommen, dass sich Verkehrsteilnehmer, wenn sie erkennen, dass auf eine relativ kurze Distanz von beispielsweise wenigen hundert Metern erneut ein DLZ steht, sie sich dennoch erst recht spät einordnen könnten. Auf die Wiederholung des DLZ wird daher verzichtet.

DLZ werden fahrfstreifenbezogen über der Fahrbahn angebracht, sie sind Anordnungen nach StVO. Sie sollen nicht am gleichem Standort stehen wie Vorwarntafeln, daher wird analog zu Signalisierungskonzept 1a vorgeschlagen, den Standort des DLZ auf die Position 500 m vor der Engstelle zu verschieben (vgl. Bild 65).

Für den frühen Fahrstreifenwechsel wird das WVZ 500 m vor der Engstelle aktiviert. Es liegt ein einfacher Geschwindigkeitstrichter vor. Für den späten Fahrstreifenwechsel wird das WVZ deaktiviert (Bild 70). Bei deaktivierten DLZ gilt das Reißverschlussverfahren gemäß der Vorwarntafeln (statisch) nach RSA. Die Drosselungsfunktion ist aktiv.

Die technische Ausführung der Überkopfsignalisierungen kann sich z. B. an dem niederländischen Vorbild Mobiele Rijkstrooksignalering (MRS) und den Erkenntnissen des FE 82.358/2008 (KEMPER et al., 2012) orientieren. Schilder an Kragarmen werden prinzipiell als am auffälligsten und deutlichsten, aber auch am aufwendigsten bezeichnet (RWBA 2000, S. 20). Die Anwendung von Dauerlichtzeichen, welche mithilfe der Überkopfsignalisierungen angebracht werden sollen, wird in der StVO sowie der VwV-StVO geregelt.

Die MRS in der im Bericht aufgeführten Praxis ist derzeit für zwei- oder dreistreifige Richtungsfahrbahnen vorgesehen. Es wird zudem beschrieben,

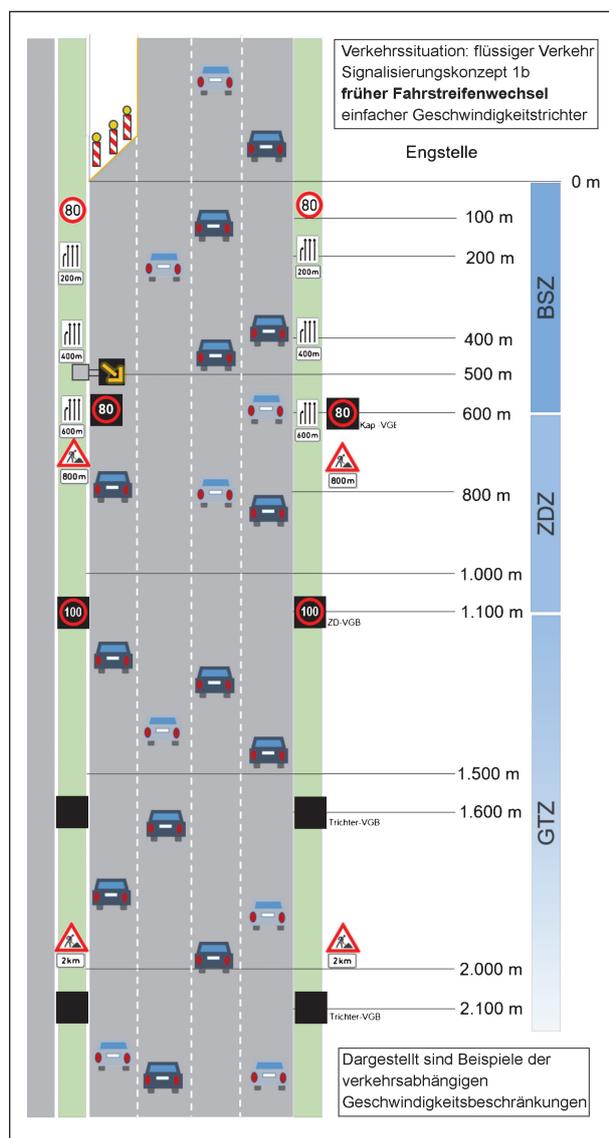


Bild 73: Signalisierungskonzept 1b – Streckenplan früher FWS

Alle Anzeigeninhalte sind StVO-konform. Über das An- und Ausschalten des DLZ wird in Signalisierungskonzept 1b die Räumung des Einzugsfahrstreifens angeordnet. Diese soll dann in Erweiterung des klassischen Reißverschlussverfahrens auch eher als unmittelbar vor der Engstelle erfolgen.

Zur Illustration sind in den Bildern 71 bis 73 in Vereinfachung folgende Fälle dargestellt:

- Signalisierungskonzept 1b: Stauzustand, ZD-VGB = 60 km/h und entsprechender Geschwindigkeitstrichter nach RSA (Bild 71),
- Signalisierungskonzept 1b: Stauzustand, ZD-VGB = 40 km/h und entsprechender Geschwindigkeitstrichter nach RSA (Bild 72),
- Signalisierungskonzept 1b: kein Stauzustand, einfacher Geschwindigkeitstrichter nach RSA (Bild 73).

5.8.2 Signalisierungskonzept 2

Die Basis von Signalisierungskonzept 2 ist neben den VGB, deren Idee und Technologie in allen Konzepten unverändert beibehalten wird, die in Bild 74 dargestellten drei Anzeigenstandorte auf den Positionen 600 m, 400 m und 200 m. An diesen Standorten sollen drei in der Regel dynamische VWT eingesetzt werden.

Für die konkrete Ausführung der VWT sollen verschiedene Varianten diskutiert werden.

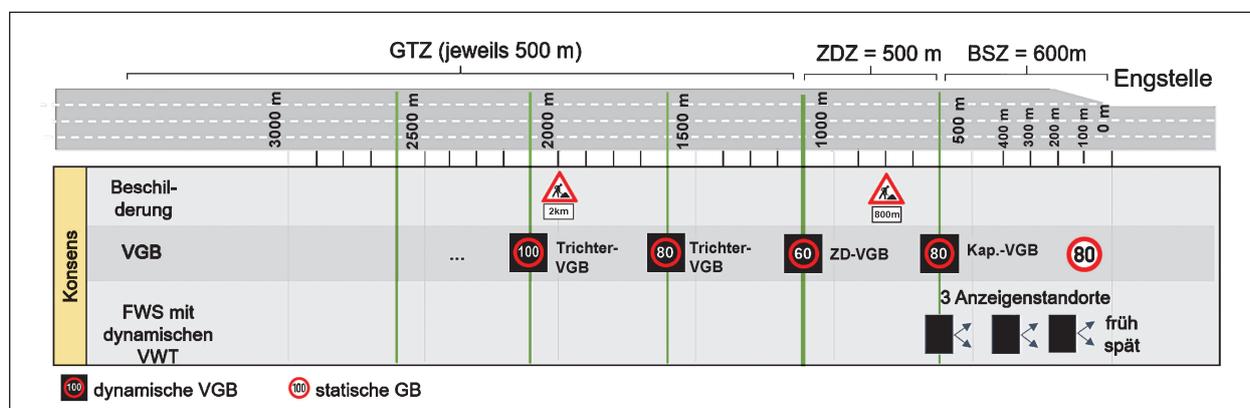


Bild 74: Signalisierungskonzept 2

Die Innovation der vorliegenden Arbeit liegt in der Entwicklung eines effektiven Steuerungsverfahrens, das den Verkehrsablauf verbessern soll. Auf Grundlage dieser bislang noch nicht bekannten Strategie ergibt sich zwangsläufig die Entwicklung auch abweichender FWS, welche zugleich die Steuerungsverfahren angemessen kommunizieren sollen und in weiten Teilen auch mit bisherigen Regelwerk konform sein sollen, um Anpassungen dieser zu vermeiden. Es wurde daher ein Vorschlag für ein Konzept, welches wie das bisher bekannte Reißverschlussverfahren auf Vorwarntafeln beruht, erarbeitet. Dieser Vorschlag enthält auf Grundlage der Innovationen der Steuerung daher Anzeigeninhalte, die an die bekannten Inhalte angelehnt, aber dennoch neu sind und deren Zulässigkeit gesondert zu prüfen ist. Die Neuartigkeit der Anzeigen begründet sich dabei im Wesentlichen auf der Idee den Funktionsumfang und die Vorteile von modernen WVZ zugunsten einer schnellen Erkennbarkeit und auf-

wandsamen Umstellung zwischen den beiden Steuerungsvarianten auszunutzen. Es wird eine hohe Verständlichkeit und gute Akzeptanz der Anzeigen erhofft. Daneben sind jedoch auch die Aspekte der Ausfallsicherheit sowie die mögliche Notwendigkeit von statischen Beschilderungen als Rückfallebene zu diskutieren.

Signalisierungskonzept 2b

Die Signalisierungskonzepte 2b, 2c und 2d bauen auf dem Signalisierungskonzept 2a auf. Das Signalisierungskonzept 2b unterscheidet sich zu 2a lediglich dahingehend, dass für das System später Fahrstreifenwechsel das StVO-konforme Zeichen 531-22 angezeigt wird.

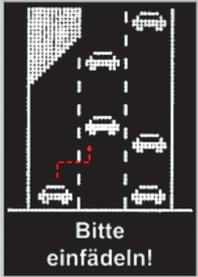
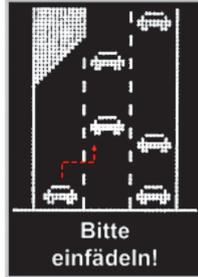
Konzept 2b: FWS VWT – früher Fahrstreifenwechsel			
			Merkmale der Anzeige <ul style="list-style-type: none"> • drei dynamische VWT • weniger dichter Verkehr dargestellt • Darstellung eines (wenn möglich) frühzeitigen Einordnens auf längerem Abschnitt • Fahrzeuge auf rechtsliegendem Nebenfahrbahnstreifen, welche ein Einfädeln von links zulassen
Bitte einfädeln!	Bitte einfädeln!	Bitte einfädeln!	
FWS früh - 600 m	FWS früh - 400 m	FWS früh - 200 m	
<p>--> animierte Grafik eines sich (wenn möglich) frühzeitig über längeren Abschnitt einfüdelnden Fahrzeuges</p>			

Bild 77: Signalisierungskonzept 2b – früher FWS

Konzept 2b: FWS VWT – später Fahrstreifenwechsel			
			Merkmale der Anzeige <ul style="list-style-type: none"> • drei dynamische VWT • Darstellung von Zeichen 531-22 nach StVO • entspricht Reißverschlussprinzip
Reißverschluss in 600 m	Reißverschluss in 400 m	Reißverschluss in 200 m	
FWS spät - 600 m	FWS spät - 400 m	FWS spät - 200 m	
Anzeige von Zeichen 531-22 StVO			

Bild 78: Signalisierungskonzept 2b – später FWS

Signalisierungskonzept 2c

Im Signalisierungskonzept 2c wird aufbauend auf Konzept 2b die dritte VWT für beide Systeme durch eine statische VWT ersetzt. Es wird davon ausgegangen, dass diese Variante kostengünstiger als in den Varianten 2a und 2b ist. Ein Ersatz der dritten dynamischen VWT durch eine statische VWT im Abstand von 200 m vor der Engstelle bietet sich an, da an dieser Stelle dann, unabhängig von den Steuerungskonzepten, das spätestens das Reißverschlussverfahren stattfinden soll. Die Anzeigen des Zeichens 531-22 nach StVO entsprechen, entweder dynamisch oder statisch, den Vorgaben der RSA.

Signalisierungskonzept 2d

Im Signalisierungskonzept 2d werden zwei VWT in Prisma-Technik vorgeschlagen, welche ähnlich wie in Konzept 2c um eine statische VWT im Bereich unmittelbar vor der Engstelle ergänzt werden. Auf dem variablen Teil des aktiven Verkehrszeichens sollen entweder drei kleine Pfeile dargestellt werden, die einen wenn möglich frühzeitig Wechsel veranschaulichen sollen. Für den späten Fahrstreifenwechsel werden auf allen drei VWT das Zeichen 531-22 StVO angezeigt. Die Prisma-Technik bietet den Vorteil der Kostenersparnis und der sicheren Rückfallebene bei beispielsweise Stromausfall.

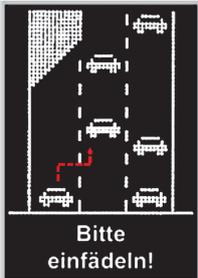
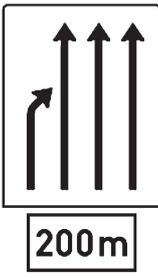
Konzept 2c: FWS VWT – früher Fahrstreifenwechsel			
 <p style="text-align: center; font-weight: bold;">Bitte einfädeln!</p>	 <p style="text-align: center; font-weight: bold;">Bitte einfädeln!</p>	 <p style="text-align: center; font-weight: bold;">200m</p>	<p style="text-align: center; font-weight: bold;">Merkmale der Anzeige</p> <ul style="list-style-type: none"> • zwei dynamische VWT • weniger dichter Verkehr dargestellt • Darstellung eines (wenn möglich) frühzeitigen Einordnens auf längerem Abschnitt • Fahrzeuge auf rechtsliegendem Nebenfahrbahnstreifen, welche ein Einfädeln von links zulassen • eine statische VWT Zeichen 531-22 StVO
<p>FWS früh - 600 m FWS früh - 400 m FWS früh – 200 m</p> <p>→ animierte Grafik eines sich (wenn möglich) frühzeitig über längeren Abschnitt einfädelnden Fahrzeuges</p>			

Bild 79: Signalisierungskonzept 2c – früher FWS

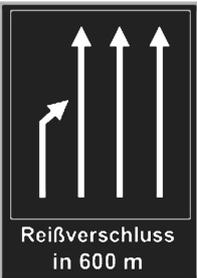
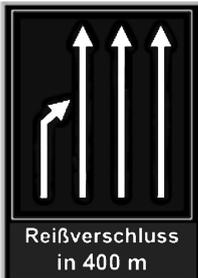
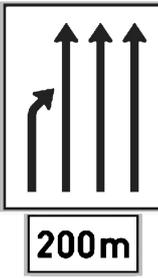
Konzept 2c: FWS VWT– später Fahrstreifenwechsel			
 <p style="text-align: center; font-weight: bold;">Reißverschluss in 600 m</p>	 <p style="text-align: center; font-weight: bold;">Reißverschluss in 400 m</p>	 <p style="text-align: center; font-weight: bold;">200m</p>	<p style="text-align: center; font-weight: bold;">Merkmale der Anzeige</p> <ul style="list-style-type: none"> • zwei dynamische VWT • und eine statische VWT • Darstellung von Zeichen 531-22 StVO • entspricht Reißverschlussprinzip
<p>FWS spät - 600 m FWS spät - 400 m FWS spät – 200 m</p> <p>Anzeige von Zeichen 531-22 StVO</p>			

Bild 80: Signalisierungskonzept 2c – später FWS

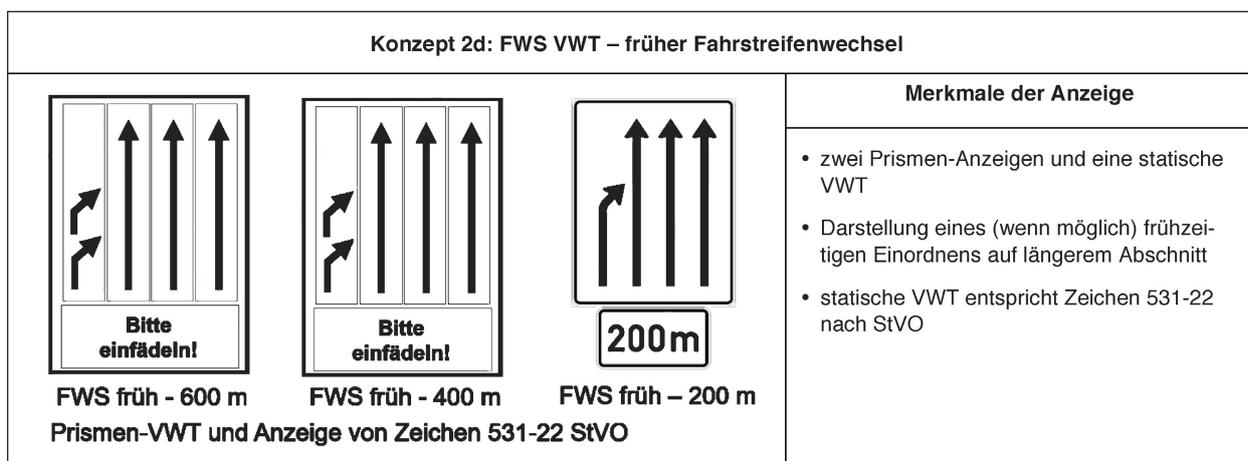


Bild 81: Signalisierungskonzept 2d – früher FWS

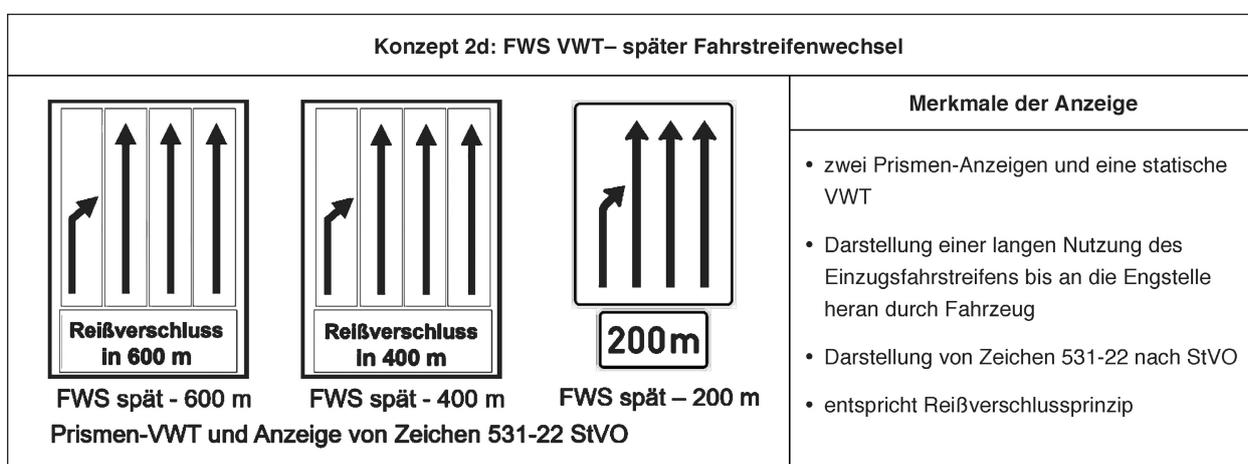


Bild 82: Signalisierungskonzept 2d – später FWS

5.9 Befragungen von Verkehrsteilnehmern und Experten

5.9.1 Verkehrsteilnehmerbefragung

Um das Verhalten von Verkehrsteilnehmern vorab abzuschätzen, wurden verschiedenen Verkehrssituationen und Anzeigen grafisch visualisiert, den Verkehrsteilnehmern präsentiert und deren Verhalten abgefragt. Dazu wurde folgende Situation beschrieben: Stellen Sie sich vor, Sie befahren den linken Fahrstreifen einer vierstreifigen Autobahn. Ihnen wurde mit entsprechender Beschilderung eine Baustelle angekündigt. Im Folgenden erleben Sie sechs Situationen, die sich in der Verkehrsstärke und/oder den Verkehrszeichen unterscheiden. Wie reagieren Sie?

Im Anschluss wurden die aufgeführten Fälle für die Position 600 m vor der Engstelle visualisiert (siehe Tabelle 22).

Für die Fälle dynamische Vorwarntafeln wurden Fahrzeuge als Piktogramme dargestellt. Die Fahrzeuge auf dem einzuziehenden Fahrstreifen ordnen sich in der Visualisierung bei flüssigem Verkehr zeitig und bei dichtem Verkehr kurz vor der dargestellten Engstelle ein. Im Fall gelber Blinkpfeil wird über dem linken Fahrstreifen ein Blinkpfeil dargestellt.

Es wurden alle sechs Fälle anschaulich, aber in Vereinfachung zu realen Umgebungen, präsentiert und eine spontane Reaktion des Verhaltens abgefragt. Im Anschluss an die Präsentation wurde das richtige bzw. falsche Verhalten in den einzelnen Fällen diskutiert und Meinungen eingeholt.

	ohne FRBA	mit FRBA dynamische Vorwarntafeln	mit FRBA gelber Blinkpfeil
flüssiger Verkehr	Fall 1	Fall 3	Fall 5
dichter Verkehr	Fall 2	Fall 4	Fall 6

Tab. 22: Fälle der Verkehrsteilnehmerbefragung

Im Folgenden sind die wesentlichen Reaktionen zusammengefasst:

- Verkehrsteilnehmer haben bei der heutigen Kommunikation über statische Vorwarntafeln (z. B. Zeichen 531-22 StVO) Unsicherheiten zum Einfädelvorgang. Ein sofortiges Einfädeln auch bei Anzeige des Reißverschlussverfahrens in 600 m ist nicht unüblich, ein Einfädeln kurz vor der Engstelle wird nach der Erfahrung der befragten Verkehrsteilnehmer mitunter bei anderen Verkehrsteilnehmern auch als Reindrängeln missverstanden und führt zu Konflikten. Es ist daher anzunehmen, dass Verkehrsteilnehmer in der Praxis eher nicht zu einem zeitigen Einfädeln aufgefordert, sondern eher zu einer langen Nutzung des Einzugsfahrstreifens ermuntert werden sollten.
- Verkehrsteilnehmer zeigten bei der Anzeige verschiedener Varianten der FRBA tendenziell weniger Unsicherheiten als bei der Varianten ohne FRBA.
- Verkehrsteilnehmer bewerten konkrete Verhaltensaufforderungen positiv (Blinkpfeil an einer konkreten Stelle oder einen Textzusatz wie „Bitte einfädeln“).
- Verkehrsteilnehmer bewerten Anzeige mit Piktogrammen eher kritisch, da zwischen den zwei Zuständen bei Vorbeifahrt mit vergleichsweise hohen Geschwindigkeiten möglicherweise kaum Unterschiede wahrgenommen werden können.
- Verkehrsteilnehmer befürworten eine intelligente Dynamisierung von Einfädelvorgängen in den Abschnitten vor Baustellen, sehen aber die Verständlichkeit und insbesondere die Akzeptanz, richtige Umsetzung und Befolgsrate in der Praxis kritisch.

5.9.2 Expertenbefragung

Methodik

Es wurde eine zweiteilige Befragung in Korrespondenz mit Experten aus unterschiedlichen Tätigkeits-

bereichen durchgeführt. In einem ersten Teil der Befragung, die telefonisch erfolgte, wurden konkrete Inhalte zum Thema Signalisierungskonzept erläutert, um Antworten auf die folgenden Fragen zu erhalten:

- Welche Arten der Signalisierung sehen Sie für diese Aufgabe?
- Bewerten Sie Ihre eigenen Ideen. Wo könnten Schwierigkeiten auftreten?
- Welche Regelwerke und Normen sehen Sie bei der Visualisierung und Signalisierung als besonders relevant an?

Der zweite Teil der Befragung basiert auf einem per Mail an die Teilnehmer versendeten Dokument, welches die entwickelten Signalisierungskonzepte umfasst. Der Vorteil dabei besteht darin, dass die teilnehmenden Experten zunächst unabhängig eigene Ideen entwickeln und kommunizieren konnten (Teil 1) und erst im zweiten Teil die erarbeiteten Vorschläge präsentiert bekamen. Es wurden die Konzepte 1, 2a und teilweise auch 2d präsentiert.

Zu dem versendeten Dokument wurden die folgenden beiden Fragen gestellt, die in einem schriftlichen Rücklauf beantwortet werden sollten:

- Wie bewerten Sie unsere Vorschläge der Signalisierung (auch im Vergleich mit Ihren eigenen Vorstellungen und Ideen)?
- Wo sehen Sie Verbesserungsbedarf? Was sehen Sie kritisch?

Die wesentlichen Ergebnisse der Befragung sind nachfolgend kurz zusammengefasst.

Telefonische Befragung

Frage 1: Welche Arten der Signalisierung sehen Sie für diese Aufgabe?

- Genannt wurde eine Signalisierung mittels Blinkpfeilen (Überkopfsignalisierung).
- Oft angesprochen wurde die dynamische Anzeige (LED) in Kombination mit Textzusätzen wie

Einfädeln in ... m, Reißverschluss in ... m bzw. Einfädeln lassen oder ohne Textzusatz.

- Auch andere Methoden, wie z. B. eine dynamische durchgezogene Linie am einzuziehenden Fahrstreifen nach amerikanischem Vorbild, Sperrkreuz als Überkopfsignalisierung über dem einzuziehenden Fahrstreifen oder das kanadische System (ausklappbare Schranken mit gestaffelter Länge an Warnbaken) wurden diskutiert.

Frage 2: Bewerten Sie Ihre eigene Idee! Wo könnten Schwierigkeiten auftauchen?

- Hauptproblem ist die Richtlinienkonformität,
- Akzeptanz und Verständlichkeit der Verkehrsteilnehmer muss gewährleistet werden,
- Verkehrsteilnehmer sollen nicht überfordert werden,
- aktives Einwirken auf Verhalten soll bewirkt werden,
- Ausfallsicherheit der LED-Anzeigen beachten,
- Internationalität der Anzeigen beachten (Piktogramme leichter verständlich als Texte),
- Flexibilität und Wahrheitsgehalt der Anzeige (korrekte Anzeige eines Bildes je nach Zustand) wichtig.

Frage 3: Welche Regelwerke und Normen sehen Sie bei der Visualisierung und Signalisierung als besonders relevant an?

- RSA (genannt von 6 Experten),
- StVO (genannt von 5 Experten),
- RWVZ (genannt von 3 Experten),
- VwV-StVO (genannt von 2 Experten),
- RWVA/RWVZ (genannt von 2 Experten),
- HUS (Hinweise zu umsetzbaren Stauwarnanlagen) (genannt von 1 Experten),
- ZTV (genannt von 1 Experten),
- RAA (genannt von 1 Experten),
- RiLSA für Fahrstreifensignalisierung (indirekt anzuwenden) (genannt von 1 Experten),
- RAT (genannt von 1 Experten).

Bewertung der Konzepte

Aus den Rückläufen des zweiten Teiles der Befragung gehen im Wesentlichen die folgenden Punkte hervor:

Frage 1: Wie bewerten Sie unsere Vorschläge der Signalisierung?

- Experten sehen Handlungsbedarf für dynamische Signalisierung im Hinblick auf eine reibungslose Abwicklung des Verkehrs an Engstellen.
- Experten begrüßen und unterstützen Projekt, welches positive Resonanz erfährt.
- Experten sind von guten Ergebnissen der Simulation angetan und bewerten die Idee der dynamischen Fahrstreifenwechselbeeinflussung und insbesondere der Zuflussdosierung über Geschwindigkeitsdrosselung positiv.

Frage 2: Wo sehen Sie Verbesserungsbedarf? Was sehen Sie kritisch?

- Experten empfinden Geschwindigkeitsbeschränkung von 40 km/h als schwierig.
- Experten sehen die vollständig regelkonforme Umsetzung der Fahrstreifenwechselsignalisierung schwierig, laut Experten werden folgende Punkte als besonders schwierig erachtet:
 - nicht RSA-konforme VWT,
 - fragliche Erkennbarkeit und Verständlichkeit unterschiedlicher Inhalte bei Vorbeifahrt (unterschiedliche Arten von Piktogramm- oder Pfeildarstellungen bei dynamischen VWT),
 - fragliche internationale Verständlichkeit von Textzusätzen auf VWT,
 - Nachweisbarkeit der positiven oder messbaren Effekte von dynamischer Fahrstreifenwechselsignalisierung, Erprobung auf Teststrecke sehr wünschenswert.
- Uneinigkeit und Unsicherheiten wie man abgefordertes Verhalten am besten visualisieren kann.
- Überarbeitung von Regelwerken zur einfacheren Umsetzung dynamischer Steuerung erwünscht/begrüßt.

5.10 Interpretation der Ergebnisse und Fazit

Aus der Befragung von Verkehrsexperten und Verkehrsteilnehmern konnten zahlreiche Meinungen zur Engstellensignalisierung aus unterschiedlichen Blickwinkeln eingeholt werden.

Als markanteste Punkte in der Befragung der Verkehrsteilnehmer konnten die Unsicherheiten mit dem Umgang von Vorwarntafeln, die das Reißverschlussverfahren ankündigen, benannt werden. Diese Unsicherheiten beziehen sich zum Einen auf das tatsächliche richtige Verhalten im Kontext zu anderen Verkehrsteilnehmern, deren Verhalten sich auf das individuelle Verhalten auswirkt, und zum Anderen auf unterschiedliche Verkehrssituationen, in denen bereits heute trotz identischer Signalisierung unterschiedlich reagiert wird. Fließt der Verkehr flüssig, neigen Verkehrsteilnehmer dazu, sich bereits weit (im Fallbeispiel bereits ab 600 m) vor der Engstellerechts einzufädeln. Eine dynamische Fahrstreifenwechselsignalisierung würde demnach das intuitive Verhalten der Verkehrsteilnehmer unterstützen.

Die Befragung von Experten ergab im Wesentlichen ein recht einheitliches Meinungsbild. Im Anbetracht des in Realität erforderlichen Engstellenmanagements, nicht nur an Arbeitsstellen, erscheint eine dynamische Signalisierung sinnvoll. Dazu wurden zahlreiche Ideen diskutiert, deren Ansätze im Wesentlichen mit den erarbeiteten Konzepten übereinstimmen. Neben Unklarheiten einer optimalen Signalisierung zum Fahrstreifenwechsel, deren praktische Erprobung zwingend notwendig ist, wird insbesondere die Regelkonformität als kritisch bewertet. Mit heute vorhandenen Regelwerken ist

eine regelkonforme Signalisierung dieser neuen Ansätze kaum möglich. Eine Überarbeitung dieser Regelwerke im Sinne einer Flexibilisierung der Signalisierungen ist wünschenswert.

5.11 Kostenschätzung

Die Kostenschätzung in Tabelle 23 gibt Richtpreise für den Kauf einer FBA-Anlage. Entsprechend der gewünschten Ausführungsvariante können Preispositionen entfallen (z. B. bei Signalisierungsvariante 1 entfällt die Position Dyn. Vorwarntafel). Je nach Anwendungsfall können auch Mietmodelle analog von Baustellensignalisierung in Betracht gezogen werden.

Die Kostenschätzung für die Lieferung, Montage und Inbetriebnahme der FBA gemäß dem beschriebenen Konzept beläuft sich auf ca. 340.000,00 EUR. Die Anlage kann mehrfach wiederverwendet werden.

Kosten für die Verkehrssicherung für den Auf- und Abbau der Anlage kann hier nicht spezifiziert werden, da die Anforderungen an die Verkehrssicherung örtlich sehr unterschiedlich sind. Als grober Richtwert, kann mit ca. 15.000 EUR/Verkehrssicherung gerechnet werden. Die Montagearbeiten für die FBA sollten mit dem Verkehrssicherer der gesamten Baumaßnahme abgestimmt und koordiniert werden.

6 Fazit

Im Rahmen des FE wurde eine Fahrstreifenreduktionsbeeinflussungsanlage (FBA) zur Besserung

Lieferung		[€/St.]	[€]
Zentrale	1,00 St.	50.000,00	50.000,00
Streckenstation inkl. Software, Solar und Kommunikation	1,00 St.	20.000,00	20.000,00
Radardetektor inkl. Solar, Mast und mobiles Fundament	4,00 St.	6.000,00	24.000,00
WVZ inkl. Solar, Mast und mobilem Fundament	8,00 St.	15.500,00	124.000,00
FLS inkl. Solar, Kragarm und mobilem Fundament	1,00 St.	28.000,00	28.000,00
Dyn. Vorwarntafel Solar, mit Mast und mobilem Fundament	3,00 St.	18.500,00	55.500,00
Gesamt	301.500,00		
Montage, Inbetriebnahme und Demontage	1 psch		39.000,00
Wartung	1 psch		2.500,00
Ohne An/Abfahrt, Wartungsintervall 6 Monate			

Tab. 23: Kostenschätzung

Ausnutzung der Kapazität an Engstelle entwickelt. Diese besteht im Wesentlichen aus den beiden Komponenten Fahrstreifenwechselbeeinflussung und Geschwindigkeitsbeeinflussung (zur Zuflussdosierung) mit vorgeschaltetem Geschwindigkeitsrichter. Die beiden Komponenten können auch unabhängig voneinander eingesetzt werden. Die Steuerung basiert auf einem Regelkreis, der im Gegensatz zu klassischen Schwellenwertverfahren die Signalisierung unter Berücksichtigung der Reaktion der Verkehrsteilnehmer und vorgegebener Grenzen (z. B. Geschwindigkeitsbegrenzung zwischen 100 km/h bei freiem Verkehr und 40 km/h bei dichtem Verkehr) so lange anpasst, bis das gewünschte Ziel erreicht und beibehalten wird.

Die Wirkung der Geschwindigkeitsbeeinflussung zur Zuflussdosierung konnte in der Mikrosimulation gezeigt werden. Voraussetzung ist, dass eine Geschwindigkeitsbegrenzung auf 40 km/h oder niedriger möglich ist, da bei einer Geschwindigkeitsbegrenzung auf minimal 60 km/h kaum die erforderliche Drosselung des Zuflusses auf Werte unterhalb der Kapazität der Engstelle möglich ist. Die Signalisierung der Geschwindigkeitsbeeinflussung ist StVO- und RSA-konform möglich.

Im Gegensatz dazu konnte die Wirkung der Fahrstreifenwechselsignalisierung in der Mikrosimulation nicht untersucht werden, da die Reaktion (Befolgung/Akzeptanz) der Fahrer auf die verschiedenen Anzeigen als erforderliche Eingangsgröße für die Mikrosimulation nicht bekannt ist. Die Befragung von Verkehrsteilnehmern hat ergeben, dass viele von ihnen Unsicherheiten bei einem späten Fahrstreifenwechsel haben und sich deshalb, insbesondere bei weniger dichtem Verkehr (auch ohne Steuerung), bereits frühzeitig einfädeln, was dem entworfenen Konzept entspricht.

Es wird empfohlen, die FBA – ggf. stufenweise (zuerst Geschwindigkeitsbeeinflussung, dann verschiedene Varianten der Fahrstreifenwechselbeeinflussung) zu implementieren, um die Wirksamkeit in der Realität untersuchen zu können. Später könnte dann noch eine Verlängerung der Zonen (z. B. Dosierung des Zuflusses bereits weiter stromaufwärts) und eine feinere Ermittlung und Signalisierung der optimalen Position des Fahrstreifenwechsels untersucht werden.

Literatur

- ACKAAH, W.; HUBER, G. & BOGENBERGER, K. (2015): Quality Evaluation Method for Variable Speed Limit Systems. Washington D.C.
- ANON (2011): Status und Rahmenbedingungen für intelligente Verkehrssysteme (IVS) in Deutschland; ITS initial report germany [Online]
- ANON (2015): <http://www.iqmobility.de> [Online]
- ANON (2015): http://www.optitraf.de/mediapool/73/733673/data/Quantis/2010-11-10_Veroeffentlichung_QUANTIS-1.4.pdf [Online]
- ANON (2015): <http://www.quantis-project.eu> [Online]
- ANON (2015): <http://www.traffic-iq.de> [Online]
- ARGOTE, J., CHRISTOFA, E., XUAN, Y. & SKABARDONIS, A. (2011): Estimation of Measures of Effectiveness Based on Connected Vehicle Data. 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), pp. 1767-1772
- BEACHER, A., FONTAINE, M. & GARBER, N. (2004): Evaluation of the Late Merge Work Zone Traffic Control, Charlottesville, VA: Virginia Technical Research Council
- BELZOWSKI, B. & EKSTROM, A. (2013): Stuck in Traffic: Analyzing Real Time Traffic Capabilities of Personal Navigation Devices and Traffic Phone Applications. Available at: <http://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/102509/102984.pdf>, [Zugriff am 29.04.2015]
- BOGENBERGER, K. (2001): Adaptive Fuzzy Systems for Traffic Responsive and Coordinated Ramp Metering. s. I.: Dissertation am Fachgebiet Verkehrstechnik und Verkehrsplanung der Technischen Universität München
- BOGENBERGER, K. (2003): Qualität von Verkehrsinformationen. Straßenverkehrstechnik, Volume 47, Issue 10
- BOGENBERGER, K. et al. (2010): Begleitforschung und Ergänzung des Merkblatts „Ermittlung der Wirksamkeit von Verkehrsbeeinflussungsanlagen“, Bundesanstalt für Straßenwesen

- BOGENBERGER, K. & HAUSCHILD, M. (2009): QFCD – A microscopic model for measuring the individual quality of traffic information. Stockholm, Sweden
- BOLL, C. (1980): Reißverschlussverfahren zur Regelung des Verkehrs an Engstellen. In: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 291, Bonn
- BREITENBERGER, S., GRÜBER, B., NEUHERZ, M. & KATES, R. (2004): Traffic information potential and necessary penetration rates. Traffic Engineering & Control, Issue 45, pp. 396-401
- BRILON, W.; GEISTEFELDT, J. & REGLER, M. (2005): Reliability of Freeway Traffic Flow: A Stochastic Concept of Capacity. In: Transportation and Traffic Theory: Flow, Dynamics and Human Interaction – Proceedings of the 16th International Symposium on Transportation and Traffic Theory. Elsevier Ltd. Oxford, UK: Elsevier, pp. 125-144
- BRILON, W.; GEISTEFELDT, J. & ZURLINDEN, H. (2007): Implementing the Concept of Reliability for Highway Capacity Analysis. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2007, pp. 1-8
- BRILON, W.; GROSSMANN, M. & BLANKE, H. (1994): Verfahren für die Berechnung der Leistungsfähigkeit und Qualität des Verkehrsablaufes auf Straßen. Bonn-Bad Godesberg: Bundesminister für Verkehr, Abt. Straßenbau
- Bundesanstalt für Straßenwesen (2011): Leitfaden zum Arbeitsstellenmanagement auf Bundesautobahnen, s. I.: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (2012): Status und Rahmenbedingungen für intelligente Verkehrssysteme (IVS) in Deutschland
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (2012): Information an die EU-Kommission – IVS-Maßnahmen, die für den folgenden Fünfjahreszeitraum geplant sind
- BUSCH, F. et al. (2006): Benchmarking für Verkehrsdatenerfassungs- und Verkehrssteuerungssysteme. Heft 949 der Reihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bonn
- CARLSON, R. C.; PAPAMICHAIL, I. & PAPAGEORGIOU, M. (2011): Local feedback-based mainstream traffic flow control on motorways using variable speed limits. IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems 12, pp. 1261-1276
- CARLSON, R. C.; PAPAMICHAIL, I. & PAPAGEORGIOU, M. (2013): Comparison of local feedback controllers for the mainstream traffic flow on freeways using variable speed limits. Journal of Intelligent Transportation Systems 17, pp. 268-281
- CARLSON, R. C.; PAPAMICHAIL, I.; PAPAGEORGIOU, M. & MESSMER, A. (2010): Optimal mainstream traffic flow control of large-scale motorway networks. Transportation Research, Band 18 C, pp. 193-212
- CHU, L., RECKER, W.; LIU, X. H. & ZHANG, H. M. (2004): Performance Evaluation of Adaptive Ramp Metering Algorithms Using Microscopic Traffic Simulation Model. Journal of Transportation Engineering, 130(3), pp. 330-338
- CHUNG, K.; RUDJANAKANOKNAD, J. & CASSIDY, M. (2007): Relation between traffic density and capacity drop at three freeway bottlenecks. Transp. Res. Part B, vol. 41, no. 1, pp. 82-95
- CREMER, M. (1979): Der Verkehrsfluss auf Schnellstraßen. Berlin, Germany: Springer
- DIN EN ISO 9000 (2005): Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe. Beuth-Verlag
- DURTH, W.; KLOTZ, S. & STÖCKERT, R. (1999): Sicherheit und Wirtschaftlichkeit von AkD (Tagesbaustellen) auf Bundesautobahnen, Schlussbericht zum FE 03.285/1995//FR, Darmstadt: s. n.
- DVR (2015): Unfälle im Bereich von Arbeitsstellen. [Online] Available at: http://www.dvr.de/dvr/vorstandsbeschluesse/vt_arbeitsstellen.htm
- ELLIS, G. (2004): Control System Design Guide – A Practical Guide. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier
- FENG, W.; BIGAZZI, A. Y.; KOTHURI, S. & BERTINI, R. L. (2010): Assessing the Impacts of

- Freeway Sensor Spacing and Probe Vehicle Penetration on Travel Time Prediction and Estimation Accuracy for Traveler Information and Traffic Management, Washington D.C.
- FGSV (2006): Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflussimulation – Grundlagen und Anwendung-. Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
- FGSV (2008): Hinweise zur Wirksamkeitsschätzung und Wirksamkeitsberechnung von Verkehrsbeeinflussungsanlagen. Köln: FGSV-Verlag
- FGSV (2010): Hinweise zur Erfassung und Nutzung von Umfelddaten in Streckenbeeinflussungsanlagen
- FGSV (2010): RiLSA – Richtlinien für Lichtsignalanlagen – Lichtzeichenanlagen für den Straßenverkehr; FGSV-Nr. 321
- FGSV (2014): Hinweise zum Qualitätsmanagement an Lichtsignalanlagen (H QML), FGSV
- FHWA (2004): Traffic Analysis Toolbox Vol. III: Guideline for Applying Traffic Microsimulation Software, Washington D.C.: US Department of Transportation
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2001): Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS). 2009 Hrsg, FGSV-Verlag Köln
- FRIEDRICH, B. et al. (2008): Leitfaden Qualitätsmanagement für Lichtsignalanlagen, Hannover, München
- FUDALA, N. & FONTAINE, M. (2010): Work Zone Variable Speed Limit Systems: Effectiveness and System Design Issues, Charlottesville, VA: Virginia Transportation Research Council
- GEISTEFELDT, J. (2011): Capacity effects of variable speed limits on German freeways
- GIPPS, P. G., (1981): A behavioural car-following model for computer simulation. Transportation Research Board, Band 15-B, pp. 105-111
- GIPPS, P. G. (1986): MULTSIM: A Model for Simulating Vehicular Traffic on Multi-Lane Arterial Roads. Mathematics and Computers in Simulation, Band 28, pp. 291-295
- GOMES, G.; MAY, A. & HOROWITZ, R. (2004): Congested Freeway Microsimulation Model using Vissim. Journal of the Transportation Research Board, No. 1876, pp. 71-81
- GREBE, N. & HANKE, H. (1991): Verkehrssicherheit an kurzfristigen und beweglichen Arbeitsstellen auf Autobahnen. Straßenverkehrstechnik, pp. 138-144
- HALLMARK, S. & ONEYEAR, N. (2015): Modeling merging behavior at lane drops, s. I.: Institute for Transportation, Iowa State University
- HARDING, J. (2007): Modellierung und mikroskopische Simulation der Autobahnverkehrs, s. I.: Lehrstuhl für Verkehrswesen, Ruhr Universität Bochum
- HEGYI, A. & HOOGENDOORN, S. P. (2010): Dynamic speed limit control to resolve shock waves on freeways – Field test results of the SPECIALIST algorithm. 13th Int. IEEE Conf. Intell. Transp. Syst., Funchal, Portugal, pp. 519-524
- HEINRICH, T. et al. (2015): UNIETD D2.1 Description of Methodologies
- HERRERA, J. et al. (2010): Evaluation of traffic data obtained via GPS-enabled mobile phones: The Mobile Century field experiment. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Issue 18, pp. 568-583
- HIDAS, P. (2004): Evaluation of lane changing and merging in microsimulation models. Adelaide
- Highway Agency (2004): M25 Controlled Motorways: Summary Report, s. I.: Department of Transport. United Kingdom: Highway Agency
- HOOGENDOORN, S. et al. (2015): Design and Implementation of an Integrated Network Management Methodology in a Regional Network. Washington D.C., United States
- HOROWITZ, R. et al. (2005): Design, Field Implementation and Evaluation of Adaptive Ramp Metering Algorithms
- HUBER, G. & BOGENBERGER, K. (2013): A Quality Evaluation Model for Real-Time-Traffic-Information. s. I., s. n., pp. 2126-2131
- HUBER, G.; BOGENBERGER, K. & BERTINI, R. L. (2014): New Methods for Quality Assessment of

- Real-Time Traffic Information, Paper Number 14-2918
- IORANIDOU, G. R.; PAPAMICHAIL, I. & RONCOLI, C. P. (2016): Integrated motorway traffic flow control with delay balancing. Preprints 14th IFAC Symposium on Control in Transportation Systems, 18-20 May, pp. 315-322
- KELLERMANN, A.; POLLESCH, P. & HASPEI, U. (2015): Qualitätsbewertung von Verkehrsinformationsdiensten – Die QUANTIS-Methodik. [Online] Available at: http://www.optitraf.de/media_pool/73/733673/data/Quantis/2010-11-10_Veroeffentlichung_QUANTIS-1.4.pdf
- KEMPER, D. (2010): Vergleichende Betrachtung der Sicherheit und Wirtschaftlichkeit von Arbeitsstellen kürzerer Dauer auf Autobahnen bei Tag und Nacht
- KEMPER, D. et al. (2012): Auswirkungen von Überkopfsignalisierungen auf Verkehrsablauf und Sicherheit bei Arbeitsstellen kürzerer Dauer, s. I.: Kooperation RWTH Aachen, Büro für Stadt- und Verkehrsplanung Dr.-Ing. Reinhold Baier GmbH, DTV-Verkehrsconsult GmbH im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, FE 82.358/2008
- KERNER, B. S. (2004): *The Physics of Traffic*. Berlin, New York: Springer
- KERNER, B. S. (2009): Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control. In: Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer
- KIM, S. & COIFMAN, B. (2014): Comparing INRIX speed data against concurrent loop detector stations over several months. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Issue 49, pp. 59-72
- KLASHINSKY, R. & BUSHMAN, R. (2000): Dynamic Work Zone Safety System. Annual Conference of the Transportation Association of Canada
- KÜHNE, R. (2004): *Das Fundamentaldiagramm – Grundlagen und Anwendungen*, Berlin: FGSV
- LI, D. & RANJITKAR, P. (2013): Assessing Ramp Metering and Variable Speed Limits Strategies for Auckland Motorway. <http://easts.info/on-line/proceedings/vol9/PDF/P352.pdf>
- LOTZ, C.; HERB, T.; SCHINDHELM, R. & VIERKÖTTER, M. (2014): Matrix von Lösungsvarianten Intelligenter Verkehrssysteme (IVS) im Straßenverkehr. Bergisch Gladbach: Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH
- LUX, C. (2011): QBench – Evaluation of Traffic Flow Quality
- LU, X.-Y. et al. (2014): Freeway Micro-simulation Calibration: Case Study Using Aimsun and VISSIM with Detailed Field Data. Washington D.C.
- MAZARÈ, P.-E., TOSSAVAINEN, O.-P., BAYEN, A. M. & WORK, D. B. (2012): Trade-offs between inductive loops and GPS probe vehicles for travel time estimation: A Mobile Century case study. Washington D.C.
- McCOY, P. T. & PESTI, G. (2001a): Dynamic Lane Merge Control Concept for Work Zones on Rural Interstate Highways. TRB 80th Annual Meeting Preprint, Paper No. 01-2010
- McCOY, P. T. & PESTI, G. (2001b): Effect of Condition-Responsive, Reduce-Speed-Ahead Messages on Speeds in Advance of Work Zones on Rural Interstate Highways. TRB 80th Annual Meeting Preprint, Paper No. 01-2019
- MÜLLER, E. R.; CARLSON, R. C.; KRAUS, J. W. & PAPAGEORGIOU, M. (2015): Microsimulation analysis of practical aspects of traffic control with variable speed limits. *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems* 16, pp. 512-523
- NETTEN, B. et al. (2013): Improving moving jam detection performance with V2I communication
- NEUMANN, T.; DALAFF, C. & NIEBEL, W. (2014): Was ist eigentlich Qualität? – Versuch einer begrifflichen Konsolidierung und Systematik im Verkehrsmanagement. *Straßenverkehrstechnik*, 09, pp. 601-606
- NISSAN, A. (2010): Evaluation of Variable speed Limits: Empirical Evidence and Simulation Analysis of Stockholm's Motorway Control System. Stockholm: Sweden: Royal Institute of Technology
- NTOUSAKIS, I. A. & NIKOLOS, I. K. (2015): On Microscopic Modelling of Adaptive Cruise Control Systems. *Transportation Research Procedia* 6, pp. 111-127
- PALMER, J.; REHBORN, H. & GRUTTADAURIA, I. (2011): Reconstruction Quality of Congested

- Freeway Traffic Patterns Based on Kerner's Three-Phase Traffic Theory. *International Journal on Advances in Systems and Measurements* 3&4, Issue 4
- PAPAGEORGIU, M.; HADJ-SALEM, H. & BLOSSEVILLE, J. (1991): ALINEA: a local feedback control law for on-ramp metering. *Transportation Research Record* 1320, pp. 58-64
- PAPAGEORGIU, M.; KOSMATOPOULOS, E. & PAPAMICHAIL, I. (2008): Effects of variable speed limits on motorway traffic flow. *Transportation Research Record* 2047, pp. 37-48
- PAPAGEORGIU, M. & KOTSIALOS, A. (2002): Freeway ramp metering: An overview. *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems* 3, pp. 271-281
- PAPAGEORGIU, M.; PAPAMICHAIL, I.; SPILIOPOULOU, A. & LENTZAKIS, F. A. (2008): Real-time merging traffic control with applications to toll plaza and work zone management. *Transportation Research* 16 C, pp. 535-553
- PAPAMICHAIL, I. et al. (2010): HERO Coordinated Ramp Metering Implemented at the Monash Freeway. Washington D.C., United States, Transportation Research Board
- PIAO, J. & McDONALD, M. (2008): Safety Impact of Variable Speed Limits – A Simulation Study. Beijing, China, pp. 833-837
- POSCHINGER, A. (2000): Netzbeeinflussung auf Autobahnen mit dynamischen Sollwerten im Entscheidungsalgorithmus. München: Technische Universität München – Veröffentlichungen des Fachgebiets Verkehrstechnik und Verkehrsplanung
- REHBORN, H. (2011): How can we determine the quality of traffic information?
- RESSEL, W. (1994): Untersuchung zum Verkehrsablauf im Bereich der Leistungsfähigkeit an Baustellen auf Autobahnen. Informationen Verkehrsplanung und Straßenwesen, Universität der Bundeswehr München, Heft 37
- REZAEI, K.; ABDULHAI, B. & ABDELGAWAD, H. (2015): Decentralized Coordinated Optimal Ramp Metering: Application to the Gardiner Expressway in Downtown Toronto. Washington D.C., United States, Transportation Research Board
- RONCOLI, C.; PAPAMICHAIL, I. & PAPAGEORGIU, M. (2014): Model predictive control for multi-lane motorways in presence of VACS. Qingdao, China, 2014 IEEE 17th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)
- RONCOLI, C.; PAPAMICHAIL, I. & PAPAGEORGIU, M. (2016): Hierarchical model predictive control for multi-lane motorways in presence of Vehicle Automation and Communication Systems. *Transportation Research, Band Part C* 62, pp. 117-132
- RSA, (1995): Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen, s. I.: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen
- SACHSE, T. (2000): Alternativroutensteuerung in Autobahnnetzen auf Basis einer erweiterten Analyse des Verkehrsablaufs. München: Technische Universität München – Veröffentlichung des Fachgebiets Verkehrstechnik und Verkehrsplanung
- SAMMER, G. et al. (2004): Verkehrstelematisch gesteuerte Maßnahmen zur Erhöhung der Verkehrsflussqualität bei baustellenbedingter Fahrstreifensubtraktion auf Autobahnen, Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (bmvit)
- SCHICK, P. (2003): Einfluss von Streckenbeeinflussungsanlagen auf die Kapazität von Autobahnabschnitten sowie die Stabilität des Verkehrsflusses. Institut für Straßen- und Verkehrswesen der Universität Stuttgart, Heft 35, Stuttgart
- SCHMULDERS, S. (1990): Control of Freeway Traffic Flow by Variable Speed Signs. *Transportation Research Part B, Issue 24* (2), pp. 111-132
- SPILIOPOULOU, D. A.; PAPAMICHAIL, I. & PAPAGEORGIU, M. (2010): Toll plaza merging traffic control for throughput maximization. *ASCE Journal of Transportation Engineering* 136, pp. 67-76
- Statistisches Bundesamt (2014): Verkehrsunfälle – Zeitreihen 2013. Wiesbaden
- STEINHOFF, C. et al. (2002): Problematik präventiver Schaltungen von Streckenbeeinflussungs-

- anlagen. Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 853. Bonn
- STÖCKERT, R. (2001): Auswirkungen von Arbeitsstellen kürzerer Dauer auf Autobahnen auf Sicherheit und Wirtschaftlichkeit des Verkehrsablaufs. Düsseldorf: VDI Verlag
- StVO (2014): Straßenverkehrsordnung, s. I.: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS)
- SÜMMERMANN, A. (2012): Verkehrssicherheits- und Verkehrsablaufuntersuchungen in Arbeitsstellen längerer Dauer auf Autobahnen in Deutschland, Aachen
- TISA (2012): EO12013 : Terms and Definitions for the Traffic and Travel Information Value Chain
- Transportation Research Board (2010): Highway Capacity Manual. 5 Hrsg. Washington D.C.: Transportation Research Board
- TREIBER, M. & HELBING, D. (2002): Reconstructing the Spatio-Temporal Traffic Dynamics from Stationary Detector Data
- TREIBER, M.; HENNECKE, A. & HELBING, D. (2000): Congested Traffic States in Empirical Observations and Microscopic Simulations. Phys. Rev. E 62, pp. 1805-1824
- TREIBER, M. & KESTING, A. (2010): Verkehrsdynamik und -simulation, Springer-Verlag
- TREIBER, M. & KESTING, A. (2010): Verkehrsdynamik und -simulation: Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik. 1 Hrsg. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- TSS (2013): Aimsun 8: Dynamic Simulators Manual
- TYMPAKIANAKI, A. et al. (2014): Real-time merging traffic control for throughput maximization at motorway work zones. Transportation Research Part C 44, pp. 242-252
- van den HOOGEN, E.; HEIDEMIJ, A. & SMULDERS, S. (1994): Control by variable speed signs: results of the Dutch experiment. London, s. n., pp. 145-149
- VENUGOPAL, S. & TARKO, A. (2001): Investigation of Factors Affecting Capacity at Rural Freeway Work Zones. TRB 80th Annual Meeting Preprint
- VOLKENHOFF, KEMPER & STEINAUER (2012): Pilothafte Verbesserung der Verkehrssicherheit einer Baustelle mittels moderner Systeme der Verkehrserfassung zur Stauvermeidung im Zuge der A 1, s. I.: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1074
- VUKANOVIC, S. (2007): Intelligent Link Control Framework with Empirical Objective Function: INCA. München: Technische Universität München: Lehrstuhl für Verkehrstechnik
- WALKER, G. & CALVERT, M. (2015): Driver behaviour at roadworks. Elsevier: Applied Ergonomics 51 (18-29), pp. 18-29
- WANG, J.; LIU, R. & MONTGOMERY, F. (2005): Car-Following Model for Motorway Traffic. Transportation Research Board of the National Academies No. 1934, pp. 33-42
- WEIKL, S.; BOGENBERGER, K. & BERTINI, R. L. (2013): Traffic Management Effects of Variable Speed Limit Systems on a German Autobahn: Empirical Assessment Before and After System Implementation. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, pp. 48-60
- WILTSCSKO, T. (2004): Sichere Information durch infrastrukturgestützte Fahrerassistenzsysteme zur Steigerung der Verkehrssicherheit an Straßenknotenpunkten. Stuttgart: VDI Verlag
- ZACKOR, H. (1972): Beurteilung verkehrsabhängiger Geschwindigkeitsbeschränkungen auf Autobahnen. Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, 128, pp. 1-61
- ZACKOR, H. (1991): Speed Limitation on Freeways: Traffic-Responsive Strategies. In: Concise Encyclopedia of Traffic and Transportation Systems. Oxford, UK: s. n., pp. 507-511
- ZAIDI, Z.; RADWAN, E. & HARB, R. (2013): Safety evaluation of work zone including ITS technologies using stochastic microsimulation. Beijing
- ZHENG, Z. (2014): Recent developments and research needs in modeling lane changing. Elsevier: Transportation Research Part B 60, pp. 16-32

Bilder

- Bild 1: Regelplan D I/6: Verkehrsführung $3n + 2$ (2 (Behelfs-)Fahrstreifen auf eingeschränkter dreistreifiger Fahrbahn) (RSA, 1995)
- Bild 2: Beispiele Vorwarntafeln
- Bild 3: Fundamentaldiagramm an einer Engstelle mit den Teilkurven „ohne Stau“ und „mit Stau“
- Bild 4: Anteil der Unfälle in Arbeitsstellenbereichen auf Autobahnen an der Gesamtzahl der Unfälle in Deutschland (1995 – 2013) (Statistisches Bundesamt, 2014)
- Bild 5: Anzahl Personenschäden für Unfälle in Arbeitsstellenbereichen auf Autobahnen in Deutschland (1995 – 2013) (Statistisches Bundesamt, 2014)
- Bild 6: Kalibrierungsparameter von AIMSUN (LU et al., 2014)
- Bild 7: Regelkreis zur Maximierung des Durchflusses einer Autobahn-Engstelle mittels Drosselung des Hauptverkehrs
- Bild 8: Reißverschlussverfahren bei freiem Verkehr (Early Merge Control)
- Bild 9: Reißverschlussverfahren bei stockendem Verkehr (Late Merge Control)
- Bild 10: Einfluss von VGB auf das Fundamentaldiagramm aufgrund von Verkehrsdaten. Zur besseren Vergleichbarkeit mit anderen Datenerhebungen wurde die Einheit für die Verkehrsdichte [Kfz/km] verwendet
- Bild 11: Zusammenfassung von VGB-Auswirkungen
- Bild 12: Verschiedene Varianten des Reißverschlussverfahrens (SÜMMERMANN, 2012)
- Bild 13: Geschwindigkeitsverteilung an lokalen Messquerschnitt (SÜMMERMANN, 2012)
- Bild 14: Regelkreis
- Bild 15: Positionen von MQ und AQ auf die Teststrecke
- Bild 16: Geschwindigkeitskonturplots (li.: ungeeignetes Stauereignis, re: geeignetes Stauereignis)
- Bild 17: Geschwindigkeitsganglinie für MQ 002mn und MQ 3.330 für den Kalibrierungsdatensatz
- Bild 18: Belegungsganglinie für MQ 002mn und MQ 3.330 für den Kalibrierungsdatensatz
- Bild 19: Fundamentaldiagramm (li.: MQ 002mn, re.: MQ 3.330) für den Kalibrierungsdatensatz
- Bild 20: Verkehrsnachfrage
- Bild 21: Informationsaustausch AIMSUN API Schema (TSS, 2013)
- Bild 22: Simulation einer Engstelle (Einfahrt) auf Autobahn unter Verwendung des IDM (A) und des Gipps-Modells (B) (TREIBER & KESTING, 2010)
- Bild 23: Fundamentaldiagramm und Simulation unter Verwendung des IDM-Modells (TREIBER & KESTING, 2010)
- Bild 24: Plan der Teststrecke (Quelle: Strassen. NRW)
- Bild 25: Geschwindigkeitskonturplot – Realdaten für den Kalibrierungsdatensatz
- Bild 26: Geschwindigkeitskonturplots aus den 10 Durchläufen der Kalibrierung
- Bild 27: Fundamentaldiagramm (q - b): Gegenüberstellung von Real- und simulierten Daten (Kalibrierung)
- Bild 28: Geschwindigkeitsganglinie für MQ 002mn und MQ 3.330 für den Validierungsdatensatz
- Bild 29: Geschwindigkeitskonturplot – Realdaten für den Validierungsdatensatz
- Bild 30: Geschwindigkeitskonturplots aus den 10 Durchläufen der Validierung
- Bild 31: Fundamentaldiagramm (q - b): Gegenüberstellung von Real- und simulierten Daten (Validierung)
- Bild 32: Grundkonzept der Verkehrssteuerung stromaufwärts einer Arbeitsstelle
- Bild 33: Simulierte Infrastruktur mit Arbeitsstelle und Einzelheiten des Drosselungsregelkreises

- Bild 34: Quantitative Untersuchung der haltbaren Drosselungsfunktion: Verkehrsstärke in Abhängigkeit des ZD-VGB-Wertes
- Bild 35: Übersicht der gesamten Steuerungsstrategie
- Bild 36: Echte gemessene Nachfrage am Streckeneingang
- Bild 37: Örtlich-zeitliche Entwicklung der mittleren Geschwindigkeit ohne Steuerung (Replikation ID 378)
- Bild 38: Zeitliche Entwicklung des Verkehrszustandes kurz vor der Engstelle ohne Steuerung (Replikation ID 378)
- Bild 39: Örtlich-zeitliche Entwicklung der mittleren Geschwindigkeit mit Steuerung (Replikation ID 378)
- Bild 40: Zeitliche Entwicklung des Verkehrszustandes kurz vor der Engstelle mit Steuerung (Replikation ID 378)
- Bild 41: Zeitliche Entwicklung des Verkehrszustandes an der BSZ-Messung und der Kapazität-VGB (rot) mit Steuerung (Replikation ID 378)
- Bild 42: Zeitliche Entwicklung der ZD-VGB (rot) und des entsprechenden Verkehrszustands mit Steuerung (Replikation ID 378)
- Bild 43: Zeitliche Entwicklung der Trichter-VGB 1 (rot) und des entsprechenden Verkehrszustands mit Steuerung (Replikation ID 378).
- Bild 44: Zeitliche Entwicklung der Trichter-VGB 2 (rot) und des entsprechenden Verkehrszustands mit Steuerung (Replikation ID 378)
- Bild 45: Zeitliche Entwicklung der Trichter-VGB 3 (rot) und des entsprechenden Verkehrszustands mit Steuerung (Replikation ID 378)
- Bild 46: Average Vehicle Delay (AVD) per Replikation für die Fälle ohne Steuerung und mit Steuerung, letztere mit 4 unterschiedlichen Werten für die Befolgungsrate CR
- Bild 47: Average Vehicle Delay (AVD) per Replikation für die Fälle ohne Steuerung und mit Steuerung, letztere mit 3 unterschiedlichen Sollwerten (kritische Verkehrsdichte)
- Bild 48: Average Vehicle Delay (AVD) per Replikation für die Fälle ohne Steuerung und mit Steuerung, letztere mit 3 unterschiedlichen zulässigen Mindestwerten für die ZD-VGB
- Bild 49: Örtlich-zeitliche Entwicklung der mittleren Geschwindigkeit ohne Steuerung (Replikation 5)
- Bild 50: Zeitliche Entwicklung des Verkehrszustandes kurz vor der Engstelle ohne Steuerung (Replikation 5)
- Bild 51: Örtlich-zeitliche Entwicklung der mittleren Geschwindigkeit mit Steuerung und ZD-VGB Mindestwert 40 km/h (Replikation 5)
- Bild 52: Zeitliche Entwicklung des Verkehrszustandes kurz vor der Engstelle mit Steuerung und ZD-VGB Mindestwert 40 km/h (Replikation 5)
- Bild 53: Zeitliche Entwicklung der ZD-VGB (rot) und des entsprechenden Verkehrszustands mit Steuerung und ZD-VGB Mindestwert 40 km/h (Replikation 5)
- Bild 54: Zeitliche Entwicklung des Verkehrszustandes kurz vor der Engstelle mit Steuerung und ZD-VGB Mindestwert 60 km/h (Replikation 5)
- Bild 55: Zeitliche Entwicklung der ZD-VGB (rot) und des entsprechenden Verkehrszustands mit Steuerung und ZD-VGB Mindestwert 60 km/h (Replikation 5)
- Bild 56: Örtlich-zeitliche Entwicklung der mittleren Geschwindigkeit mit Steuerung und ZD-VGB Mindestwert 60 km/h (Replikation 5)
- Bild 57: Kombinierte Zuflussdrosselung (mittels VGB) und Zuflussdosierung stromaufwärts einer Engstelle
- Bild 58: Beispiele für Fahrstreifenwechselsignalisierung
- Bild 59: Seitenradar mit in Fahrtrichtung (von rechts nach links) ausgerichtetem Detektionsfeld
- Bild 60: Energieversorgung Vorortsteuerung und Seitenradar
- Bild 61: Energieversorgung WVZ
- Bild 62: Übersicht Kommunikationskonzept

Bild 63: Signalisierungskonzept

Bild 64: Konzept – Beispiel VGB

Bild 65: Signalisierungskonzept 1a

Bild 66: Signalisierungskonzept 1a – FWS (neben der Fahrbahn)

Bild 67: Signalisierungskonzept 1a – Streckenplan später FWS (ZD-VGB = 60 km/h)

Bild 68: Signalisierungskonzept 1a – Streckenplan später FWS (ZD-VGB = 40 km/h)

Bild 69: Signalisierungskonzept 1a – Streckenplan früher FWS

Bild 70: Signalisierungskonzept 1b – FWS (über der Fahrbahn)

Bild 71: Signalisierungskonzept 1b – Streckenplan später FWS (ZD-VGB = 60 km/h)

Bild 72: Signalisierungskonzept 1b – Streckenplan später FWS (ZD-VGB = 40 km/h)

Bild 73: Signalisierungskonzept 1b – Streckenplan früher FWS

Bild 74: Signalisierungskonzept 2

Bild 75: Signalisierungskonzept 2a – früher FWS

Bild 76: Signalisierungskonzept 2a – später FWS

Bild 77: Signalisierungskonzept 2b – früher FWS

Bild 78: Signalisierungskonzept 2b – später FWS

Bild 79: Signalisierungskonzept 2c – früher FWS

Bild 80: Signalisierungskonzept 2c – später FWS

Bild 81: Signalisierungskonzept 2d – früher FWS

Bild 82: Signalisierungskonzept 2d – später FWS

Tabellen

Tab. 1: Unterscheidung von Arbeitsstellen nach RSA

Tab. 2: Kalibrierungsparameter von VISSIM

Tab. 3: Überschreitungen von V_{zul} und mittlerer V_{85} in Abhängigkeit der Fahrstreifenbreite (n = Stichprobenumfang) (SÜMMERMANN, 2012)

Tab. 4: Überschreitungen von V_{zul} und mittlerer V_{85} in Abhängigkeit der zulässigen Höchstgeschwindigkeit (n = Stichprobenumfang) (SÜMMERMANN, 2012)

Tab. 5: Überschreitungen von V_{zul} und mittlerer V_{85} in Abhängigkeit des Arbeitsstellenbereichs (n = Stichprobenumfang) (SÜMMERMANN, 2012)

Tab. 6: Vor- und Nachteile von Detektionstechnologien (basieren auf Erfahrungswerten)

Tab. 7: Vor- und Nachteile von Anzeigetechnologien (basieren auf Erfahrungswerten)

Tab. 8: Vor- und Nachteile von Technologien zur netzautarken Stromversorgung (basieren auf Erfahrungswerten)

Tab. 9: Vor- und Nachteile von Technologien zur mobilen Datenübertragung (basieren auf Erfahrungswerten)

Tab. 10: Modellparameter und typische Werte auf Autobahn des Intelligent-Driver-Modells (TREIBER & KESTING, 2010)

Tab. 11: Einstellung der Kalibrierungsparameter für Pkw und Lkw in AIMSUN (nur veränderte Werte)

Tab. 12: Gütekriterien für 10 Replikationen ohne Steuerung

Tab. 13: Gütekriterien für 10 Replikationen mit Steuerung

Tab. 14: Mittlere Verbesserung der Gütekriterien bei dem Fall mit Steuerung

Tab. 15: Mittlere Verbesserungen (im Vergleich zum Fall ohne Steuerung) für alle Gütekriterien und alle untersuchten Befolgungsraten CR

Tab. 16: Mittlere Verbesserungen (im Vergleich zum Fall ohne Steuerung) für alle Gütekriterien und alle untersuchten Sollwerte

Tab. 17: Mittlere Verbesserungen (im Vergleich zum Fall ohne Steuerung) für alle Gütekriterien und alle untersuchten Mindestwerte

Tab. 18: Vergleich von Technologien zur Signalisierung

Tab. 19: Bewertung von Detektionstechnologien

Tab. 20: Bewertung von Energieversorgungstechnologien

Tab. 21: Bewertung von Datenübertragungstechnologien

Tab. 22: Fälle der Verkehrsteilnehmerbefragung

Tab. 23: Kostenschätzung

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Verkehrstechnik“

2015

V 249: Auswirkungen von Querschnittsgestaltung und längsgerichteten Markierungen auf das Fahrverhalten auf Landstraßen
Schlag, Voigt, Lippold, Enzfelder

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

V 250: Befahrbarkeit spezieller Verkehrsanlagen auf Autobahnen mit Lang-Lkw
Lippold, Schemmel

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

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

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

V 253: Auswirkungen von Lang-Lkw auf die Sicherheit und den Ablauf des Verkehrs in Arbeitsstellen
Baier, Kemper

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

V 254: Beanspruchung der Straßeninfrastruktur durch Lang-Lkw
Wellner, Uhlig

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

V 255: Überholen und Räumen – Auswirkungen auf Verkehrssicherheit und Verkehrsablauf durch Lang-Lkw
Zimmermann, Riffel, Roos

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

V 256: Grundlagen für die Einbeziehung der sonstigen Anlagenteile von Straßen in die systematische Straßenerhaltung als Voraussetzung eines umfassenden Asset Managements
Zander, Birbaum, Schmidt

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

V 257: Führung des Radverkehrs im Mischverkehr auf innerörtlichen Hauptverkehrsstraßen
Ohm, Fiedler, Zimmermann, Kraxenberger, Maier

Hantschel, Otto € 18,00

V 258: Regionalisierte Erfassung von Straßenwetter-Daten
Hollдорf, Streich, Uhlig, Schäufele € 18,00

V 259: Berücksichtigung des Schwerverkehrs bei der Modellierung des Verkehrsablaufs an planfreien Knotenpunkten
Geistefeldt, Sievers

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

V 260: Berechnung der optimalen Streudichte im Straßenwinterdienst
Hausmann € 15,50

V 261: Nutzung von Radwegen in Gegenrichtung – Sicherheitsverbesserungen
Alrutz, Bohle, Busek € 16,50

V 262: Verkehrstechnische Optimierung des Linksabbiegens vom nachgeordneten Straßennetz auf die Autobahn zur Vermeidung von Falschfahrten
Maier, Pohle, Schmotz, Nirschl, Erbsmehl € 16,00

V 263: Verkehrstechnische Bemessung von Landstraßen – Weiterentwicklung der Verfahren
Weiser, Jäger, Riedl, Weiser, Lohoff € 16,50

V 264: Qualitätsstufenkonzepte zur anlagenübergreifenden Bewertung des Verkehrsablaufs auf Außerortsstraßen
Weiser, Jäger, Riedl, Weiser, Lohoff € 17,00

V 265: Entwurfstechnische Empfehlungen für Autobahntunnelstrecken
Bark, Kutschera, Resnikow, Baier, Schuckließ

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

V 266: Verfahren zur Bewertung der Verkehrs- und Angebotsqualität von Hauptverkehrsstraßen
Baier, Hartkopf € 14,50

V 267: Analyse der Einflüsse von zusätzlichen Textanzeigen im Bereich von Streckenbeeinflussungsanlagen
Hartz, Saighani, Eng, Deml, Barby

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

V 268: Motorradunfälle – Einflussfaktoren der Verkehrsinfrastruktur
Hegewald, Fürneisen, Tautz

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

2016

V 269: Identifikation von unfallauffälligen Stellen motorisierter Zweiradfahrer innerhalb geschlossener Ortschaften
Pohle, Maier € 16,50

V 270: Analyse der Auswirkungen des Klimawandels auf den Straßenbetriebsdienst (KliBet)
Holldorff, Rumpel, Biberach, Gerstengarbe, Österle, Hoffmann € 17,50

V 271: Verfahren zur Berücksichtigung von Nachhaltigkeitskriterien bei der Ausschreibung von Elementen der Straßeninfrastruktur
Offergeld, Funke, Eschenbruch, Fandrey, Röwekamp

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

V 272: Einsatzkriterien für Baubetriebsformen
Göttgens, Kemper, Volkenhoff, Oeser, Geistefeldt, Hohmann € 16,00

V 273: Autobahnverzeichnis 2016
Kühnen € 25,50

V 274: Liegedauer von Tausalzen auf Landstraßen
Schulz, Zimmermann, Roos € 18,00

V 275: Modellversuch für ein effizientes Störfallmanagement auf Bundesautobahnen
Grahl, Skottke

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

V 276: Psychologische Wirkung von Arbeitsstellen auf die Verkehrsteilnehmer
Petzoldt, Mair, Krems, Roßner, Bullinger € 30,50

V 277: **Verkehrssicherheit in Einfahrten auf Autobahnen**
Kathmann, Roggendorf, Scotti
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 278: **Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2014**
Fitschen, Nordmann € 30,50

V 279: **HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs auf Autobahnen**
Geistefeldt, Giuliani, Busch, Schendzielorz, Haug,
Vortisch, Leyn, Trapp € 23,00

2017

V 280: **Demografischer Wandel im Straßenbetriebsdienst – Analyse der möglichen Auswirkungen und Entwicklung von Lösungsstrategien**
Pollack, Schulz-Ruckriegel € 15,50

V 281: **Entwicklung von Maßnahmen gegen Unfallhäufungsstellen – Weiterentwicklung der Verfahren**
Maier, Berger, Kollmus € 17,50

V 282: **Aktualisierung des Überholmodells auf Landstraßen**
Lippold, Vettters, Steinert € 19,50

V 283: **Bewertungsmodelle für die Verkehrssicherheit von Autobahnen und von Landstraßenknotenpunkten**
Bark, Krähling, Kutschera, Baier, Baier, Klemps-Kohnen,
Schuckließ, Maier, Berger € 19,50

V 284: **Berücksichtigung des Schwerverkehrs bei der Modellierung des Verkehrsablaufs an planfreien Knotenpunkten**
Geistefeldt, Sievers
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 285: **Praxisgerechte Anforderungen an Tausalz**
Kampfner, Thümmeler, Ohmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 286: **Telematisch gesteuertes Kompaktparken – Grundlagen und Entwicklung**
Kleine, Lehmann € 16,50

V 287: **Werkzeuge zur Durchführung des Bestandsaudits und einer erweiterten Streckenkontrolle**
Bark, Kutschera, Resnikow, Follmann, Biederbick € 21,50

V 288: **Überholungen von Lang-Lkw - Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit und den Verkehrsablauf**
Roos, Zimmermann, Köhler
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 289: **Verkehrsqualität an verkehrabhängig gesteuerten und koordinierten Lichtsignalanlagen**
Geistefeldt, Giuliani, Vieten, Dias Pais € 20,00

V 290: **Fahrleistungserhebung 2014 – Inländerfahrleistung**
Bäumer, Hautzinger, Pfeiffer, Stock, Lenz,
Kuhnimhof, Köhler € 19,00

V 291: **Fahrleistungserhebung 2014 – Inlandsfahrleistung und Unfallrisiko**
Bäumer, Hautzinger, Pfeiffer, Stock, Lenz,
Kuhnimhof, Köhler € 18,50

V 292: **Verkehrsnachfragewirkungen von Lang-Lkw**
Burg, Schrempf, Röhling, Klaas-Wissing, Schreiner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 293: **Ermittlung der geeigneten Verkehrsnachfrage als Bemessungsgrundlage von Straßen**
Geistefeldt, Hohmann, Estel
Unterauftragnehmer: Manz € 17,50

V 294: **Wirtschaftlichkeitsbewertung besonderer Parkverfahren zur Lkw-Parkkapazitätserhöhung an BAB**
Maibach, Tacke, Kießig € 15,50

V 295: **Konzentrationen und Frachten organischer Schadstoffe im Straßenabfluss**
Grotehusmann, Lambert, Fuchs, Graf € 16,50

V 296: **Parken auf Rastanlagen mit Fahrzeugen und Fahrzeugkombinationen mit Übergröße**
Lippold, Schemmel, Kathmann, Schroeder
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2018

V 297: **Sicherheitstechnische Überprüfung von Elementen plan gleicher Knotenpunkte an Landstraßen**
Zimmermann, Beeh, Schulz, Roos
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 298: **Verfahren zur Zusammenführung von Informationen unterschiedlicher Netzanalyseysteme**
Balck, Schüller, Balmberger, Rossol
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 299: **Einfluss von Fehlern auf die Qualität von Streckenbeeinflussungsanlagen**
Schwietering, Neumann, Volkenhoff, Fazekas, Jakobs, Oeser
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 300: **Untersuchungen zur Optimierung von Schadstoffrückhalt und Standfestigkeit von Banketten**
Werkenthin, Kluge, Wessolek
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 301: **Sicherheitsbewertung von Arbeitsstellen mit Gegenverkehrstrennung**
Kemper, Sümmermann, Baier, Klemps-Kohnen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 302: **Entwicklung einer Fahrstreifenreduktionsbeeinflussungsanlage für Baustellen auf BAB**
Heinrich, Maier, Papageorgiou, Papamichail, Schober, Stamatakis
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Fordern Sie auch unser kostenloses Gesamtverzeichnis aller lieferbaren Titel an! Dieses sowie alle Titel der Schriftenreihe können Sie unter der folgenden Adresse bestellen:

Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel. +(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-63

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de