

Simulation des hochautomatisierten Fahrens auf Autobahnen mit kollektiver Streckenbeeinflussung

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 362

bast

Simulation des hochautomatisierten Fahrens auf Autobahnen mit kollektiver Streckenbeeinflussung

von

Torben Hilgers
Anja Krabbe
Andrea Haug

Heusch/Boesefeldt GmbH
Aachen

Jan Grimm

Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme
Dresden

Steffen Kutter
Conny Tempelhahn

Institut für Automobiltechnik
TU Dresden

Christoph Schwietering
Johannes Füg

Schwietering Ingenieure GmbH
Aachen

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 362

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 Kommunikation.

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

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 Kommunikation.

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

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 03.0538
Simulation des hochautomatisierten Fahrens und die Auswirkungen auf die kollektive Streckenbeeinflussung auf Autobahnen

Referat
Verkehrsbeeinflussung
und Straßenbetrieb

Fachbetreuung
Jessica Hegewald

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

Redaktion
Stabsstelle Presse und Kommunikation

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

ISSN 0943-9331
ISBN 978-3-95606-696-2

Bergisch Gladbach, Juli 2022

Kurzfassung – Abstract

Simulation des hochautomatisierten Fahrens und die Auswirkungen auf die kollektive Streckenbeeinflussung auf Autobahnen

Die meisten Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA) in Deutschland basieren auf dem Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechner- und Unterzentralen (MARZ 99). Das darin beschriebene Steuerungsmodell wurde für die damaligen Verkehrsverhältnisse, die technischen Möglichkeiten der Sensorik, Aktorik und Übertragungstechniken sowie die damaligen Fahrzeugeigenschaften entwickelt. Der technische Fortschritt mit Fahrerassistenzsystemen und der zunehmenden Fahrzeugautomatisierung bis hin zu hochautomatisierten Fahrzeugen (HAF) werden in den verwendeten Steuerungsverfahren nicht ausreichend berücksichtigt. Es wird erwartet, dass zukünftig hochautomatisierte Fahrzeuge einen signifikanten Einfluss auf den Verkehrsablauf und damit wiederum Auswirkungen auf die Steuerungsalgorithmen und die Wirksamkeit der SBA haben werden.

Dieses Projekt hat zum Ziel, die Auswirkungen von hochautomatisierten Fahrzeugen auf die SBA-Steuerung zu untersuchen und mögliche Anpassungen des Steuerungsmodells zu erarbeiten. Nach einer Literaturrecherche zum Stand der Technik bezüglich Fahrzeugautomatisierung und der Wirkung bestehender Verkehrsbeeinflussungsanlagen werden zwei valide mikroskopische Simulationsmodelle für Strecken in Bayern und NRW erstellt. Anschließend werden die dortigen Unterzentralen softwaretechnisch abgebildet und an die Simulation angebunden. Um die Wirkung und Reaktion der Fahrzeuge auf die SBA in der Simulation abzubilden wird ein Wirkmodell aus Realdaten entwickelt und ebenfalls an die Simulation angeschlossen.

Gemeinsam mit den im Projekt beteiligten Straßenbetreibern werden Anforderungen an das Fahrzeugsteuerungsverhalten von automatisierten Fahrzeugen mit dem Ziel der Verkehrsflussoptimierung aus Betreibersicht definiert und in einem Fahrverhaltensmodell in der Simulation umgesetzt. Zudem werden zwei weitere Fahrzeugsteuerungsverhalten aufgestellt, um die Szenarien von progressivem bis konservativem Verhalten zu erfassen. Die drei Fahrverhaltensmodelle unterscheiden sich im Beschleunigungs- und Abstandsverhalten und werden

jeweils mit unterschiedlichen Durchdringungsraten in der Simulation umgesetzt.

Geeignete Kenngrößen werden ausgewählt, um die Wirkungen auf den Verkehrsablauf in der Simulation zu erfassen. Die Auswirkungen werden für die verschiedenen Durchdringungsraten und Fahrverhaltensmodelle mit dem Nullfall (nur menschliche Fahrer) verglichen.

Basierend auf den Auswertungen werden Anforderungen an das Fahrverhalten von HAF sowie Anpassungen und Erweiterungen der SBA Steuerung diskutiert. Es werden Handlungsempfehlungen, die sich aus den einzelnen Maßnahmen für den Betrieb und die Steuerung von SBA und für die automatisierte Fahrzeugsteuerung ergeben, ermittelt und in einen zeitlichen Bezug gebracht.

Simulation of highly automated driving and its effects on collective traffic control on motorways

Most route control systems (SBA) in Germany are based on the Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechner- und Unterzentralen (MARZ 99). The control model described therein was developed for the traffic conditions of that time, the technical possibilities of sensor, actuator and transmission technologies, as well as the vehicle characteristics of that time. The technical progress with driver assistance systems and the increasing vehicle automation up to highly automated vehicles (HAF) are not sufficiently considered in the used control procedures. It is expected that in the future highly automated vehicles will have a significant influence on the traffic flow and thus in turn affect the control algorithms and the effectiveness of the SBA.

This project aims to investigate the effects of highly automated vehicles on the SBA control and to develop possible adjustments of the control model. After a literature review of the state of the art regarding vehicle automation and the effect of existing traffic control systems, two valid microscopic simulation models for routes in Bavaria and NRW will be developed. Subsequently, the sub-centres there will be mapped by software and connected to the simulation. In order to map the effect and

reaction of the vehicles on the SBA in the simulation, an impact model will be developed from real data and also connected to the simulation.

Together with the road operators involved in the project, requirements for the vehicle control behaviour of automated vehicles are defined from the operator's point of view with the aim of optimising traffic flow and implemented in a driving behaviour model in the simulation. In addition, two further vehicle control behaviours are set up to cover scenarios from progressive to conservative behaviour. The three driving behaviour models differ in acceleration and distance behaviour and are each implemented with different penetration rates in the simulation.

Suitable parameters are selected to capture the effects on the traffic flow in the simulation. The effects are compared for the different penetration rates and driving behaviour models with the zero case (human drivers only).

Based on the evaluations, requirements for the driving behaviour of HAF as well as adjustments and extensions of the SBA control system are discussed. Recommendations for action, which result from the individual measures for the operation and control of SBA and for the automated vehicle control, are determined and brought into a temporal relation.

Summary

Simulation of highly automated driving and its effects on collective traffic control on motorways

1 Objective

In order to be able to handle the constantly increasing traffic volume on the freeways in an acceptable traffic quality, route control systems (SBA) are used, which are based on the specifications of the leaflet for the equipment of traffic computer and sub-centers (MARZ 99). The control model defined therein was designed for the traffic conditions, the technical possibilities of sensor, actuator and transmission technologies, the valid legal requirements and the vehicle characteristics, prevailing at that time. The VBAs used today, but also the current control model concepts, are not designed to take adequate account of the technical progress that has now been achieved. MARZ 2018 takes parts of this into account, but an SBA implementation according to MARZ 2018 has not yet been carried out. It is expected that driver assistance systems in particular, up to highly automated or autonomous vehicles, will have a significant impact on traffic flow and that this may have far-reaching consequences on the usefulness and effect of traffic control measures.

The aim of this research project was to investigate the effects of highly automated vehicles on SBA control and to develop possible adjustments to the control model. In addition, requirements for the vehicle control behaviour of automated vehicles were to be defined together with the road operators involved in the project with the aim of further improving the traffic flow from the operator's point of view.

2 Approach

Based on a literature review of the state of the art in vehicle automation and the effect of existing traffic control systems, two valid microscopic simulation models were created for routes in Bavaria and NRW. The route sections on the A57 and A92 are

both equipped with SBA based on the control procedure according to MARZ 99. For both routes, locally collected traffic data (aggregated and single vehicle data) as well as environmental data and display data were provided. The processing of the traffic data formed the basis for the calibration and validation of the simulation model as well as for the creation and calibration of a behaviour model for the reaction of non-automated vehicles to SBA displays.

The calibration and validation of the simulation models was performed as described in the instructions for microscopic traffic flow simulations according to FGSV using the simulation tool AIMSUN NEXT (Vers. 8.4.1). The behavioural model was developed on the basis of traffic data analysis and was linked to driving situations in an impact model. The empirical relationships were calibrated for human drivers on the basis of individual vehicle data and display data. The impact model reflects the reaction of the road users to SBA measures.

Subsequently, the microscopic traffic flow simulation was linked to a MARZ-compliant UZ with the original parameters of the respective route, by which SBA displays are determined for the simulation. The circuits are implemented in the simulation and are recognised by the also connected effect model. The associated behavioural parameters are applied again to the driver vehicle units depicted in the simulation. In the simulation, the behaviour of the simulated vehicles is influenced by the action model depending on the SBA display, traffic situation and vehicle type (HAF or human driver). A schematic sketch of the procedure is shown in figure 1.

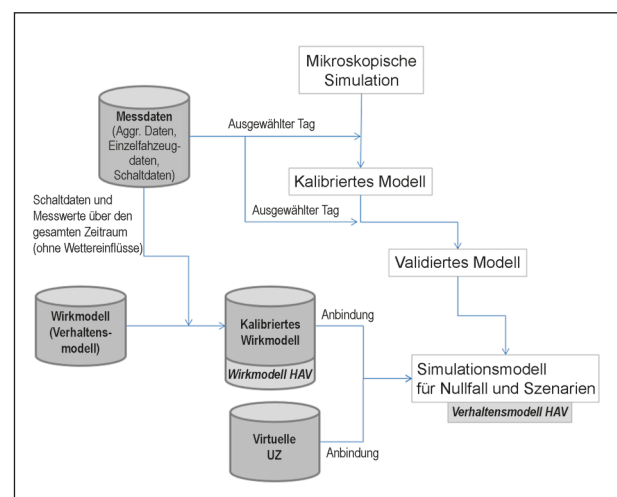


Fig. 1: Vorgehen Erstellung Simulationsmodell

A major goal of this project was also to formulate a driving behaviour model for automated vehicles, which would lead to a desirable driving behaviour from the point of view of road operators or operators of route control systems (SBA). This includes in particular that automated vehicles contribute to an improvement of traffic safety, an increase in performance and a stabilisation of the traffic flow through their individual behaviour. The desired effects of SBAs, which can already be observed today, should be supported, while additional negative effects should be avoided.

Together with the group of supervisors, the consortium developed requirements for automated vehicle control from the perspective of SBA operators and transferred them into a driving behaviour model.

In order to be able to evaluate the effects and influences of automated driving in a more differentiated way, it was decided to define two further forms of automated driving in addition to the desirable model from the operator's perspective and to depict them as reference cases in the simulation:

- Compared to the desirable model, a conservative vehicle control system represents a very defensive and therefore also rather reactive (i.e. less anticipatory) driving style. For example, larger gaps in distance and time to drivers ahead are maintained. The compliance with the minimum time gaps is however very strict, so that delays of the drivers in front are immediately comprehensible, if necessary also with stronger delays.
- In contrast, a progressive vehicle control system maps a driving style at the limit of the technical and practical feasibility assumed for automated vehicles, taking into account all mandatory requirements. This way of driving is particularly characterised by a tolerance of relatively short distance and time gaps, which could in principle offer a positive effect regarding capacity and performance. As a result, there is little room for maneuver in the event of a delay of the vehicle in front, so that here, too, it may be necessary to react with severe delays.

In contrast, the vehicle control model, which is desirable from the operator's point of view, depicts a foresighted driving style taking into account environmental conditions. This is characterised by

a distance behaviour with sufficient clearance to compensate for disturbing influences (e.g. traffic jams), which, in contrast to conservative vehicle control, can also be utilised if necessary.

The driving behaviour models were implemented in the simulation and the effects for the different penetration rates and driving behaviour models were compared with the zero case (human drivers only). Based on the evaluations, requirements for the driving behaviour of HAF as well as adjustments and extensions of the SBA control system were discussed. Recommendations for action resulting from the individual measures for the operation and control of SBA and for the automated vehicle control were determined and put into a temporal relation.

3 Simulation scenarios and results

3.1 Simulation scenarios

Taking into account all simulation boundary conditions, the following scenarios were simulated for both sections:

- Speed limit of 130 km/h (A92) and 120 km/h (A57)
- Speed limit of 100 km/h
- Speed limit of 80 km/h
- Speed limit of 60 km/h (traffic jam)

It was determined that in a simulation scenario only automated vehicles of one type are used. A mixture of several types in the same simulation scenario would make it more difficult to assign and evaluate the effects of automated driving. The three characteristics are therefore represented in separate simulation scenarios. For all driving behaviour models, different characteristics are simulated and examined. In addition to the zero case with only human driving and the 100% equipment, mixed scenarios with 10%, 50% and 90% were simulated.

For the evaluation of the simulations different parameters describing the distance behaviour, the traffic flow and the speed behaviour were applied. The data are written out of the simulation and contain single vehicle data as well as section and cross-section related data.

3.2 Simulation results

Of the three driving behaviour models of the HAF, the progressive and the desirable model can be considered as target-oriented. The conservative model led to a significantly reduced roadway capacity of about 1,000 vehicles/h on two-lanes compared to the human drivers from an equipment rate of 50% and was therefore not analysed further.

The investigation has shown that the switch-off criterias of the harmonisation at a high HAF proportion is not achieved. For the scenarios with 90% and 100% HAV, a switching of 80 km/h was activated relatively quickly due to traffic conditions and remained until the end of the simulation. The reason for this is the parameterised switch-off threshold. The display is deactivated at a mean local speed >80 km/h. However, since the automated vehicles do not exceed the maximum speed of 80 km/h, deactivation is only possible with human drivers. Therefore, this state was mainly analysed when considering the effects on the traffic flow on the A57.

Overall, the traffic flow for both driving behaviour models of the HAF is significantly homogenised and thus improved as the equipment level increases due to the parameters of the models. At an equipment level of 100%, this can be seen, on the one hand, in the fact that there are no congestion switches and also no collapses, according to the criteria described. On the other hand, the speed level also increases at high density. For the scenarios with 100% HAF, a significant increase in capacity can be seen, so that capacity increases of at least 800 vehicles/h in the progressive model and about 300 vehicles/h in the desirable model are already achieved without collapses. For a precise capacity determination, further simulations including traffic collapses are necessary.

An increase in capacity is already noticeable from an equipment rate of 50%, but dips still occur depending on the cross-section and model, so the increases are smaller. The main reason for the capacity increases and the associated higher densities are the smaller time gaps at relatively high speeds (80 km/h), which are set for the different driving behaviour models of the HAF.

In the progressive and desirable model, average gaps between vehicles of about 20 m are observed at speeds of about 80 km/h. The maximum density of 45 Veh/km/lane achieved in the simulation results

in very small time gaps of 0.775 s at 80 km/h. This is below the gap described as comfortable in [VDA17] and below the minimum time gap defined in ISO 22179.

Even if the small time gaps are not driven the entire time, but are caused by certain situations (e.g. lane changes), the overall smaller distances can also lead to problems. At interchanges, for example, entering the main lane becomes much more difficult. In the simulation, the current demand on the routes can be served with the selected driving behaviour. However, the density cannot be increased arbitrarily because the system will eventually break down. For this reason, there will still be a need for traffic management systems.

The mean travel time decreases by approx. 35 s (more than 4%) for both driving behaviour models on the A57, which is also due to the homogenisation of the traffic flow. On the A92, an improvement in travel time can only be achieved for the progressive model, but no disruptions were present in the zero case. In the progressive travel behaviour model, especially for the mixed scenarios of 50% and 90%, the speed level is higher than in the desirable model. The level and median are similar in the 100% scenario for both models. The median is also similar to the human drivers, but the dispersion is much lower since the automated vehicles have approximately the same desirable speed. In the progressive model, the dispersion for 100% HAF is larger than in the desirable driving model. The standard deviation of the speed is larger in the progressive model when traffic demand is high, because the HAFs react later and more strongly to the vehicle ahead and disturbances. As a result, speeds are not as homogeneous as in the desirable model, where vehicles react less aggressively. While there are no model-related differences for the speed gaps between lanes, the spread of speed gaps to the vehicle in front is larger in the progressive model which is also due to the delay and the possible gaps to the vehicle in front. The fraction of time gaps from 0-0.75 s is larger in this model due to the less anticipatory response of the progressive HAF in the 100% scenario. The CIBTR is similar for both models. Overall, the median 100% results are similar for both models. However, the vehicles in the desirable model drive slightly more predictively and homogeneously due to the not quite as strong desirable delay, so the dispersions are smaller in the desirable model.

In conclusion, it can be stated that, depending on the parameter settings in the model, the introduction of HAF can have both a positive and a negative effect in terms of capacity. A significant influence on density is exerted by the time gaps, changes to which must be viewed critically, as they may be at the limit of what is practically feasible and safety can no longer be guaranteed. In addition, it should be noted that automated vehicles with the assumed driving behaviour do not harmonise well with the existing SBA control system, since harmonisation circuits are not resolved in some cases, although a reversal of the circuit would be appropriate due to the traffic situation.

4 Recommendations and measures

The aim of the research project was to work out which adjustments to the control system of SBAs would be useful or necessary with regard to future scenarios of automated driving. It is assumed that an SBA should essentially harmonise the traffic flow to avoid traffic jams and warn road users of dangerous situations.

Despite the homogenisation of the traffic flow that can be observed in high penetration rates with uniform driving behaviour, it is assumed that the harmonisation effect of the SBA will continue to play an important role even with automated vehicles. On the one hand, mixed scenarios will occur over a long period of time in which the different behaviour of automated and non-automated road users can lead to disturbances in the traffic flow. On the other hand, even with high penetration rates for automated vehicles, no idealised conditions with uniform driving behaviour as was the case in the simulation will occur. Also the behaviour parameters of the automated vehicles will vary within certain limits, so that there is also a potential for harmonisation through SBA. In addition, the future SBAs may also be able to influence the automated vehicles in a targeted manner in order to reduce the negative effects of the disturbance situation that has occurred and, for example, to support a more rapid exit from a traffic jam or to mitigate capacity-related disturbances by reducing or delaying the inflow.

In the table, based on the simulation results and the exchange with the SBA operators, possible extensions of the SBA control and further measures are listed.

	Measure SBA/HAF	Expected effects	Expected implementation effort
1a	Check and optimisation of AQ/MQ allocation	Avoidance of fault displays or lingering in displays	Low – medium, depending on implementation
1b	Adaptation of switch-on and switch-off thresholds (speed, QB, density)	Resolution of harmonisation possible Time-delayed reaction of the SBA at lower thresholds, as the switch-on thresholds must be lowered as well as the switch-off thresholds	Low
2	Different control algorithm (not threshold based)	Preventive and, in the event of an incident, activating algorithm that orders situational driving strategies Earlier reaction to traffic conditions possible than with threshold-based methods Integration of cooperative systems in situation detection and action selection possible	Medium – large New processes have to be designed, tested and implemented using software.
3	Use of vehicle-generated data in the control systems	Earlier detection of events More precise localisation of events with track-accurate reporting Supplementation of local detection, in case of high penetration rates also replacement of static detection (replacement of static detection only possible with new control algorithms that do not require full detection)	Large MARZ 2018 the traffic situation can be determined from route-related data, but the implementation has yet to be defined. Standardisation of data transmission and data use necessary
4	Transmission of driving strategies for selected traffic situations: <ul style="list-style-type: none"> • Access to highly frequented sections/interlinked routes • Traffic jam exit • Gaffer jam • Rescue Lanes • Sites of accidents when lane keeping driving is no longer possible 	More efficient use of capacity Less dangerous situations Fewer accidents/breakdowns Safe avoidance of dangerous situations	Large Optimal strategy/behaviour in the individual situations must first be determined and supplied by planning Legal situation must ensure transmission of driving strategies Legal situation of liability must be clarified Strategies can be seen as recommendations, liability and acceptance of the strategy is incumbent on the HAF
5	Definition of requirements for the driving behaviour of automated vehicles	Avoidance of capacity reductions	Medium Legal implementation via licensing and STVO

5 Conclusion

Two valid simulation models were created. A replica of the local subcentre with the original parameters was connected to the simulation models. In addition, an impact model was developed from real data and connected. The impact model represents the reaction of the road users to the SBA measures. The HAF vehicles were represented in the simulation with three different driving behaviour models (conservative/desirable from the operator's point of view/progressive), which differ in the gap behaviour, the acceleration and deceleration behaviour and the reaction sensitivity to the surrounding vehicles. Scenarios with different equipment rates were modeled and analysed for all behaviour models. Depending on the driving behaviour models, improvements or even deteriorations in terms of roadway capacity occurred at high HAF equipment rates.

With the conservative behaviour, the current traffic demand could not be handled with a penetration rate 50% HAF. With the desirable and progressive driving behaviour from the operator's point of view, capacity increases were observed at an equipment level of 90% HAF. In the operator desirable model, for which the parameters were defined together with the operators, the driving behaviour is less aggressive and therefore more comfortable for the users than in the progressive model. The increases in capacity are associated with a homogeneous flow of traffic with, at the same time, small time gaps between vehicles. The gaps become smaller than currently allowed by the StVO. A sensible compromise must be found here between what is technically possible, a way that is comfortable for the user and a way that is feasible from a legal point of view.

Since the simulation of the HAF was carried out with only one driving behaviour model at a time, the behaviour with regard to speed, differences to the following vehicle and to the neighbouring lane, as well as the standard deviations were very homogeneous. This made it possible to avoid collapses in interaction with the SBA and to improve travel times. The next step should be to investigate to what extent these results are confirmed when the driving behaviour models are mixed, as will also take place in reality.

In the SBA, with increasing penetration, a persistence in the 80 km/h harmonisation circuit could

be observed, which can be attributed to the MARZ 99 switch-on and switch-off thresholds as well as the MQ/AQ allocation. With increasing penetration of HAF, at least the threshold values must be checked and adjusted if necessary. However, the development of new, non-threshold-based control algorithms is considered more constructive. These could then be used to react dynamically to events in traffic collectives with a significant proportion of HAF and possibly even to influence them predictively. Furthermore, using the vehicle infrastructure communication by means of SBA, the targeted influencing of the automated vehicles can take place in order to reduce the negative effects of disruptive situations that have occurred. In this way, a quicker exit from the traffic jam can be supported or a safer approach can be made in the event of a disruption. There is a need for further research into

the detection of selected situations and the optimal driving strategies to be developed for them.

In general, a need for SBA is seen even with the introduction of HAF. It is assumed that even with high equipment rates, the harmonisation effect of the SBA will continue to be important and necessary, since on the one hand, in mixed scenarios, the different behaviours of automated and non-automated road users can lead to disruptions in the traffic flow. On the other hand, differences in the behavioural parameters of the automated vehicles will also occur, so that there is also potential for harmonisation in the traffic flow. In addition, the tasks of the SBA will change as the HAF share increases. The focus will be more on situation recognition and an associated driving strategy, which will either be transferred directly to the vehicle or selected by the HAF.

Inhalt

1	Ausgangslage, Zielsetzung und Vorgehensweise	15	3.2.2	Definition der relevanten Verkehrsszenarien – Situationserkennung	59
2	Grundlagen	16	3.2.3	Auswahl von repräsentativen Tagen für die Simulationskalibrierung und -validierung sowie für die Simulationsuntersuchung	59
2.1	Begriffe	16	3.2.4	Ermittlung der Quelle-Ziel-Matrizen	60
2.2	Verhaltensmodelle und Verkehrssimulation	17	3.2.5	Aufbereitung der Daten für die Kalibrierung und Validierung	60
2.2.1	Klassifizierung von Fahrverhalten	18	3.3	Definition der maßgeblichen Kenngrößen zur Bewertung	60
2.2.2	Überblick: Simulationswerkzeuge	19	3.3.1	Vorgehensweise	61
2.2.3	Fahrverhaltensmodelle	20	3.3.2	Bewertung Verkehrsfluss/-störungen	61
2.2.4	Kalibrierung und Validierung	28	3.3.3	Bewertung Geschwindigkeitsverhalten	62
2.2.5	Zusammenfassung und Anforderungen	29	3.3.4	Bewertung Abstandsverhalten	63
2.3	Fahrzeugautomatisierung	30	3.3.5	Bewertung Fahrstreifenwahlverhalten	64
2.3.1	Stufen automatisierten Fahrens	30	3.4	Definition der relevanten SBA-Maßnahmen	65
2.3.2	Stand der Technik und Anwendungen	30	3.4.1	A57 – SBA Maßnahmen	65
2.3.3	Wirkungen automatisierten Fahrens	31	3.4.2	A92 – SBA Maßnahmen	65
2.3.4	Annahmen aus bisherigen Studien zu Auswirkungen automatisierten Fahrens	33	3.5	Aufstellung eines realistischen Verhaltensmodells ohne automatisierte Fahrzeuge	66
2.4	Verkehrliche Wirkungen von Streckenbeeinflussungsanlagen	35	3.5.1	Problemstellung	66
2.4.1	Aufbau und Funktionsweise	36	3.5.2	Einflussfaktoren auf das Fahrverhalten	66
2.4.2	Maßnahmen und Wirkziele	36	3.5.3	Herangehensweise	67
2.4.3	Kenntnisstand	36	3.5.4	Aufbau des Wirkmodells	70
2.4.4	Zusammenfassung	46	4	Aufbau des Simulationsmodells	71
3	Festlegung der verkehrlichen Szenarien	48	4.1	Datenerhebung und -aufbereitung der ausgewählten Streckenabschnitte	72
3.1	Analyse und Bewertung der Referenzstrecken	49	4.1.1	Datenaufnahme und Ablage	72
3.1.1	Referenzstrecken – Vorauswahl	50	4.1.2	Aufbereiten aggregierter Verkehrsdaten	72
3.1.2	Bewertung der Referenzstrecken	52	4.1.3	Berechnen empirischer Verhaltenskenngößen aus Einzelfahrzeugdaten	72
3.1.3	Auswahl der Referenzstrecken	53	4.1.4	Aufbereitung Wetter- und Umfeldaten	73
3.2	Datenanalyse und Vorbereitung als Eingangsgrößen in das Simulationsmodell	54			
3.2.1	Datenanalyse	54			

4.1.5	Aufbereitung und Aggregation Anzeigezustände	73	5.3.2	Bewertung des Geschwindigkeits- verhalten.	96
4.1.6	Zuordnung der empirischen Daten zu Fahrsituationen	73	5.3.3	Bewertung des Abstandverhaltens.	99
4.2	Erstellung, Kalibrierung und Validierung des Simulationsmodells in AIMSUN	74	6	Ermittlung des optimalen Fahrzeug- steuerungsverhaltens für automati- sierte Fahrzeuge.	100
4.2.1	Auswahl der Referenztage	74	6.1	Erhebung Anforderungen Betreiber an automatisierte Fahrzeug- steuerung	100
4.2.2	Erstellung der Quell-Ziel-Matrizen	74	6.1.1	Anforderungen aus Betreibersicht	100
4.2.3	Kalibrierung der Referenzstrecken in der Simulation.	75	6.1.2	Anforderungen und Annahmen aus technischer und ergonomischer Sicht	100
4.2.4	Validierung der Referenzstrecke in der Simulation.	81	6.1.3	Festlegungen zu Randbedingungen für die automatisierte Fahrzeug- steuerung	102
4.3	Anpassung und Kalibrierung des Verhaltensmodells ohne automati- sierte Fahrzeuge	81	6.2	Festlegung Unterszenarien Fahrzeug- steuerung und Durchdringung	104
4.3.1	Vorgehensweise und Arbeitsschritte	81	6.2.1	Ausprägungen der Fahrzeug- steuerung	104
4.3.2	Revision der Netztopologie	82	6.2.2	Varianten der Durchdringung auto- matisierter Fahrzeuge	105
4.3.3	Kalibrierung anhand empirischer Zusammenhänge Fahrsituation und -verhalten	87	6.3	Fahrverhaltensmodelle für automati- siertes Fahren	106
4.3.4	Untersuchungen zu mikroskopischen Kenngrößen	90	6.3.1	Erzeugung Fahrzeugtypen für automatisierte Fahrzeuge in AIMSUN	106
4.4	Integration der MARZ99-konformen Standard-UZ.	91	6.3.2	Festlegung Parameter der AIMSUN- Fahrverhaltensmodelle.	106
4.4.1	Modellierung von SBA-Maßnahmen in AIMSUN	91	6.3.3	Dynamische Anpassung der Wunschgeschwindigkeit.	111
4.4.2	Anbindung an AIMSUN	92	7	Durchführung der Simulation für automatisierte Fahrzeuge	114
4.4.3	Grafische Darstellung.	93	7.1	Vorbereitung und Durchführung der Simulation.	114
5	Durchführung der Simulation für menschliche Fahrer	93	7.2	Auswertung der Simulationsergeb- nisse der Szenarien automatisiertes Fahren	115
5.1	Berechnung und Aufzeichnung der Kenngrößen zur Bewertung.	93	7.2.1	Bewertung des Verkehrsflusses/ Störungen.	116
5.1.1	Berechnung querschnittsbezogener Kenngrößen	94	7.2.2	Bewertung des Geschwindigkeits- verhaltens.	119
5.1.2	Berechnung abschnittsbezogener Kenngrößen	94	7.2.3	Bewertung des Abstandsverhaltens.	122
5.2	Simulierte Szenarien	94	7.2.4	Fazit	123
5.3	Auswertung der Simulationsergebnisse der Szenarien menschliche Fahrer	95			
5.3.1	Bewertung des Verkehrsflusses/ Störungen.	95			

8	Diskussion der Ergebnisse	124	Anhang
8.1	Beurteilung der Belastbarkeit und Übertragbarkeit der Ergebnisse	124	Anhang 1: Fahrzeugfolge- und Fahrstreifenwechselmodelle
8.2	Notwendige Erweiterungen der SBA-Steuerung und weitergehenden Maßnahmen	127	Anhang 2: Bewertungsgrößen
8.3	Anforderung an die automatisierten Fahrzeuge	131	Anhang 3: Zusammenhänge Fahrsituation/ Empirisches Verhalten
9	Handlungsempfehlungen, Road Map	132	Anhang 4: Einfluss Simulationsparameter auf Abstandsverhalten
9.1	Handlungsempfehlungen aus Maßnahmen für SBA.	132	Anhang 5: Funktionen Abstandsverhaltensparameter
9.1.1	Prüfung und Optimierung der AQ/MQ-Zuordnung	132	Anhang 6: Parameter der Modelle automatisierter Fahrzeuge
9.1.2	Anpassung der Ein- und Ausschaltenschwellwerte	132	Anhang 7: Weitere Kalibrierungsergebnisse
9.1.3	Entwicklung neuer Steuerungs-algorithmen (nicht schwellwertbasiert)	132	Anhang 8: Verkehrszusammenstellung A57 20.3.2017
9.1.4	Nutzung von fahrzeugseitig generierten Daten.	132	Die Anhänge zum Bericht sind im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter https://bast.opus.hbz-nrw.de abrufbar.
9.1.5	Bereitstellung von Fahrstrategien.	132	
9.2	Handlungsempfehlungen für HAF – Rahmenbedingung für automatisierte FZ-Steuerung	133	
9.2.1	Anforderungen an das Fahrverhalten.	133	
9.2.2	Standardisierte Datenübertragung.	133	
9.2.3	Fahrzeugseitige Umsetzung von Warnmeldungen in Strategien	133	
9.3	Sonstige Handlungsempfehlungen	134	
9.3.1	Klärung der rechtlichen Situation	134	
9.4	Zeitliche Umsetzbarkeit	134	
9.5	Forschungsbedarf	134	
10	Fazit und Ausblick	136	
	Literatur	138	
	Tabellen	144	
	Bilder	144	

1 Ausgangslage, Zielsetzung und Vorgehensweise

Um die stetig weiter ansteigenden Verkehrsleistung auf den Autobahnen in einer akzeptablen Verkehrsqualität abwickeln zu können, werden Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA) eingesetzt, die sich an den Vorgaben des Merkblatts für die Ausstattung von Verkehrsrechner- und Unterzentralen (MARZ 99) orientieren. Das darin definierte Steuerungsmodell wurde für die damals herrschenden Verkehrsverhältnisse, technischen Möglichkeiten der Sensorik, Aktorik und Übertragungstechniken, den gültigen gesetzlichen Vorgaben sowie den Fahrzeugmerkmalen konzipiert. Die heute eingesetzten VBA, aber auch die aktuellen Steuerungsmodellkonzepte sind nicht darauf ausgelegt, den mittlerweile erreichten technischen Fortschritt angemessen zu berücksichtigen. Das MARZ 2018 berücksichtigt Teile davon, eine SBA-Umsetzung nach MARZ 2018 ist bisher jedoch noch nicht erfolgt. Dabei ist zu erwarten, dass sich insbesondere Fahrerassistenzsysteme bis hin zu hochautomatisierten bzw. autonomen Fahrzeugen signifikant auf den Verkehrsablauf auswirken werden und dies weitreichende Folgen auf die Zweckmäßigkeit und Wirkung bislang eingesetzter Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen haben kann.

Ziel dieses Forschungsprojektes ist es auszuarbeiten, welche Anpassungen an der Steuerung von SBA bezüglich der zukünftigen Szenarien von kooperativem und automatisiertem Fahren sinnvoll bzw. notwendig sein werden. Darüber sollen die sich aus dem technologischen Fortschritt im Bereich der fahrzeugseitigen Kommunikation sowie der zunehmenden Automatisierung des Fahrens ergebenden Möglichkeiten bewertet und Vorgaben für das Fahrzeugsteuerungsverhalten erarbeitet werden, um den Verkehrsablauf aus Sicht der Betreiber weiter zu verbessern.

Die so erarbeiteten Anforderungen werden hinsichtlich der Wirkung auf den Verkehrsablauf simulativ untersucht und mit den Ergebnissen von konventionellen Szenarien verglichen. Daraus lassen sich Abschätzungen treffen, inwieweit die Wirkungen durch kooperative Systeme und automatisierte Fahrzeuge weiter verbessert werden können und ob und wie die Vorgehensweise der SBA-Steuerung in solchen Szenarien angepasst werden muss.

Zunächst wird im Rahmen einer Grundlagenanalyse der Stand der Technik bezüglich Fahrverhaltens-

modellen für Verkehrsteilnehmer auf Autobahnen, Fahrzeugautomatisierung, SBA-Maßnahmen und ihrer verkehrlichen Wirkung sowie zur Abbildung des Fahrverhaltens in der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation aufbereitet. Aufbauend auf diesen Grundlagen werden die zu untersuchenden verkehrlichen Szenarien für zwei Referenzstrecken definiert und die Kenngrößen zur Bewertung des Verkehrsablaufs sowie zur Ermittlung der Wirkung von SBA-Maßnahmen festgelegt. Auf Grundlage der zur Verfügung stehenden Daten der Referenzstrecken wird ein realistisches Verhaltensmodell des Verkehrs ohne automatisierte Fahrzeuge (Status quo) in SBA-Bereichen aufgestellt.

Die Simulation wird mit einer MARZ-konformen Standard-Unterzentrale gekoppelt (closed loop), d. h. die Simulation liefert der UZ die notwendigen Verkehrsdaten als Input und die UZ stellt im Gegenzug die ermittelten Schaltzustände der SBA an die Simulation zurück. Die Auswertung der Szenarien für die beiden Referenzstrecken mit konventionellen Fahrzeugen (ohne automatisierte Fahrzeuge) bildet die Referenz im Hinblick auf die Wirkung der SBA im Vergleich zu Szenarien mit unterschiedlichen Ausstattungsgraden automatisierter Fahrzeuge.

Anschließend werden sinnvolle Szenarien automatisierter Fahrzeuge definiert und ein Modell zur Simulation automatisierter Fahrzeuge in der mikroskopischen Simulation implementiert. Um die Einflüsse unterschiedlicher Ausprägungen der automatisierten Fahrzeugsteuerung bewerten zu können, werden neben dem Szenario „wünschenswertes Fahrzeugsteuermodell aus Betreibersicht“ zwei weitere Ausprägungen automatisierten Fahrens definiert (konservatives und progressives Fahrprofil). Zusätzlich werden aufbauend auf diesen Festlegungen Variationen bezüglich der SBA-Steuerungsparameter definiert, um eine Bewertung zu ermöglichen, inwiefern diese Anpassungen insbesondere im Mischverkehr zu einer Verbesserung der Wirksamkeit der SBA beitragen. Die Szenarien werden in das Simulationsmodell übernommen und mit unterschiedlichen Ausstattungsgraden simuliert und ausgewertet.

Abschließend werden die Projektergebnisse kritisch diskutiert und hinsichtlich ihrer Belastbarkeit und Übertragbarkeit bewertet. Schließlich werden Handlungsempfehlungen in Form einer Road Map erarbeitet. Dabei werden die sinnvollen bzw. notwendigen Anpassungen auf der Fahrzeugseite und der SBA-Steuerung unter Annahme realistisch stei-

gender Durchdringungsraten automatisierter Fahrzeuge in einen zeitlichen Kontext gebracht und Maßnahmen zur optimalen Unterstützung des Verkehrsablaufs definiert. Damit steht Betreibern ein Überblick zur Verfügung, welche Erweiterungen und Umrüstungen erforderlich bzw. sinnvoll sind, damit kollektive Verkehrsbeeinflussung in Szenarien mit automatisierten Fahrzeugen sinnvoll betrieben werden kann.

2 Grundlagen

Als Grundlage für die nachfolgenden Arbeitspakete wurde in der Anfangsphase des Vorhabens eine Erhebung und Aufbereitung des aktuellen Stands von Wissenschaft und Technik in den Bereichen Fahrverhaltensmodellierung und Verkehrsflusssimulation, Wirkungen von Streckenbeeinflussungsanlagen sowie Fahrzeugautomatisierung durchgeführt. Dabei werden wichtige Festlegungen und Annahmen für die weitere Bearbeitung des Vorhabens getroffen.

2.1 Begriffe

Die derzeit existierende Literatur kommt zu keiner einheitlichen Betrachtung der Begriffe Akzeptanz, Befolgung, Wahrnehmung, Wirkung und Wirksamkeit. Es ist daher essenziell, die Begriffe vorab zu differenzieren und zu definieren.

Akzeptanz

Der Begriff Akzeptanz (*accipere* [lat.]: annehmen, billigen, gutheißen) beschreibt die uneingeschränkte Bereitschaft, eine Situation, einen Sachverhalt und/oder eine Person hinzunehmen. Der Sachverhalt wird also billigend angenommen. Die Voraussetzung dazu ist, dass der Sachverhalt auf Freiwilligkeit beruht.

Die Akzeptanz schließt eine wohlwollende Zustimmung des Verkehrsteilnehmers mit ein. Sie setzt also eine bewusste Entscheidung des Verkehrsteilnehmers voraus. Die Akzeptanz ist nicht messbar, sondern allenfalls durch Befragungen der Verkehrsteilnehmer zu erheben.

Befolgungsgrad

Verkehrsrechtliche Anordnungen müssen in erster Linie befolgt werden. Der Befolgungsgrad wird als

messbare Kenngröße in bewusster Abgrenzung zum Kriterium Akzeptanz verwendet. Der Befolgungsgrad ist mittels eines Mit-Ohne-Vergleichs automatisiert bestimmbar. Dabei muss berücksichtigt werden, dass der Befolgungsgrad nicht immer auf einer freiwilligen Entscheidung des Verkehrsteilnehmers basiert, sondern der Befolgungsgrad auch erzwungen werden kann. Das heißt, dass der Fahrer aufgrund der aktuellen Verkehrssituation keine Möglichkeit hat, schneller zu fahren als durch die Geschwindigkeitsanzeige vorgegeben. Der Befolgungsgrad kann außerdem durch entsprechendes Enforcement (z. B. Geschwindigkeitsüberwachung) maßgeblich beeinflusst werden.

Der Befolgungsgrad beinhaltet jedoch auch die Verkehrsteilnehmer, die aufgrund der Akzeptanz der Maßnahme durch die übrigen Verkehrsteilnehmer ihr Verhalten zwangsläufig anpassen müssen.

Ein Befolgungsgrad kann für mehrere Kriterien im Verkehrsablauf bewertet werden. Im Kontext für diese Studie ist der Befolgungsgrad der zulässigen Höchstgeschwindigkeit von Belang. Weitere Kriterien können die Befolgung des Lkw-Überholverbots, von Fahrstreifensperrungen oder Umleitungsempfehlungen sein.

Wahrnehmbarkeit

Die Wahrnehmbarkeit ist ein entscheidendes Kriterium für eine hohe Befolgung der Anlage und der daraus resultierenden Wirkung. Es muss sichergestellt werden, dass die dargestellten Informationen auf den Wechselverkehrszeichen (WVZ) eindeutig zu lesen und zu interpretieren sind. Können die angezeigten Informationen nicht rechtzeitig vom Verkehrsteilnehmer erfasst und verarbeitet werden, kann sich dies in einem niedrigen Befolgungsgrad widerspiegeln.

Wirkung

Maßnahmen der Verkehrsbeeinflussung, fahrzeugseitige Assistenzfunktionen oder Fahrzeugautomatisierung sowie auch weitere Einflussfaktoren können unterschiedliche Wirkungen auf den Verkehrsablauf und das individuelle Fahrverhalten ausüben. Unter dem Begriff Wirkung werden hierbei sowohl erwünschte Effekte hinsichtlich definierter Wirkziele als auch zusätzliche, auch negative Effekte subsummiert.

Wirksamkeit

Die Wirksamkeit einer Maßnahme der Verkehrsbeeinflussung oder einer bestimmten Fahrzeugfunktion bezieht sich demgegenüber nur auf erwünschte Effekte bzgl. definierter Wirkziele und beschreibt, in welchem Maße die Wirkziele erreicht werden.

2.2 Verhaltensmodelle und Verkehrssimulation

Verkehrssimulation wird häufig eingesetzt, um die verkehrlichen Wirkungen von baulichen oder verkehrsrechtlichen Anpassungen am Verkehrssystem, von Maßnahmen zur kollektiven Verkehrssteuerung sowie zunehmend auch von fahrzeugseitigen Anwendungen oder Funktionen zu untersuchen. Bei Untersuchungen zu Anpassungen am Verkehrssystem oder an der Verkehrssteuerung bietet die Simulation die Möglichkeit, den Nutzen einer Maßnahme im Vorhinein abschätzen und unterschiedliche Realisierungsvarianten bewerten zu können. Bei Untersuchungen zu fahrzeugseitigen Anwendungen ist die Verkehrssimulation vor allem dann vorteilhaft, wenn eine erhebliche Durchdringung des Fahrzeugkollektivs mit Fahrzeugen bestimmter Ausstattung betrachtet werden soll. Bereits Szenarien mit mäßiger Durchdringung lassen sich mit Versuchsfahrten nicht mehr wirtschaftlich realisieren. Ein weiterer Vorteil von Simulation gegenüber Versuchsfahrten oder auch Natural Driving Studies (NDS) ist, dass in der Simulation sämtliche Randbedingungen und äußeren Einflüsse vorgegeben und kontrolliert werden können.

Verkehrssimulation basiert auf einer modellhaften Abstraktion des realen Verkehrsgeschehens und -verhaltens. Der Detaillierungsgrad des Modells muss sich dabei an der Zielsetzung der Untersuchung orientieren. Grundsätzlich wird zunächst zwischen folgenden Modellskalen unterschieden [FGSV06] [Tre10]:

Makroskopische Modelle bilden Verkehrsprozesse auf einer über das gesamte Fahrzeugkollektiv aggregierten Ebene ab, indem Zusammenhänge zwischen Verkehrskenngrößen wie Dichte, Fluss und Geschwindigkeit abgebildet werden.

Mikroskopische Modelle bilden demgegenüber das Verhalten einzelner Fahrer-Fahrzeug-Einheiten (FFE) und ihre Interaktion untereinander ab. Das Verhalten jedes Fahrzeugs wird dabei individuell er-

mittelt, i. d. R. in Abhängigkeit von Abständen und Relativgeschwindigkeiten zu anderen FFE im unmittelbaren Umfeld.

Mesoskopische Modelle bilden eine Zwischenform zwischen der makroskopischen und der mikroskopischen Modellierungsebene. Hierzu zählen Modelle, in denen zwar einzelne Fahrzeuge in der Simulation untersucht werden können, deren Verhalten aber durch makroskopische Wirkzusammenhänge definiert wird.

Submikroskopische Modelle (auch nanoskopische Modelle) bilden das Verhalten einzelner Teilsysteme innerhalb einer FFE ab. Auf diese Weise können fahrdynamische Eigenschaften eines Fahrzeugs oder auch Motivationen von Fahrzeugführenden differenzierter abgebildet werden, allerdings ist der Aufwand zur Versorgung derartiger Modelle sehr groß und es werden typischerweise nur eines oder wenige Fahrzeuge auf dieser Ebene untersucht.

Werden Modelle mehrerer Skalen gemeinsam in einer Simulation eingesetzt (z. B. mikroskopisches Modell in Verflechtungssituationen und mesoskopisches Modell im übrigen Simulationsgebiet), so spricht man von einem Hybridmodell.

Zu den Aufgabenstellungen dieses Vorhabens gehört die Untersuchung der Wirkungen

- von Schaltzuständen einer Streckenbeeinflussungsanlage sowie
- von Fahrzeugautomatisierung in unterschiedlicher Ausprägung und bei unterschiedlicher Durchdringung

im Rahmen einer Simulation. Auf die erwarteten und aus der Literatur bekannten Wirkungen dieser beiden Einflussfaktoren wird in Kapitel 2.3 und 2.4 eingegangen. Da insbesondere Unterschiede des Interaktionsverhaltens sowie der Streuung unterschiedlicher Verhaltensparameter zu erwarten sind, ist für dieses Vorhaben eine Modellierung auf Einzelfahrzeugebene notwendig. Nachfolgend werden somit Modelle der mikroskopischen Ebene und ihre Umsetzung in Simulationswerkzeugen näher betrachtet.

Grundlage für eine mikroskopische Verkehrsflusssimulation sind Fahrverhaltensmodelle. Zwar gibt es noch kein allgemein akzeptiertes Modell zur Abbildung der Gesamtheit aller Fahraufgaben [Pan07], jedoch existieren insbesondere für die Verkehrsflusssimulation bereits eine Vielzahl etablierter und

bewährter Modelle für verschiedene Fahraufgaben, die teils auch ineinandergreifen. In Kapitel 2.2.3 werden diese Modelle detaillierter beschrieben. Hierbei wird auch eingehend betrachtet, wie in der Realität beobachtbare kooperative Interaktionen zwischen Verkehrsteilnehmern, die Befolgung verkehrsrechtlicher Vorgaben oder auch die Wirkungen von Warnungen und Empfehlungen in der Simulation abgebildet werden können. Die Fahrverhaltensmodelle verfügen über diverse Parameter, mit denen das modellierte Fahrverhalten an empirisch beobachtete Gegebenheiten angepasst werden kann. Der Kalibrierung und Validierung dieser Parameter kommt eine große Bedeutung zu, da nur so eine Gültigkeit der Simulationsergebnisse unterstellt werden kann. Dem Prozess der Kalibrierung und Validierung widmet sich daher Kapitel 2.2.4. Schließlich werden Schlussfolgerungen für dieses Vorhaben zusammengefasst und Anforderungen an die zu verwendenden Simulationsmodelle sowie den Kalibrierungs- und Validierungsprozess benannt.

2.2.1 Klassifizierung von Fahrverhalten

Fahrverhalten lässt sich zunächst hinsichtlich des räumlichen und zeitlichen Betrachtungshorizonts klassifizieren. In der Literatur existieren verschiedene Ansätze, Ebenen des Fahrverhaltens abzugrenzen. Meist werden jedoch mindestens die folgenden drei Ebenen unterschieden (z. B. [FGSV06], [Mic85], Bezeichnung nach [FGSV06]):

- strategische Ebene (langfristig)
- taktische Ebene (mittelfristig)
- operationale Ebene (ad-hoc)

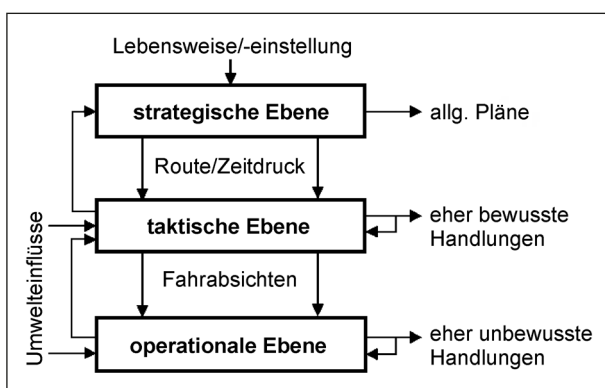


Bild 2-1: Fahrentscheidungsebenen; modifiziert nach [Pan07] (in Anlehnung an [FGSV06])

Die Einteilung in derartige Ebenen entstand einerseits aus der Sicht der Verkehrspsychologie, wo mittels Verhaltensmodellen etwa die Wirkung fahrzeugseitiger Assistenzfunktionen auf die Risikobereitschaft oder die Belastung des Fahrenden betrachtet werden sollen [Pan07]. Auf der anderen Seite spielen auch im Kontext hochautomatisierten Fahrens zeitlich und räumlich unterschiedliche Betrachtungsebenen eine Rolle, da ein automatisiertes Fahrzeug nicht nur ad-hoc auf Ereignisse in der unmittelbaren Umgebung reagieren, sondern ähnlich wie ein menschlicher Fahrer auch manöverübergreifend und vorausschauend fahren können muss [Ul14] [Wil12]. Dies gilt auch auf das Fahrverhalten simulierter Fahrzeuge in einer mikroskopischen Verkehrsflusssimulation. Aufgrund der unterschiedlichen Betrachtungswinkel unterscheidet sich die Abgrenzung dieser Ebenen in der Literatur teils deutlich. Für die Verkehrsflusssimulation ist in [FGSV06] eine Definition der drei o. g. Ebenen gegeben, die für dieses Vorhaben übernommen wird:

Die strategische Ebene umfasst vor allem Entscheidungen zur Routen- und Verkehrsmittelwahl und weist somit die größte räumliche und zeitliche Ausdehnung auf. Nach [Mic85] entstehen hier Anforderungen an eine Fahrt, die z. B. Einfluss auf die Risikobereitschaft und die Geschwindigkeitswahl haben können.

Die taktische Ebene beinhaltet die Einleitung von Fahrmanövern und andere Entscheidungen, die zu einem kurzfristig vorausschauenden Fahren beitragen (Wirkbereich 100-1.000 m bzw. Sekunden bis Minuten, [FGSV06]). Hierzu gehört z. B. eine Überholentscheidung, eine situationsangepasste Wahl der Wunschgeschwindigkeit oder eine vorausschauende Fahrstreifenwahl, um einen Fahrtrichtungswechsel an einem Knotenpunkt vorzubereiten. Diese Ebene ist bedeutsam, da sich auf dieser Ebene einerseits interaktive Kooperation zwischen Verkehrsteilnehmern abspielt und da andererseits Reaktionen auf eine vorherrschende Situation (inkl. Schaltzustand einer Streckenbeeinflussungsanlage) auf dieser Ebene wirken.

Die operationale Ebene umfasst schließlich die eigentliche Umsetzung von Fahrhandlungen, etwa das Beschleunigen und Bremsen oder das Durchführen eines Fahrstreifenwechsels.

Fahrentscheidungen auf der jeweils übergeordneten Ebene haben Auswirkungen auf die darunterliegenden Ebenen. So wird das operationale Verhal-

ten determiniert durch Fahrstreifenwechselwünsche und die Wunschgeschwindigkeit, die sich auf der taktischen Ebene ergeben.

Für dieses Vorhaben ist die Abbildung von Entscheidungen der taktischen und operationalen Ebene von Bedeutung, da diese das streckenbezogene Fahrverhalten bestimmen.

Neben dieser Abgrenzung von Fahrverhaltensebenen nach zeitlichem und räumlichem Horizont lassen sich Fahrverhaltensmodelle hinsichtlich der Fahraufgaben klassifizieren, die sie abbilden. In Bezug auf die für dieses Vorhaben relevanten Ebenen taktischer und operationaler Fahrentscheidungen wird i. d. R. folgende Abgrenzung vorgenommen:

- Fahrzeugfolgemodelle: Längsverhalten längs eines Fahrstreifens, inkl. Geschwindigkeitswahl
- Fahrstreifenwechselmodelle
- Lückenakzeptanzmodelle (Knotenpunkte)

Von diesen Fahraufgaben sind für die in diesem Vorhaben vorgesehene Betrachtung des Verkehrs auf Autobahnen nur die ersten beiden relevant, die daher in Kapitel 2.2.3 detaillierter betrachtet werden.

2.2.2 Überblick: Simulationswerkzeuge

Nachfolgend werden die Werkzeuge für die mikroskopische Verkehrsflusssimulation kurz beschrieben, auf die in den nachfolgenden Betrachtungen zu den Fahrverhaltensmodellen Bezug genommen wird (in alphabetischer Reihenfolge). Die hier genannten Simulationswerkzeuge wurden in [Gei17] für die Simulation des Verkehrsablaufs an unterschiedlichen Entwurfs-elementen von Autobahnen genutzt und hierfür kalibriert, sodass sie als grundsätzlich geeignet für die Aufgabenstellung dieses Vorhabens angesehen werden. Daneben existieren etliche weitere Simulationswerkzeuge, die jedoch nicht näher betrachtet werden.

AIMSUN [TSS14] (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks) ist ein kommerzielles Produkt des gleichnamigen spanischen Unternehmens (ehemals Transport Simulation Systems, TSS). In AIMSUN sind das Fahrzeugfolgmodell und das Fahrstreifenwechselmodell nach GIPPS [Gip81] implementiert. Neben diesen Modellen für die Simulation auf mikroskopischer Ebene werden auch Simulationen auf makro-

skopischer und mesoskopischer Ebene unterstützt. Mittels einer Programmierschnittstelle für externe Anwendungen (API) können während der Simulation Informationen ausgegeben sowie Objekte in der Simulation beeinflusst werden. Es stehen umfassende Möglichkeiten zur Verfügung, um Maßnahmen des Verkehrsmanagements oder Störungen zu modellieren.

BABSIM [Har07] [Bast18] wurde im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen durch die Ruhr-Universität Bochum entwickelt. Es handelt sich demnach nicht um ein kommerzielles Produkt, sondern wird den Straßenbauverwaltungen der Länder sowie Auftragnehmern zur Verfügung gestellt. Im Gegensatz zu den anderen hier genannten Simulationswerkzeugen ist BABSIM speziell für die Simulation von Autobahnverkehr konzipiert. Das Fahrzeugfolge- und Fahrstreifenwechselverhalten wird durch sechs verschiedene Absichten bestimmt, die anschließend zu einer resultierenden Handlung zusammengeführt werden. Eine der sechs Absichten und zwar „Abstand halten“, greift auf eine weiterentwickelte Form des Fahrzeugfolgmodells nach WIEDEMANN zurück, die übrigen Absichtsmodelle sind eigene Modelle, die zwar teilweise auch Einfluss auf die Beschleunigung nehmen können, aber dennoch unter den Fahrstreifenwechselmodellen beschrieben sind. BABSIM verfügt über Möglichkeiten, um Verkehrsbeeinflussungsanlagen auf Autobahnen zu modellieren. Eine Schnittstelle zur Interaktion mit externen Anwendungen während der Simulationslaufzeit ist nicht beschrieben.

SUMO [DLR18a] (Simulation of Urban Mobility) ist ein Open-Source-Projekt, das maßgeblich vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. vorangetrieben wird. Während anfangs die Simulation von innerstädtischem Verkehr im Vordergrund stand, ist mittlerweile auch eine Anwendung im Autobahnbereich möglich. Es stehen mehrere Fahrzeugfolgemodelle zur Verfügung, darunter die Modelle nach KRAUß [Kra98] (in weiterentwickelter Form), WIEDEMANN [Wie74] sowie das Intelligent Driver Model von [Tre00]. Als Fahrstreifenwahlmodell wird standardmäßig das Modell nach [Erd14] verwendet; daneben können auch weitere Modelle genutzt werden. Auch SUMO verfügt über eine Schnittstelle, mit der Objekte in der Simulation abgefragt und beeinflusst werden können.

Paramics (Parallel Microscopic Simulation) ist ein kommerzielles Simulationswerkzeug, das von den Unternehmen Quadstone und SIAS vertrieben wird.

Als Fahrzeugfolgmodell wird das Modell nach FRITZSCHE [Fri94] verwendet, das Fahrstreifenwahlmodell ähnelt dem von GIPPS [Gei17]. Auch Paramics verfügt über eine Schnittstelle zur Interaktion mit Simulationsobjekten zur Laufzeit.

VISSIM (Verkehr in Städten Simulation) wird von der PTV AG kommerziell angeboten. Ebenso wie SUMO wurde es ursprünglich v. a. für Simulationen im innerstädtischen Raum konzipiert, ist aber heute auch für Untersuchungen auf Autobahnen einsetzbar. Als Fahrzeugfolgmodell in VISSIM steht das Modell nach WIEDEMANN [Wie74] sowie eine unveröffentlichte Weiterentwicklung (WIEDEMANN 99) zur Verfügung. Das Fahrstreifenwechselmodell basiert auf dem Modell nach SPARMANN [Spa78], ist aber ebenfalls erheblich weiterentwickelt worden (in der Dokumentation von VISSIM [PTV11] wird kein Bezug zum Modell nach SPARMANN hergestellt). Auch VISSIM verfügt über eine Schnittstelle, um während der Laufzeit mit Objekten in der Simulation interagieren zu können. Ebenso lassen sich diverse Verkehrsmanagement-Anwendungen realisieren. Neueste Entwicklungen umfassen die Ergänzung eines mesoskopischen Simulationsmodells sowie die Ergänzung eines Moduls speziell für die Simulation von V2X-Anwendungen.

2.2.3 Fahrverhaltensmodelle

Wie in Kapitel 2.2.1 dargelegt, werden Fahrverhaltensmodelle für die mikroskopische Verkehrsflusssimulation in Fahrzeugfolgmodellen und Fahrstreifenwechselmodellen unterschieden, die in Kapitel 2.2.3.1 bzw. 2.2.3.2 betrachtet werden. Der Schwerpunkt liegt dabei bewusst auf solchen Modellen, die in den verbreiteten Simulationsumgebungen (vgl. Kapitel 2.2.2) eingesetzt werden und die somit für das gegenständliche Vorhaben prinzipiell nutzbar sind. Dementsprechend wird nicht nur auf die ursprünglich publizierten Modelle, sondern auch Weiterentwicklungen und Ausprägungen im Rahmen der Implementierung eingegangen. Die daran anschließenden Kapitel setzen sich detaillierter mit der Abbildung taktischer Fahrentscheidungen (Kapitel 2.2.3.3) sowie der Wirkungen kollektiver oder auch individueller Verkehrsbeeinflussung (Kapitel 2.2.3.4) in der Simulation auseinander.

2.2.3.1 Fahrzeugfolge und Geschwindigkeit

Fahrzeugfolgmodelle bestimmen das Beschleunigungsverhalten einer FFE innerhalb eines Fahr-

streifens. Dieses wird allgemein von vorausfahrenden Fahrzeugen, baulichen Randbedingungen (z. B. Annäherung an ein Fahrstreifenende oder Hindernis) sowie von der (ggf. situationsabhängigen) Wunschgeschwindigkeit beeinflusst. Da der Fahrzeugfolgeprozess durch erhebliche Unterschiede zwischen individuellen Fahrern und Fahrzeugen gekennzeichnet ist, berücksichtigen einige Modelle dies durch Einbeziehung stochastischer Einflussfaktoren.

Fahrzeugfolgmodelle können nach [Ols04] und [Det11] in Abhängigkeit von ihren zugrundeliegenden Grundannahmen wie folgt kategorisiert werden:

- Stimulus-Response-Modelle
- Safety-Distance-Modelle
(auch: Collision-Avoidance-Modelle)
- Psycho-physische Modelle
(auch: Action-Point-Modelle)
- Zellularautomaten

Stimulus-Response-Modelle beschreiben die Längsbeschleunigung bzw. -verzögerung eines Fahrzeugs in Abhängigkeit von der Differenzgeschwindigkeit zwischen Führungsfahrzeug und Folgefahrzeug (Stimulus). Diese Modelle sind im Vergleich zu den Modellen der anderen Kategorien durch zeitkontinuierliche Modellgleichungen gekennzeichnet. Vertreter dieser Kategorie sind u. a. das Modell nach GAZIS-HERMAN-ROTHERY [Gaz61], das Intelligent Driver Model [Tre00] und das Optimal Velocity Model [Ban95].

Das Modell nach GAZIS, HERMAN und ROTHERY verfügt über vier Parameter und zwar die Sensitivität bzgl. der Reaktion auf eine Geschwindigkeitsdifferenz (λ), die Reaktionsdauer (τ) sowie Exponenten, die auf die Geschwindigkeit (m) bzw. den Abstand (l) wirken. Die Exponenten m und l sind dabei so zu wählen, dass sie eine Übereinstimmung mit empirischen Verkehrsdaten ermöglichen. Vorschläge für diese beiden Parameter aus der Literatur sind in [Det11] zusammengefasst. Sie unterscheiden sich jedoch deutlich untereinander.

Stimulus-Response-Modelle sind in der Praxis wenig verbreitet. Unter den in Kapitel 2.2.2 genannten Simulationswerkzeugen ist lediglich in SUMO eines dieser Modelle und zwar das Intelligent Driver Modell implementiert; es kann dort als Alternative zum standardmäßig genutzten Modell nach KRAUß ein-

gesetzt werden. Aus diesem Grunde werden diese Modelle nicht eingehender betrachtet.

Safety-Distance-Modelle sind charakterisiert durch die Annahme, dass ein Fahrzeug stets einen als sicher definierten Abstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug einhält. Hierbei wird neben weiteren Parametern eine Reaktionszeit berücksichtigt. Im Falle, dass keine Fahrzeugfolgesituation gegeben ist, wird die Wunschgeschwindigkeit angestrebt bzw. gehalten. Wichtige Vertreter dieser Klasse sind die Modelle nach GIPPS [Gip81] (eingesetzt in AIMSUN) sowie KRAUß [Kra98] (neben anderen Modellen eingesetzt in SUMO). Diese sind nachfolgend detaillierter beschrieben. Zudem befindet sich eine steckbriefartige Beschreibung im Anhang 1.

Psycho-physische Modelle sind im Gegensatz zu den beiden zuvor beschriebenen Kategorien dadurch gekennzeichnet, dass eine Reaktion auf ein vorausfahrendes Fahrzeug nur dann erfolgen kann, wenn dessen Verhalten innerhalb der Grenzen der Wahrnehmbarkeit liegen. Bei weiter entfernten Fahrzeugen sind nur größere Geschwindigkeitsänderungen wahrnehmbar, während bei abnehmender Entfernung auch kleinere Änderungen wahrnehmbar werden. Wichtige Vertreter sind die Modelle nach WIEDEMANN [Wie74] (eingesetzt u. a. in VISSIM und BABSIM) sowie FRITZSCHE [Fri94] (eingesetzt in Paramics). Auch auf diese beiden Modelle wird nachfolgend vertieft eingegangen und sie sind ebenfalls steckbriefartig im Anhang 1 beschrieben.

Modell nach GIPPS [Gip81] (AIMSUN)

Im Modell nach GIPPS als einem Vertreter der Safety-Distance-Modelle wird die Geschwindigkeit einer FFE so gewählt, dass ein als sicher geltender Abstand eingehalten wird. Ein sicherer Abstand ist im Modell nach GIPPS dadurch gekennzeichnet, dass die betrachtete FFE (Ego-FFE) eine Kollision mit dem vorausfahrenden Fahrzeug vermeiden kann, auch wenn dieses mit größter anzunehmender Verzögerung zum Stehen kommt. Die Verzögerung des vorausfahrenden Fahrzeugs wird in der Ego-FFE abgeschätzt. Unterschätzt diese die maximale Verzögerung des Vorausfahrenden, kann sie eine noch stärkere Verzögerung als die Wunschverzögerung wählen, sodass es auch in diesem Fall zu keiner Kollision kommt. Das Fahrzeugfolgemodell nach GIPPS wird in AIMSUN verwendet. Das Modell wurde nach [Det11] so gestaltet, dass dessen

Parameter mit offensichtlichen Charakteristiken des Fahrers und des Fahrzeugs übereinstimmen. Folgende Parameter zur Beeinflussung der Längsführung stehen zur Verfügung [TSS14]:

- Wunschgeschwindigkeit
- Maximale Beschleunigung
- Normale und maximale Verzögerung
- Befolgungsgrad von Geschwindigkeitsbegrenzungen
- Mindestabstand zum Vorausfahrenden bei Stillstand
- Mindest-Zeitlücke
- Sensitivity Factor (beeinflusst die Risikobereitschaft im Fahrzeugfolgeverhalten)
- Reaktionsdauer

Für sämtliche dieser Parameter kann neben einem Mittelwert eine Standardabweichung und eine obere sowie untere Grenze angegeben werden.

Modell nach KRAUß [Kra98] (SUMO)

Das Modell nach KRAUß, ebenso ein Safety-Distance-Modell, ist ebenfalls ein grundsätzlich kollisionsfreies Modell (wenngleich Kollisionen unter bestimmten Umständen auftreten können). Der Abstand gilt als sicher, wenn die vorausfahrende FFE innerhalb der Verzögerungsgrenzen der vorausfahrenden und der Ego-FFE fährt. Weiterhin ist das Modell durch eine Begrenzung von Geschwindigkeit und Beschleunigungen der Fahrzeuge gekennzeichnet und die FFE streben an, ihre Geschwindigkeit unter Einhaltung dieser Grenzen zu wählen. Im Gegensatz zum Modell nach GIPPS wird außerdem die Unvollkommenheit des Fahrers durch Induzieren zufälliger Störeinflüsse in die Längsführung berücksichtigt, deren Auswirkung parametrierbar ist. Das Modell wurde in SUMO als eines von mehreren Fahrzeugfolgemodellen implementiert. Inzwischen wurde eine weiterentwickelte Version des Modells umgesetzt, die gegenüber dem ursprünglichen Modell vor allem das Auftreten von Kollisionen noch stärker einschränkt [DLR18b]. Folgende Parameter beeinflussen das Längsverhalten [DLR18b]:

- Max. Geschwindigkeit
- Max. Beschleunigung

- Verzögerung, die im Normalfall eingehalten wird
- Max. Verzögerung (um Kollisionen zu vermeiden)
- Zufällige Störung; Unvollkommenheit des Fahrers
- Reaktionsdauer
- Mindestabstand zum Vorausfahrenden bei Stillstand

Modell nach WIEDEMANN [Wie74] (VISSIM u. a.)

Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Safety-Distance-Modellen wird im psycho-physischen Modell nach WIEDEMANN angenommen, dass ein Fahrer nur unvollständige Informationen über sein Umfeld hat und dieses nur im Rahmen von Wahrnehmungsgrenzen im Fahrverhalten berücksichtigen kann. So können geringe Geschwindigkeitsunterschiede nur bei geringem Abstand wahrgenommen werden; größere Geschwindigkeitsunterschiede dagegen schon aus größerer Entfernung. Ebenso wird eine unvollkommene Beherrschung des Gaspedals berücksichtigt. WIEDEMANN unterscheidet vier Fahrzustände, für die jeweils eigene Vorschriften zur Bestimmung der Geschwindigkeit gelten:

- Unbeeinflusstes Fahren (Annäherung an oder Halten der Wunschgeschwindigkeit)
- Bewusst beeinflusstes Fahren (Annäherung an ein deutlich langsames vorausfahrendes Fahrzeug anhand kinematischer Formel mit zufälligem Schätzfehler und zufälliger Reaktionszeit)
- Unbewusst beeinflusstes Fahren (Folgefahrt hinter einem mit ähnlicher Geschwindigkeit fahrenden Fahrzeug; Abstand oszilliert und driftet hin zu größeren Abständen)
- Abwenden einer Gefahrensituation (stärkeres Bremsen)

Der Übergang zwischen diesen Fahrzuständen ist durch Grenz-Kennlinien in der Geschwindigkeits-Abstands-Ebene definiert.

Das Modell ist durch stochastische Einflussfaktoren gekennzeichnet, die z. T. fahrerspezifisch sind, z. T. aber auch für ein und denselben Fahrer während einer Fahrt variieren können.

Das Modell nach WIEDEMANN wird in VISSIM verwendet und wurde dort weiterentwickelt und ergänzt. Die Modellerweiterung ist bekannt als WIEDEMANN 99 [PTV11], jedoch nicht offen dokumentiert. Der Einsatz des ursprünglichen Modells wird insbesondere für innerstädtische Abschnitte und Verflechtungsbereiche empfohlen, während das Modell WIEDEMANN 99 vor allem für Autobahnabschnitte außerhalb von Verflechtungsbereichen geeignet ist [PTV11]. In VISSIM stehen für das ursprüngliche Modell (WIEDEMANN 74) folgende Parameter zur Verfügung:

- Mittlerer Stillstandsabstand (a_x)
- Additiver Einfluss Sicherheitsabstand (b_x_add , in [Wie74] fester Wert)
- Multiplikativer Einfluss Sicherheitsabstand (b_x_mult , in [Wie74] fester Wert)

Im erweiterten Modell (WIEDEMANN 99) stehen folgende Parameter zur Verfügung [PTV11]:

- Stillstandsabstand (CC0)
- Folgeabstand (CC1)
- Längs-Oszillation/Abstandsdifferenz (CC2)
- Beginn Verzögerungsvorgang (CC3)
- Geschwindigkeitsdifferenzen während des Folgevorgangs (CC4, CC5)
- Oszillation der Geschwindigkeit während des Folgevorgangs (CC6)
- Beschleunigung während der Oszillation (CC7)
- Wunschbeschleunigung aus dem Stillstand (CC8)
- Wunschbeschleunigung bei 80 km/h (CC9)

Darüber hinaus bietet VISSIM (als Erweiterung zum ursprünglichen Modell nach [Wie74]) die Möglichkeit, mehr als nur ein vorausfahrendes Fahrzeug im Fahrzeugfolgeverhalten zu berücksichtigen (parametrierbar über Vorausschauweite und Anzahl der Vorderfahrzeuge). Auch lässt sich eine zufällige Unaufmerksamkeit abbilden, in der Fahrzeuge temporär nicht auf das vorausfahrende Fahrzeug reagieren (ausgenommen zur unmittelbaren Kollisionsvermeidung; Wahrscheinlichkeit und Dauer parametrierbar). Schließlich können je Fahrzeugtyp maximale (technisch machbare) sowie gewünschte Beschleunigungen und eine Häufigkeitsverteilung der

Wunschgeschwindigkeiten (Festlegung von Stützpunkten der Verteilungsfunktion) angegeben werden. Um Einflüsse von Lkw z. B. an Steigungen abbilden zu können, lassen sich für diese Fahrzeugklasse auch Masse- und Leistungsverteilungen definieren.

Auch BABSIM nutzt das Modell nach WIEDEMANN zur Bestimmung der Fahrabsicht „Abstand halten“, eine von mehreren Fahrabsichtsmodulen, die Einfluss auf Beschleunigung und Geschwindigkeit haben. Für BABSIM wurde das Modell ähnlich wie auch in VISSIM durch das zufällige Auftreten von Trödeln erweitert (hier: nicht beschleunigen, obwohl möglich), um Stau aus dem Nichts besser nachbilden zu können.

Das WIEDEMANN-Modell kommt außerdem in SUMO sowie im submikroskopischen Simulationswerkzeug PELOPS zum Einsatz.

Modell nach FRITZSCHE [Fri94] (Paramics)

Das Fahrzeugfolgmodell nach FRITZSCHE ist ebenso wie das Modell nach WIEDEMANN den psycho-physischen Modellen zuzuordnen. Auch im Modell nach FRITZSCHE wird in Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Abstand zwischen verschiedenen Fahrzuständen unterschieden:

- Freies Fahren
- Folgen I
- Folgen II
- Annähern
- Gefahr

Das Modell nach FRITZSCHE wird im Simulationsmodell Paramics genutzt. Dort sind der mittlere gewünschte Abstand sowie die mittlere Reaktionszeit als globale Parameter (über alle Fahrzeuge und das gesamte Netz) einstellbar. Für einzelne FFE lassen sich darüber hinaus Parameter einstellen, die die Aufmerksamkeit und Aggressivität beeinflussen [Gei17].

2.2.3.2 Fahrstreifenwahl und -wechsel

Mittels Fahrstreifenwechselmodellen werden die wesentlichen Fahrentscheidungen abgebildet, die der Vorbereitung und Umsetzung eines Fahrstreifenwechsels dienen. Dies umfasst (z. B. nach

[Har07]) einerseits eine auslösende Motivation und andererseits eine Überprüfung der Durchführbarkeit und die anschließende operationale Umsetzung. Die auslösende Motivation ist hierbei der taktischen Fahrentscheidungsebene zuzuordnen. Taktischen Fahrentscheidungen beim Fahrstreifenwechsel kommt eine große Bedeutung zu, um den Verkehrsablauf an Autobahnen und insbesondere an den Knotenpunkten realitätsgetreu abbilden zu können [Gei17].

Hinsichtlich der Motivation eines Fahrstreifenwechsels werden zwei Fälle unterschieden:

- Notwendige Fahrstreifenwechsel (z. B. um der Route zu folgen oder bei Fahrstreifenreduktion)
- Freiwillige Fahrstreifenwechsel (zum Erreichen bzw. Einhalten der Wunschgeschwindigkeit, d. h. zum Überholen)

Um die Verhältnisse auf Autobahnen in Deutschland abbilden zu können, ist es notwendig, dass auch das Rechtsfahrgebot in die Modellierung einbezogen wird.

Zur Vorbereitung eines Fahrstreifenwechsels kann auch eine Anpassung der Beschleunigung berücksichtigt werden, etwa um eine Lücke auf dem Zielfahrstreifen zu erreichen [Ehm03]. Auch ist es wichtig, dass im dichten Verkehr notwendige Fahrstreifenwechsel durchgesetzt werden können. Dies geschieht – wie im realen Verkehr auch – durch Akzeptanz kleinerer Lücken sowie kooperatives Verhalten der Fahrzeuge auf dem Zielfahrstreifen.

Nachfolgend sind einige relevante Fahrstreifenwechselmodelle detaillierter beschrieben. Dabei wird insbesondere auch auf die Umsetzung in den Simulationswerkzeugen eingegangen, da dort i. d. R. erhebliche Weiterentwicklungen gerade zur besseren Abbildung taktischer Fahrentscheidungen und kooperativer Verhaltensweisen berücksichtigt wurden.

Modell nach SPARMANN [Spa78]

Das Fahrstreifenwechselmodell nach SPARMANN modelliert freiwillige Fahrstreifenwechsel mit dem Ziel, die Wunschgeschwindigkeit einzuhalten (Überholen) sowie zur Einhaltung des Rechtsfahrgebots. In Abhängigkeit von der Fahrstreifenwechselrichtung und der Konstellation von Fahrzeugen auf dem eigenen und dem Zielfahrstreifen wurden entsprechende Regeln zur Bestimmung des Fahrstreifen-

wechselwunsches bestimmt. Ähnlich wie das Fahrzeugfolgmodell nach WIEDEMANN werden Wahrnehmungsschwellen bzgl. Geschwindigkeitsdifferenzen berücksichtigt.

Das Modell wurde zunächst für zweistreifige Autobahnabschnitte formuliert und validiert. Später wurde die Übertragbarkeit auch auf dreistreifige Querschnitte bestätigt [Har07] [Bus84]. Jedoch sind notwendige Fahrstreifenwechsel durch das ursprüngliche Modell nicht abgebildet. Auch eine Beeinflussung des Beschleunigungsverhaltens sowie eine kooperative Interaktion mit Fahrzeugen auf dem Zielfahrstreifen findet nicht statt.

Das Modell nach SPARMANN wurde u. a. in VISSIM und BABSIM umgesetzt. In VISSIM wurde es erheblich erweitert, um den genannten Einschränkungen zu begegnen. Dieses erweiterte Modell ist unter „Weiterentwickeltes Modell in VISSIM“ beschrieben. In BABSIM wurde es ursprünglich gemeinsam mit dem nachfolgend beschriebenen Modell nach THEIS eingesetzt, das die notwendigen Fahrstreifenwechsel an Knotenpunkten abbildet [Har07]. Inzwischen wurde die Kombination dieser beiden Modelle jedoch durch das unten beschriebene Modell nach HARDING ersetzt. Dabei floss das Modell nach SPARMANN in einer erweiterten Form ein.

Modell nach THEIS [The97]

Das Fahrstreifenwechselmodell nach THEIS bildet im Gegensatz zum Modell nach SPARMANN das Fahrstreifenwechselverhalten an Anschlussstellen auf Autobahnen ab. Hierzu werden folgende Fälle berücksichtigt:

- Notwendige Fahrstreifenwechsel nach rechts zur Vorbereitung des Ausfahrens (Lückensuche in einem definierten Bereich vor der Ausfahrt)
- Notwendiger Fahrstreifenwechsel beim Einfahren (ebenso mit Lückensuche auf dem Hauptfahrstreifen)
- Beeinflussung des Fahrstreifenwechselverhaltens der Durchfahrenden an einer Einfahrt: Vermeiden eines Wechsels auf den Hauptfahrstreifen, ggf. Fahrstreifenwechsel nach links oder Verzögern, um eine Lücke zu öffnen

Das Modell erlaubt, kurzzeitig auch kürzere als die sonst akzeptierten Abstände zu wählen. Nach dem Fahrstreifenwechsel wird die Beschleunigung so

angepasst, dass der ursprüngliche Wunschabstand wiederhergestellt wird.

Das Modell wurde ursprünglich in BABSIM eingesetzt. (gemeinsam mit dem Modell nach SPARMANN für freie Fahrstreifenwechsel abseits von Anschlussstellen). Hierzu wurden Anpassungen vorgenommen, insbesondere um Kooperationsprozesse realistischer abbilden zu können (z. B. Verzicht auf Kooperation in bestimmten Situationen). Inzwischen wurden die bisher eingesetzten Fahrstreifenwechselmodelle in BABSIM durch das unten beschriebene Modell nach HARDING ersetzt.

Modell nach GIPPS [Gip86] (AIMSUN)

Das Fahrstreifenwechselmodell nach GIPPS bildet sowohl notwendige als auch freiwillige Fahrstreifenwechsel ab. Es ist sowohl auf innerstädtischen als auch auf Autobahnverkehr anwendbar. Um vorausschauende Fahrstreifenwechsel im Vorfeld von Knotenpunkten abbilden zu können, wird der Verkehrsraum in drei Zonen eingeteilt:

- Zone 1 (kein Einfluss der Fahrtroute): Es werden nur freiwillige Fahrstreifenwechsel durchgeführt, die der Erreichung bzw. Einhaltung der Wunschgeschwindigkeit dienen. Die Einhaltung des Rechtsfahrgebots wird dabei berücksichtigt.
- Zone 2 (mittlerer Einfluss der Fahrtroute): Fahrstreifenwechselwünsche, die der Einhaltung der Fahrtroute entgegenstehen, werden ignoriert. Wenn möglich, wird bereits auf den zu nutzenden Fahrstreifen gewechselt.
- Zone 3: (hoher Einfluss der Fahrtroute): Die Fahrstreifenwahl wird ausschließlich durch die Fahrtroute bestimmt. Die hohe Dringlichkeit des Fahrstreifenwechsels bedingt ein angepasstes Verhalten gegenüber dem in Zone 2.

Nach Auswahl des Zielfahrstreifens erfolgt zunächst eine Prüfung auf Realisierbarkeit des Fahrstreifenwechsels, indem geprüft wird, ob die vorhandene Lücke auf dem Zielfahrstreifen groß genug ist. Ist dies nicht der Fall, wird stromab- und stromaufwärts nach einer passenden Lücke gesucht, die durch Anpassung der Beschleunigung angesteuert wird. Ist der Fahrstreifenwechsel dringlich (Zone 3), wird lediglich stromaufwärts eine Lücke gesucht und entsprechend verzögert. Nach erneuter Prüfung der Lückengröße wird der Fahrstreifenwechsel schließlich durchgeführt.

Das Fahrstreifenwechselmodell nach GIPPS kommt in AIMSUN zum Einsatz. Dort können streckenbezogen die Entfernungen der Grenzen für Zone1/2 und Zone2/3 vom Verzweigungspunkt festgelegt werden. Auch können Wirkbereiche von Hindernissen (Sichtweite) variiert werden. Weiterhin können der prozentuale Anteil für unvorsichtige Überholmanöver, für die Aggressivität, für Überholen rechts und für das Verweilen auf dem Überholfahrstreifen nach abgeschlossenem Überholvorgang angegeben werden. Damit lassen sich unterschiedliche Verhaltensweisen für Überholmanöver umsetzen.

Das Modell und seine Parameter sind in Steckbriefform im Anhang 1 dargestellt.

Weiterentwickeltes Modell in VISSIM

Das in [PTV11] beschriebene Simulationsmodell in VISSIM ist ein regelbasiertes Modell, das sowohl notwendige als auch freiwillige Fahrstreifenwechsel berücksichtigt. Die Einhaltung des Rechtsfahrgebots kann berücksichtigt werden. In beiden Fällen wird zunächst eine Lücke stromabwärts gesucht. Die Bewertung, ob die Lücke groß genug ist, erfolgt dann für freiwillige und notwendige Fahrstreifenwechsel unterschiedlich. Bei notwendigen Fahrstreifenwechseln lässt sich das Fahrverhalten u. a. auch durch Aggressivitätsparameter beeinflussen. Darüber hinaus lässt sich Intelligentes Einfädeln aktivieren. Dies bewirkt, dass Fahrzeuge frühzeitiger und vorausschauender den für die Fortsetzung ihrer Fahrtroute erforderlichen Fahrstreifen wählen, z. B. indem nicht mehr überholt wird.

Das Fahrstreifenwechselmodell interagiert mit dem Fahrzeugfolgmodell nach WIEDEMANN, indem der dort berechnete Sicherheitsabstand während der Durchführung eines Fahrstreifenwechsels vorübergehend um einen einstellbaren Faktor reduziert wird. Um kooperatives Fahrverhalten beim Fahrstreifenwechsel zu berücksichtigen, können nachfolgende Fahrzeuge auf dem Zielfahrstreifen verzögern (kooperatives Bremsen) oder ihrerseits durch einen Fahrstreifenwechsel eine Lücke schaffen (kooperativer Spurwechsel).

Das Fahrstreifenwechselverhalten lässt sich durch eine Vielzahl an Parametern beeinflussen. Diese sind im Anhang 1 wiedergegeben.

Modell nach HARDING [Har07] (BABSIM)

HARDING entwickelte ein Fahrverhaltensmodell speziell für den Autobahnverkehr, das verschiedene

Fahrabsichten zunächst separat ermittelt und diese dann zu einer Gesamtentscheidung hinsichtlich Längsbeschleunigung und Fahrstreifenwechsel zusammenfasst. Diese Absichten sind:

- Abstand halten: Diese Absicht hat ausschließlich Einfluss auf die Längsbeschleunigung. Das Teilmodell beruht auf dem Modell nach WIEDEMANN mit Erweiterungen, auf die in der Beschreibung dieses Modells in Kapitel 2.2.3.1 eingegangen wird.
- Überholen: Diese Absicht ermittelt, ob ein Fahrstreifenwechsel nach links erwünscht ist. Dieses Teilmodell ist eine Erweiterung des Modells nach SPARMANN (s. o.). Die Erweiterungen umfassen z. B. die Unterdrückung eines Überholwunsches im Vorfeld einer Fahrstreifenreduktion sowie eine Berücksichtigung von Ungeduld, die zu einer Akzeptanz auch kleinerer Zeitlücken führt.
- Rechtsfahrgebot: Diese Absicht ermittelt, ob ein Fahrstreifenwechsel nach rechts zur Einhaltung des Rechtsfahrgebots notwendig ist. Auch dieses Teilmodell greift auf das Modell von SPARMANN zurück und wurde um zusätzliche Einflussfaktoren ergänzt, etwa die Reaktion auf einen Einzug des rechten Fahrstreifens und die höhere Priorisierung des Wechsels nach rechts für Lkw. Daneben ist auch ein Einfluss auf die Beschleunigung gegeben, um eine Vorbeifahrt auf der rechten Seite zu vermeiden, es sei denn, dies ist durch eine Stausituation zulässig (entsprechende Grenzwerte für Geschwindigkeitsniveau und Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen den Fahrstreifen konfigurierbar). Diese Beeinflussung der Beschleunigung basiert auf dem Fahrzeugfolgmodell nach WIEDEMANN, jedoch mit abweichenden Anforderungen an die Abstandswahl, da das als Vorfahrer einbezogene Fahrzeug sich auf einem anderen Fahrstreifen befindet.
- Seitenabstand: Mittels dieser Absicht wird überprüft, ob ein Fahrstreifenwechsel nach rechts oder links möglich ist, d. h. ob eine ausreichend große Lücke vorhanden ist.
- Route folgen: Mit diesem Teilmodell wird ein Fahrstreifenwechselwunsch ausgelöst, wenn dieser zur Einhaltung der Fahrtroute erforderlich ist. Das Modell kommt sowohl vor Verzweigungen als auch bei vorausliegendem Einzug des gerade genutzten Fahrstreifens zur Anwendung. Dabei kann je nach Dringlichkeit eine Unterstüt-

zung durch Fahrzeuge auf dem Zielfahstreifen angefordert werden, die dann von diesen Fahrzeugen im Rahmen des Teilmoduls „Unterstützen“ berücksichtigt werden kann. Außerdem kann in diesem Teilmodul auch eine Verzögerung initiiert werden, um eine Lücke zu erreichen. Hierzu wird ähnlich wie im Modul „Rechtsfahrgebot“ der Abstand an das vorausfahrende Fahrzeug auf dem Zielfahstreifen angepasst.

- **Unterstützen:** Dieses Teilmodell dient der Initiierung kooperativen Längsverhaltens und kooperativer Fahrstreifenwechsel, wenn diese notwendig sind, also aus dem Teilmodul „Route folgen“ heraus angefordert wurden. Hierbei können temporär auch kleinere Folgeabstände akzeptiert werden (vgl. Umsetzung des Fahrzeugfolgmodells nach WIEDEMANN in BABSIM, Kapitel 2.2.3.1).

Somit haben fünf dieser Teilmodelle Einfluss auf die Fahrstreifenwahl und erlauben in diesem Zusammenhang auch, taktische Fahrentscheidungen wie z. B. frühzeitiges Einordnen oder kooperative Fahrstreifenwechsel abzubilden.

Eine wichtige Eigenschaft des Modells nach HARDING ist, dass die einzelnen Teilmodule durch eine Entscheidungsträgheit gekennzeichnet sind. Diese ist für fünf der sechs Teilmodule parametrierbar. Durch die Trägheit soll verhindert werden, dass Fahrentscheidungen zu häufig wechseln können.

Die Implementierung dieses Modells in BABSIM erlaubt die Kalibrierung von 27 Parametern, davon 23 zur Beeinflussung von Fahrstreifenwechseln und unterstützender Einflüsse auf die Längsführung. Das Modell nach HARDING und seine Parameter werden im Anhang 1 wiedergegeben.

Modell nach ERDMANN [Erd14] (SUMO)

Das Fahrstreifenwechselmodell nach ERDMANN wurde in SUMO implementiert und steht seit 2013 zur Verfügung. Es baut auf dem Fahrstreifenwechselmodell nach KRAJZEWICZ [Kra08] auf, das noch diverse Unzulänglichkeiten hinsichtlich der plausiblen und realitätskonformen Abbildung des Verkehrsablaufs an Verflechtungen und Einfahrten auf Autobahnen aufwies [Erd14], [Gei17].

Fahrstreifenwechselentscheidungen werden in folgenden vier Stufen durchgeführt:

- Bestimmung der Wunschfahrstreifen

- Neuberechnung der zuvor im Fahrzeugfolgemodell bestimmten sicheren Geschwindigkeit unter Berücksichtigung von Fahrstreifenwechselwünschen aus dem vorhergehenden Zeitschritt
- Berechnen einer Fahrstreifenwechselentscheidung
- Durchführung des Fahrstreifenwechsels oder Übergabe einer Geschwindigkeitsanforderung an das Fahrzeugfolgmodell (mit Vorausplanung über mehrere Zeitschritte)

Bei notwendigen Fahrstreifenwechseln zum Folgen einer Route oder vor einem Fahrstreifeneinzug wird die Dringlichkeit berechnet, u. a. in Abhängigkeit von der Verkehrssituation und des verbleibenden Wegs bis zum Zwangspunkt. Wird ein dringlicher Fahrstreifenwechsel durch Fahrzeuge auf dem Zielfahstreifen verhindert, kann gemäß des zuvor beschriebenen Ablaufs durch Anpassung der Geschwindigkeit reagiert werden. Auch kooperative Fahrstreifenwechsel werden durch das Modell abgebildet. Das Rechtsfahrgebot und das Verbot rechts zu überholen wird berücksichtigt; dieses Verhalten kann aber deaktiviert werden. Parameter und Eigenschaften des Modells nach ERDMANN sind ebenfalls im Anhang 1 steckbriefartig zusammengefasst.

2.2.3.3 Taktische Fahrentscheidungen

Wie in Kapitel 2.2.1 dargestellt, umfasst die taktische Fahrentscheidungsebene die Wahl einer Wunschgeschwindigkeit sowie die vorausschauende Bestimmung eines Wunschfahrstreifens.

Da die vorausschauende Bestimmung eines Wunschfahrstreifens bereits sehr eng in die Fahrstreifenwechselmodellierung eingeflochten ist und dementsprechend bereits in Kapitel 2.2.3.2 behandelt wurde, wird nachfolgend vor allem auf die Wahl der Wunschgeschwindigkeit sowie weitere Einflüsse im Rahmen der taktischen Längsführung eingegangen. Der taktischen Längsführung kommt eine entscheidende Bedeutung bei der Modellierung der Wirkungen von Streckenbeeinflussungsanlagen zu, da die Beeinflussungsmaßnahmen vor allem auf dieser Ebene und dem dieser Ebene zugeordneten zeitlichen und räumlichen Horizont wirken.

Vielfach wird die Wunschgeschwindigkeit als Eigenschaft eines Fahrzeugs bei dessen Erzeugung vorgegeben. Die Wunschgeschwindigkeit wird dabei

zufällig gemäß einer definierten Verteilungsfunktion gewählt und bleibt über die gesamte Verweilzeit des Fahrzeugs in der Simulation konstant. Parameter dieser Verteilungsfunktion lassen sich z. B. durch lokale Einzelfahrzeugdaten erheben, indem die Geschwindigkeiten sämtlicher frei fahrenden Fahrzeuge ermittelt werden (d. h. Fahrzeuge mit hinreichend großer Zeitlücke zum vorausfahrenden Fahrzeug). Die Wunschgeschwindigkeit greift jedoch nur, solange durch Fahrzeugfolgesituationen bzw. Interaktionen oder durch zulässige Höchstgeschwindigkeiten keine niedrigeren Geschwindigkeiten erforderlich sind.

Gilt auf einem Streckenabschnitt eine zulässige Höchstgeschwindigkeit, kann in einigen Modellen ein Befolungsgrad angegeben werden, mit dem definiert wird, in welchem Maße die abschnittsbezogene Wunschgeschwindigkeit des Fahrzeugs unter oder über der zulässigen Höchstgeschwindigkeit liegt. In AIMSUN lässt sich dies z. B. über einen ebenfalls je Fahrzeug über die gesamte Simulation konstanten Faktor einstellen. Dementsprechend wird eine vergleichsweise hohe absolute Befolgung und niedrigere Streuung für niedrigere Geschwindigkeitsbeschränkungen erreicht, während für höhere Geschwindigkeitsbeschränkungen größere Streuungen der Wunschgeschwindigkeiten auftreten. Dieser Zusammenhang ist in empirisch erhobenen Daten jedoch nicht immer zu erkennen; insbesondere hängt die Befolgung einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit auch von der wahrgenommenen Verkehrs- und Umfeldsituation ab.

Neben der Wunschgeschwindigkeit können z. B. auch Kenngrößen zur Charakterisierung des Aufmerksamkeitsniveaus oder der Aggressivität der taktischen Fahrentscheidungsebene zugeordnet werden, da sie für einen gewissen zeitlichen und räumlichen Bereich gelten sowie durch die vorherrschende Situation (Schaltzustand der SBA, Umfeldsituation) beeinflusst werden. Diese Faktoren wirken sich auf Abstandswahl und Reaktionszeiten auf operationeller Ebene aus. Ebenso könnte die Häufigkeit zufälliger Störeinflüsse (insbesondere Trödeln) bei erhöhter Aufmerksamkeit reduziert werden. Derartige Kenngrößen existieren in den betrachteten Modellen bisher in der hier beschriebenen Form nicht.

Um die Wirkungen einzelner Schaltzustände von Streckenbeeinflussungsanlagen in ihrem Situationskontext differenziert abbilden zu können, müssen die Wunschgeschwindigkeit, die Befolgung der

zulässigen Höchstgeschwindigkeit sowie Parameter, die Aufmerksamkeit und Aggressivität der Fahrer beschreiben, dynamisch während der Laufzeit der Simulation angepasst werden. Dies kann z. B. unter Verwendung entsprechender Schnittstellen der Simulationswerkzeuge erfolgen. Es muss hierbei darauf geachtet werden, dass

- Wunschgeschwindigkeiten, Befolungsgrade und weitere Parameter weiterhin zufällig im Rahmen einer empirisch gestützten Verteilungsfunktion gewählt werden und somit zwischen den Fahrzeugen variieren,
- eine gewisse Konsistenz bzgl. des Fahrstils für ein und dasselbe Fahrzeug durch das Simulationsnetz gewahrt bleibt.

Die dynamische Anpassung des taktischen Fahrverhaltens in der mikroskopischen Verkehrssimulation wird daher ein wichtiger Gegenstand dieses Vorhabens sein.

2.2.3.4 Wirkungen dynamischer Informationen auf den Fahrprozess

Mit dynamischen Informationen sind Vorgaben/Gebote, Empfehlungen, Warnungen oder andere Informationen gemeint, die während des Fahrtverlaufs veränderlich sind. Dies umfasst sowohl die kollektiv wirkenden Anzeigestände einer Streckenbeeinflussungsanlage als auch z. B. Nachrichten, die mittels V2X-Kommunikation an ein individuelles Fahrzeug gelangen.

In einigen Simulationswerkzeugen lassen sich kollektive Maßnahmen des Verkehrsmanagements, z. B. dynamische Geschwindigkeitsbegrenzungen, unmittelbar umsetzen. AIMSUN erlaubt z. B. auch die Spezifikation von Freitext-Anzeigen mit einer zugehörigen Wirkung auf die Verkehrsteilnehmer (z. B. Anpassung der Routenwahl mit einem parametrierbaren Befolungsgrad). Die Umsetzung komplexer Steuerungsprinzipien wie der einer Streckenbeeinflussungsanlage ist jedoch mit diesem Ansatz sehr aufwendig und Wirkungen lassen sich nur eingeschränkt und nicht situations-differenziert abbilden.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Steuerung einer Verkehrsbeeinflussungsanlage und die Wirkungen derselben auf das Fahrverhalten nicht innerhalb der Simulationswerkzeuge abzubilden, sondern diese als externes Modul zu realisieren, die über eine entsprechende Schnittstelle zur Simu-

lationslaufzeit mit dem Simulationswerkzeug interagiert. Über die Schnittstelle lassen sich einerseits Objektzustände aus der Simulation abfragen, etwa von Detektoren, aber auch von Fahrzeugen oder Streckenabschnitten (Kanten). Andererseits lassen sich Fahrzeugverhaltensparameter gezielt und flexibel beeinflussen. Daher wird dieser Ansatz in diesem Vorhaben gewählt.

Die Bewertung der Wirkungen von Streckenbeeinflussungsanlagen mittels mikroskopischer Verkehrsflusssimulation wurde bislang nur selten durchgeführt (z. B. [Wie16]). Einer der Gründe ist darin zu sehen, dass die empirisch beobachtbaren Reaktionen von Verkehrsteilnehmern auf Schaltzustände je nach wahrgenommener Umgebungssituation, Fahrerkollektiv und Verkehrskontext sehr heterogen sind und die valide Abbildung dieser Reaktionen eine große Herausforderung darstellt. Wesentlich häufiger wurde die Wirkung bestimmter Fahrerinformationen aus V2X-Nachrichten untersucht (z. B. [Dow16], [Schi14], [Mon13], [Kra12], [Schü10]). Im Rahmen von Forschungsprojekten und Feldtests, z. B. simTD, konnten in Fahrsimulatorstudien und mittels Versuchsfahrten im Realverkehr Fahrerreaktionen auf eine bestimmte Information erfasst und in der Simulation berücksichtigt werden. Eine vergleichbare Erhebung der Wirkungen einzelner SBA-Zustände, die sich für die Modellierung der Wirkungen einer SBA nutzen lassen, ist bisher nicht durchgeführt worden. Sie wird demnach einen Schwerpunkt dieses Vorhabens bilden.

2.2.4 Kalibrierung und Validierung

Um die Gültigkeit und Anwendbarkeit von Simulationsergebnissen gewährleisten zu können, ist eine Kalibrierung und Validierung der Simulationswerkzeuge und somit der darin implementierten Verhaltensmodelle unerlässlich.

Der Begriff Kalibrierung umfasst dabei die Einstellung sämtlicher Parameter des Simulationsmodells. Mit der Validierung wird der Nachweis erbracht, dass mit dem Simulationsmodell zuvor empirisch erfasste Zusammenhänge innerhalb definierter Toleranzen reproduziert werden kann [FGSV06].

Die Kalibrierung kann grundsätzlich auf folgende Weise erfolgen:

- Verwendung direkt messbarer Größen
- Schätzung durch Experten

- Iterative Anpassung und Optimierung so, dass empirisch erfasste Zusammenhänge bestmöglich wiedergegeben werden

Bei der letztgenannten Vorgehensweise muss nach [FGSV06] bei der Validierung mindestens ein Datensatz verwendet werden, der nicht schon für die Kalibrierung verwendet wurde. Auch eine Kombination dieser Herangehensweise ist sinnvoll. Um bei einer Optimierung die Anzahl der betrachteten Parameter gering zu halten, kommt eine Sensitivitätsanalyse in Betracht, mit der untersucht wird, welche Parameter tatsächlich einen empfindlichen Einfluss auf den Simulationsablauf aufweisen und dementsprechend in die Kalibrierung einbezogen werden sollten. In diesem Zusammenhang ist auch eine Untersuchung denkbar, ob Korrelationen oder Abhängigkeiten zwischen zwei Parametern hinsichtlich ihrer Wirkung in der Simulation bestehen, so dass es ausreicht, nur einen von beiden in die Optimierung im Rahmen der Kalibrierung einzubeziehen. Bislang sind jedoch nur wenige Simulationsuntersuchungen bekannt, in denen eine derartige Vorab-Bewertung der Parameter vor der Kalibrierung durchgeführt wurde (z. B. [Hei13]).

Die Zielfunktion, die einer Optimierung im Rahmen der Kalibrierung zugrunde gelegt wird, muss sich am Untersuchungsgegenstand und insbesondere an den in der Untersuchung verwendeten Bewertungsgrößen orientieren.

[Det11] unterscheidet hinsichtlich der Datengrundlage für die Kalibrierung und Validierung mikroskopischer Simulationsmodelle drei grundsätzliche Herangehensweisen:

- mit empirischen mikroskopischen Daten (aus Versuchsfahrten, z. B. [Ehm03], [Bro04], [Har07], [Wag16])
- mit empirischen makroskopischen Daten (aus lokaler Verkehrsdatenerfassung, z. B. [Ros03], [Rak10], [Gei15], [Gei17])
- mit mikroskopischen und makroskopischen Daten (z. B. [Det11])

[Det11] argumentiert dabei (gestützt auf weitere Quellen), dass durch die Validierung einzelner Module allein auf mikroskopischer Ebene nicht automatisch auf ein valides Gesamtmodell geschlossen werden kann (Toleranzen für Abweichungen könnten sich verstärken). Umgekehrt können nach Kalibrierung und Validierung auch nur makroskopische Zusammenhänge bewertet werden, da auf mikros-

kopischer Ebene weiterhin Fehler möglich sind (z. B. teils unrealistisches Beschleunigungsverhalten). [Wag16] argumentiert im Kontext einer Kalibrierung mit mikroskopischen (fahrzeugbezogenen) Daten, dass die Optimierung nicht allein auf einzelne Kenngrößen (Abstand, Geschwindigkeit) bezogen werden sollte, sondern dass die Existenz einer Pareto-Front berücksichtigt werden sollte (hier: Parameterkombination, in der die Verbesserung hinsichtlich einer Zielgröße stets Verschlechterungen hinsichtlich anderer Zielgrößen zur Folge hat).

Für die Bestimmung der Wirkung einer SBA hinsichtlich Verkehrssicherheit und Harmonisierung sollten das Zeitlücken- und Geschwindigkeitsverhalten (inkl. dessen Streuung über das Kollektiv) valide abgebildet werden, da diese zur Bewertung von Einflüssen der SBA hinsichtlich Harmonisierung und Sicherheit verwendet werden. Darüber hinaus müssen auch makroskopische Charakteristika der betrachteten Streckenabschnitte, z. B. die Kapazität (hier definiert als max. empirische Verkehrsstärke), die Häufigkeit von Verkehrszusammenbrüchen in Abhängigkeit von der Verkehrsbelastung o. ä. valide abgebildet werden. Des Weiteren sind auch Verflechtungsvorgänge an den Anschlussstellen innerhalb des Untersuchungsgebiets so abzubilden, dass sie plausibel sind, dass die durch Fahrstreifenwechsel und Verflechtung induzierten Einflüsse auf den Verkehrsablauf reproduziert werden und dass die Fahrstreifenauslastung mit der Realität übereinstimmt. Die Einflüsse automatisierter Fahrzeuge und ihre Interaktion mit konventionellen Fahrzeugen im Mischverkehr sollen ebenfalls hinsichtlich des Zeitlücken-, Geschwindigkeits- und Fahrstreifenwahlverhaltens bewertet werden.

Für dieses Vorhaben stehen lokale Verkehrsdaten zur Verfügung, teilweise auch in mikroskopischer Form. Fahrzeuggenerierte mikroskopische Daten sind für dieses Vorhaben nicht verfügbar, sind aber für die zuvor beschriebenen Anforderungen an die Kalibrierung und Validierung auch nicht erforderlich. Hierbei ist anzumerken, dass z. B. die Häufigkeit von Fahrstreifenwechseln nur eingeschränkt in die Bewertung und Analyse der Simulationsergebnisse eingehen kann, da diesbezüglich keine Daten für die Kalibrierung zur Verfügung stehen.

Die wichtigsten Parameter der Fahrzeugfolge- und Fahrstreifenwechselmodelle, die für die Kalibrierung und Validierung genutzt werden können, sind in den steckbriefartigen Zusammenfassungen der Modelle im Anhang 1 dargestellt. Es ist zu beach-

ten, dass darüber hinaus noch weitere Parameter existieren, etwa Eigenschaften von Streckenabschnitten oder Knotenpunkten, mit denen lokale Besonderheiten berücksichtigt werden können. Im Allgemeinen werden jedoch nur ausgewählte Modellparameter in den Kalibrierungsprozess einbezogen, für die ein maßgeblicher Einfluss auf die Bewertungsgrößen anzunehmen ist.

2.2.5 Zusammenfassung und Anforderungen

Nachfolgend sind die wesentlichen Anforderungen aus der Zielsetzung dieses Vorhabens an das zu verwendende Simulationsmodell, die Simulationssoftware sowie den Prozess der Kalibrierung und Validierung zusammengefasst:

- Das Simulationsmodell muss geeignet sein und entsprechend kalibriert werden, Verkehrszusammenbrüche durch Überlastung (Stau aus dem Nichts), inkl. Störungen durch hoch belastete Einfahrten und Verflechtungsvorgänge, in Häufigkeit und Intensität entsprechend der empirischen Daten zu reproduzieren. Auch die Kapazität (maximale empirische Verkehrsstärke) muss sich reproduzieren lassen.
- Das Simulationsmodell muss geeignet sein und entsprechend kalibriert werden, dass das lokal erfasste Zeitlücken- und Geschwindigkeitsverhalten sowie die Fahrstreifenauslastung in einem gegebenen Situationskontext realitätsgetreu abgebildet werden. Insbesondere muss auch die Streuung dieser Größen realistisch sein.
- Das Simulationsmodell und seine Umsetzung als Simulationswerkzeug müssen geeignet sein, Parameter des Fahrverhaltens dynamisch (räumlich und situationsbezogen) anzupassen.
- Das Simulationsmodell muss es erlauben, Unterschiede zwischen menschlichem und automatisiertem Fahren insbesondere hinsichtlich Zeitlückenverhaltens, Reaktionszeiten und Geschwindigkeitswahl abzubilden.
- Das Simulationswerkzeug muss über eine Schnittstelle verfügen, mit der externe Funktionsmodule angebunden werden können (Steuerungsverfahren der Streckenbeeinflussungsanlage und Modellierung ihrer Wirkungen).

Auf Grundlage des zuvor beschriebenen Wissensstands und bisheriger Erfahrungen des Konsorti-

ums sind mehrere der genannten Simulationswerkzeuge für die gegebene Aufgabenstellung geeignet. Dies trifft auch auf das ausgewählte Simulationswerkzeug AIMSUN zu. AIMSUN bietet umfassende Möglichkeiten zur Modellierung von Verkehrsbeeinflussungssystemen und verfügt über die notwendige Schnittstelle, um während der Simulation auf Fahrzeuge und andere Objekte zugreifen zu können. Die in AIMSUN genutzten Fahrverhaltensmodelle erlauben es bei geeigneter Kalibrierung, das Fahrverhalten auf Autobahnen realistisch abzubilden (siehe u. a. [Gei17]), wobei auch taktische Fahrerentscheidungen berücksichtigt sind. Weiterhin ist AIMSUN geeignet, um Einflüsse von Fahrerassistenz und Fahrzeugautomatisierung zu untersuchen und wurde hierfür bereits eingesetzt (z. B. in den Projekten FLOURISH und HumanDrive sowie in [Det11] oder [Nto15]).

2.3 Fahrzeugautomatisierung

Nach [Win09] ist menschliches Fehlverhalten die Hauptursache für Unfälle, insbesondere wenn die Verkehrssituation die Leistungsfähigkeit des Fahrers übersteigt. Eine von der BAST beauftragte Untersuchung prognostiziert, dass Fahrerassistenzsysteme (FAS) das Unfallrisiko um etwa 70 % reduzieren können [Vol06]. Des Weiteren wird ein Einfluss automatisierten Fahrens auf Verkehrsablauf und die Leistungsfähigkeit der Verkehrsinfrastruktur vermutet; entsprechende Untersuchungen zeigen hier jedoch keine einheitliche Perspektive auf.

Durch

- die stufenweise Weiterentwicklung von Assistenzfunktionen hin zum automatisierten Fahren sowie

- die absehbar nur allmähliche Durchdringung des Marktes mit automatisierten Fahrzeugen

wird auch dem Mischverkehr zwischen konventionellen Fahrzeugen und automatisierten Fahrzeugen unterschiedlicher Ausprägung langfristig eine große Bedeutung zukommen, wenn die Wirkungen von Fahrzeugautomatisierung auf den Verkehr zu untersuchen sind.

Nachfolgend werden zunächst Stufen automatisierten Fahrens definiert. Anschließend wird der gegenwärtige Entwicklungsstand hinsichtlich der Fahrzeugautomatisierung beschrieben sowie absehbare Entwicklungstrends kurz skizziert. Darauf aufbauend werden Annahmen zu Wirkungen von Fahrzeugautomatisierung auf das Fahrverhalten aus bisherigen Untersuchungen dargestellt sowie rechtliche und andere Anforderungen und Randbedingungen betrachtet. Schließlich werden Annahmen und Schlussfolgerungen zu Verhaltensweisen automatisierter Fahrzeuge zusammengefasst.

2.3.1 Stufen automatisierten Fahrens

Tabelle 2-1 stellt die Stufen des automatisierten Fahrens gemäß [SAE18] sowie die zugehörigen Fahr- und Parkfunktionen nach [VDA18] dar. In diesem Vorhaben wird der Fokus auf das hochautomatisierte Fahren auf der Autobahn (Stufe 3) gelegt, mit dessen Verbreitung auf dem Markt nach dem Verband der Automobilindustrie ab 2020 zu rechnen ist.

2.3.2 Stand der Technik und Anwendungen

Bereits seit vielen Jahren sind Assistenzsysteme wie Adaptive Cruise Control (ACC) oder Spurhalte-

Stufe	Merkmale	Funktionen
0 – driver only	Längs- (LF) & Querführung (QF) dauerhaft durch Fahrer	ABS, ESP, Kollisionswarnung, passiver Spurhalteassistent
1 – assistiert	LF oder QF dauerhaft durch Fahrer; Unterstützung durch Assistenzsysteme	ACC, FSRA, aktiver Spurhalte-, Einpark- und Notbremsassistent
2 – teilautomatisiert	Fahrer überwacht LF, QF und Verkehr dauerhaft; sofortige Übernahme muss möglich sein	ACC/FSRA in Kombination mit aktivem Spurhalteassistent, Stau- und Parkmanöverassistent
3 – bedingt automatisiert	Fahrer muss nicht überwachen, aber nach Zeitreserve übernehmen	Fahren im Stau bzw. bis 60 km/h auf der Autobahn
4 – hochautom.	Fahrer muss weder überwachen noch übernehmen	Valet Parking, Autonome Shuttles
5 – vollautomatisiert	Kein Fahrer mehr nötig, d. h. System ist nicht auf spez. Situationen beschränkt	

Tabelle 2-1: Übersicht der Stufen des automatisierten Fahrens und deren Funktionen [VDA18]

assistenten verfügbar. Im Sinne einer progressiven Entwicklung hin zum automatisierten Fahren werden derartige Funktionen verknüpft und weiterentwickelt. Aufgrund der einheitlichen baulichen und verkehrlichen Rahmenbedingungen, der guten Erkennbarkeit der Fahrbahnbegrenzung und dem Fehlen von Störeinflüssen wie nichtmotorisierte Verkehrsteilnehmer und Querverkehr steht hierbei derzeit der Autobahnbereich im Vordergrund, wenngleich in zahlreichen Projekten und Initiativen auch das automatisierte Fahren in Städten und suburbanen Räumen untersucht wird bzw. werden soll. Zur Erprobung automatisierten und vernetzten Fahrens wurde das Digitale Testfeld Autobahn auf der BAB A9 eingerichtet; zusätzlich existieren städtische bzw. regionale Testfelder (u. a. Braunschweig, Dresden und Düsseldorf), von denen einige auch Streckenabschnitte auf Autobahnen einbeziehen.

Als Serienausstattung sind bisher Systeme bis zur zweiten Stufe etabliert [Lem16]. Aktuell gelangen erste Funktionen für automatisiertes Fahren in bestimmten Verkehrssituationen (bis Stufe 3) auf den Markt, z. B. der Stop&Go-Assistent von BMW. Mit dem Stau-Piloten hat Mercedes in der S-Klasse die erste Level-3 Funktion angekündigt, die erstmals das Fahren auf der Autobahn bis 60 km/h automatisiert. Weitere Funktionen, die ein durchgehendes automatisiertes Fahren unabhängig von der Verkehrssituation ermöglichen, sind derzeit noch Gegenstand der Forschung und Entwicklung, die sowohl auf Seiten der Wissenschaft als auch der Automobilindustrie intensiv vorangetrieben wird. Für das automatisierte Fahren auf Autobahnen betrifft dies insbesondere auch die kooperative Interaktion in Verflechtungssituationen und die Realisierung vorausschauender Fahrstrategien [emBW15]. Weiterhin besteht Forschungsbedarf hinsichtlich der Eigenlokalisierung sowie der Umfeld- und Situationserkennung im Fahrzeug [FhG15] [emBW15]. In einigen Fällen wird dabei auch die Nutzung von Fahrzeugvernetzung zur verbesserten Umfeldwahrnehmung und zur Unterstützung vorausschauenden Fahrens untersucht (z. B. Ko-HAF, AutoNet2030, HarmonizeDD, Teilprojekt Ko-PER innerhalb von Ko-FAS). Auch im Bereich der Mensch-Maschine-Interaktion wird ein wichtiger Forschungsschwerpunkt gesehen, insbesondere hinsichtlich der Übernahme der Fahraufgabe durch den Menschen [FhG15] [emBW15].

Neben der bisher geschilderten Weiterentwicklung von automatisierten Fahrfunktionen für Serienfahrzeuge existieren auch erste Konzepte und Ver-

suchsträger für autonome Fahrzeuge (Stufe 4), z. B. diverse People Mover. Diese Fahrzeuge fahren derzeit i. d. R. mit relativ niedrigen Geschwindigkeiten und können teilweise nur auf vordefinierten Fahrtrassen (Trajektorien) fahren. Ein weiteres Beispiel ist die Flotte der Google Self-driving Cars, die bis Mitte 2015 ca. 2,5 Mio. km im öffentlichen Straßenraum zurückgelegt hat, jedoch zunächst nur unter günstigen Wetterbedingungen und auf zuvor genau kartierten Streckenabschnitten. Um autonomes Fahren, d. h. Fahren auch ohne Verfügbarkeit oder Eingriffsmöglichkeit durch einen Insassen, zur Einsatzreife zu bringen, besteht neben dem bereits erwähnten Forschungsbedarf insbesondere auch die Notwendigkeit, die Überwachung sämtlicher Fahrzeugsysteme und -funktionen automatisiert durchzuführen und im Bedarfsfall Minimal-Risk Manöver (Überführung in den sicheren Zustand) einzuleiten.

Ebenfalls Gegenstand der Forschung ist das hochautomatisierte Platooning, bei dem nur das Führungsfahrzeug einen Fahrer hat [Lem16]. Dieses wurde im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte (z. B. KONVOI, SATRE) teilweise bereits im realen Straßenverkehr getestet. In ähnlicher Weise wurde im Vorhaben aFAS ein Warnleitfahrzeug so ausgestattet, dass es fahrerlos einem vorausfahrenden Arbeitsfahrzeug auf dem Seitenstreifen folgen kann.

2.3.3 Wirkungen automatisierten Fahrens

Im Hinblick auf dieses Vorhaben steht die Frage im Vordergrund, wie sich zukünftige hochautomatisierte Fahrzeuge (HAF) auf Autobahnen verhalten werden und wie dieses Verhalten im Rahmen einer Verkehrsflusssimulation abgebildet werden kann. Hierzu müssen plausible Annahmen getroffen werden, wie sowohl die grundlegenden Funktionen der Längs- und Querverführung als auch spezielle Manöver wie das Überholen sowie das Auf- und Abfahren (jeweils inkl. der Fahrstreifenwechsel) umzusetzen sind. Dabei müssen, neben gesetzlichen bzw. normativen Vorgaben und physikalischen Grenzen, insbesondere die Nutzerakzeptanz und der Fahrkomfort berücksichtigt werden [Arn11].

In mehreren Untersuchungen wurden bereits die Auswirkungen automatisierten Fahrens auf den Verkehrsablauf mittels Verkehrsflusssimulation abgeschätzt, wobei jeweils pauschale, teils unterschiedliche Annahmen bzw. Ausprägungen auto-

matisierter Fahrzeuge zugrunde gelegt wurden (z. B. [VDA17]). Eine zentrale Herausforderung in diesem Vorhaben besteht darin, die Auswirkungen nicht nur allgemein, sondern bezogen auf einen aktuell vorherrschenden Situationskontext zu betrachten, der vor allem den Anzeigezustand der SBA und den verkehrlichen Kontext umfasst. Außerdem müssen die Wirkungen der Fahrzeugautomatisierung ähnlich differenziert abgebildet werden wie die Wirkungen von SBA. In den folgenden Kapiteln werden daher wesentliche Anhaltspunkte für Annahmen zum Verhalten automatisierter Fahrzeuge zusammengefasst.

2.3.3.1 Nutzerakzeptanz und Fahrkomfort

In [Arn11] wurde ein Akzeptanzmodell entwickelt, um das Endkundenverhalten beim Kauf von FAS vorherzusagen. Dabei identifizierte die Autorin unter anderem das Wohlbefinden als relevanten Beitrag des FAS zur Vorhersage des Kaufverhaltens. Außerdem stellte sie fest, dass sich Sicherheits- und Komfortgewinn durch ein FAS akzeptanzfördernd auswirken. Diese Erkenntnisse werden von [Mül17] bestätigt, wonach 95 % und 67 % der Befragten die Sicherheit bzw. den Komfort als wichtige Aspekte beim automatisierten Fahren einstufen. Darüber hinaus werden Nebentätigkeiten von fast der Hälfte als Mehrwert eingestuft. Allerdings kann es hierbei zur Motion Sickness (engl. für Reisekrankheit) kommen. Dabei treten Symptome wie Schwindel, Übelkeit, Blässe, Kopfschmerz und Erbrechen auf, die meist durch einen Widerspruch zwischen den Seheindrücken und dem Lagesinn des Innenohrs (visuell-vestibulärer Konflikt), zum Beispiel bei fahrfremden Tätigkeiten wie Lesen, verursacht werden [Mau15], [Siv15].

Demnach wird die Fahrweise zukünftiger HAF voraussichtlich so ausgelegt sein, dass die zuvor beschriebenen Symptome vermieden werden und ein hoher Fahrkomfort erzielt wird. Da bislang praktische Erfahrungen hinsichtlich Akzeptanz und Fahrkomfort von HAF fehlen, können die möglichen relevanten Kriterien nur aus Studien abgeleitet werden. In einer Befragung von 40 Teilnehmern wurden die Zeittücke, die Wunschgeschwindigkeit und die Längs- sowie Querschleunigung als wichtigste Komfortkriterien eingestuft [Sche15].

In diesem Zusammenhang zitieren die Autoren eine Untersuchung, worin Messdaten von konventionellen Fahrzeugen untersucht wurden: Die positive

und negative Längsbeschleunigung lag nur in 0,5 % aller Messwerte über $1,7 \text{ m/s}^2$ bzw. $2,5 \text{ m/s}^2$ [Amm13]. Allerdings wird die Frage aufgeworfen, ob die Fahrweise auch vom passiven Fahrer als komfortabel wahrgenommen würde. Im Projekt „DriveMe“ wurde unter anderem das Komfortempfinden verschiedener Fahrergruppen bei Beschleunigungsmanövern eines HAF untersucht [Sche16]. Zunächst wurde basierend auf einer Fahrsimulatorstudie ein langsamer und ein schneller Fahrstil für HAF generiert. Anschließend wurden beide Fahrstile im Rahmen einer Realfahrzeugstudie untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass eine Längsbeschleunigung von rund $1,7 \text{ m/s}^2$ beim schnellen und $1,4 \text{ m/s}^2$ beim langsamen Stil als zu stark eingeschätzt werden. Folglich vermuten die Autoren, dass longitudinale Beschleunigungen bis $1,5 \text{ m/s}^2$ und Verzögerungen bis $1,0 \text{ m/s}^2$ als komfortabel gelten können. Dieser Beschleunigung wurde auch im Forschungsvorhaben [RSZ17] verwendet, bei dem u. a. die Potenziale hochautomatisierten Fahrens im Hinblick auf die Verkehrseffizienz simulativ untersucht wurden. Dabei wurde auch der automatisierte Fahrstreifenwechsel betrachtet; für das Ego- und Folgefahrzeug wurden akzeptable Verzögerungen von -1 m/s^2 bzw. $0,75 \text{ m/s}^2$ und maximale Verzögerungen von 4 m/s^2 bzw. 3 m/s^2 definiert.

Die Querschleunigung spielt im Hinblick auf Komfortempfinden von Fahrstreifenwechsel eine wichtige Rolle (vgl. [Gri15], [Bel16], [Fes17]). In diesem Zusammenhang sei auch die sogenannte Quickness erwähnt. Dieses aus der Luftfahrt stammende Maß beschreibt die Schnelligkeit eines Manövers; beispielsweise besitzt ein schnell ausgeführter Fahrstreifenwechsel eine hohe laterale Quickness [Bel16]. Beide Größen beeinflussen die erforderliche Zeitdauer für einen Fahrstreifenwechsel und sind daher auch für die Verkehrsflusssimulation von Bedeutung. In [Fes17] wurde die Komfort- und Sicherheitswahrnehmung von Überholvorgängen bei 100 km/h und fahrfremden Tätigkeiten untersucht. Dabei wurden drei Fahrstile mit durchschnittlichen Querschleunigungen von $0,8 \text{ m/s}^2$, $1,1 \text{ m/s}^2$ und $1,5 \text{ m/s}^2$ untersucht. Es stellte sich heraus, dass das Komfortempfinden zwar grundsätzlich subjektiv ist, aber generell mit zunehmender Querschleunigung sinkt. Diese Beobachtungen, insbesondere hinsichtlich der Subjektivität, werden von [Gri15] bestätigt; zudem werden noch geringere Querschleunigungen im Bereich von $0,3 \text{ m/s}^2$ bis $0,7 \text{ m/s}^2$ nahegelegt. Außerdem fanden die Autoren heraus, dass Fahrstile mit geringer Zeittücke und

hoher Dynamik bei den 41 Teilnehmern generell als unkomfortabel angesehen wurden. Schließlich ist die tolerierte Querschleunigung auch im Hinblick auf die Kurvengeschwindigkeit relevant. In [Rey16] wurde im Rahmen von Testfahrten ein funktionaler Zusammenhang zwischen Fahrzeuggeschwindigkeit und tolerierter Kurvenfahrt nachgewiesen, der bei der späteren Verkehrsflusssimulation als Grenzwert dienen könnte.

In [VDA17] wurde simulativ untersucht, wie sich hochautomatisiertes Fahren auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur auswirkt. Dabei wurden verschiedene Annahmen für die Zeitlücke getroffen. Ein Wert von 1,8 s wird festgelegt, wenn das HAF einem menschlich geführten Fahrzeug folgt. Fährt ein anderes vernetztes HAF voraus, wird die Zeitlücke auf 1 s herabgesetzt, bei einer Nutzfahrzeugkolonne wird sogar auf 0,5 s halbiert. Bei einem anderen Forschungsvorhaben wurde eine konstante Zeitlücke von 1,4 s definiert [RSZ17]. Im Kontext von Überholvorgängen haben die Autoren von [Gri15] herausgefunden, dass ein Unterschreiten von 1,2 s als unkomfortabel wahrgenommen wird.

2.3.3.2 Normative Vorgaben

Weitere Anhaltspunkte liefert die ISO 22179 für Abstandsregeltempomaten, die über den gesamten Geschwindigkeitsbereich bis hin zum Stillstand arbeiten. Darin sind unter anderem Grenzwerte für die longitudinale Verzögerung und Beschleunigung angegeben. Demnach darf die Längsbeschleunigung je nach Geschwindigkeit 2 m/s^2 bzw. 4 m/s^2 (gemittelt über 2 s) nicht überschreiten. Außerdem wird die Zeitlücke eingeschränkt. So wird zum einen der Mindestwert von 1 s vorgegeben, was bei einer Geschwindigkeit von 130 km/h einem Abstand von 36 m zum vorausfahrenden Fahrzeug entspricht. Zum anderen muss mindestens ein weiterer Wert zwischen 1,5 s und 2,2 s einstellbar sein, was 54 m bzw. 80 m bei 130 km/h entspricht. Im Hinblick auf den Überholvorgang kann man sich am Urteil des Oberlandesgerichts Hamm (Aktenzeichen 4 Ss OWi 629/08) orientieren, nach dem ein Überholvorgang mit einer Differenzgeschwindigkeit von mehr als 10 km/h durchgeführt werden und innerhalb von 45 s abgeschlossen sein sollte. Allerdings darf der Überholvorgang länger dauern, wenn dadurch der Verkehrsfluss nicht unangemessen behindert wird.

2.3.4 Annahmen aus bisherigen Studien zu Auswirkungen automatisierten Fahrens

In bisher durchgeführten Studien zu den Auswirkungen automatisierten Fahrens auf den Verkehrsablauf werden unterschiedliche, teils konträre Annahmen hinsichtlich der zukünftig für automatisierte Fahrzeuge geltenden Vorgaben, Randbedingungen und Verhaltensweisen getroffen:

In [VDA17] wurden mehrere Varianten der Automatisierung und Konnektivität der Fahrzeuge definiert, für die jeweils Annahmen bezüglich des Fahrzeugfolgeverhaltens und der Abstandswahl getroffen wurden (unter der Annahme einer Sonderregelung des Mindestabstands für automatisierte Fahrzeuge). Über alle Varianten wurde u. a. unterstellt, dass automatisierte Fahrzeuge Geschwindigkeitsbeschränkungen strikt einhalten und die Fahrgeschwindigkeiten keinen Streuungen unterliegen. Während die verminderte Streuung der Fahrgeschwindigkeiten in einem rein automatisierten Verkehrsstrom zu einem stabilen Verkehrsfluss auch nahe der Kapazitätsgrenze führen kann, ist zu erwarten, dass sich insbesondere im Mischverkehr mit konventionellen Verkehrsteilnehmern noch größere Unterschiede hinsichtlich der Geschwindigkeitwahl ausbilden. Dies ist auf die Annahme zurückzuführen, dass automatisierte Fahrzeuge Geschwindigkeitsbeschränkungen strikt einhalten, während menschliche Verkehrsteilnehmer i. d. R. erst räumlich verzögert ihre Geschwindigkeit reduzieren und oftmals die Begrenzung nicht genau einhalten. Auch ist unter der Annahme, dass automatisierte Fahrzeuge den gesetzlich vorgeschriebenen Mindestabstand einhalten, eine erhebliche Verringerung der Streckenkapazität zu erwarten [VDA17].

[Wie16] untersucht u. a. die Wirkungen von Streckenbeeinflussungsanlagen einerseits für konventionelle Fahrzeuge und andererseits unter der Annahme, dass das Fahrzeugkollektiv ausschließlich aus automatisierten Fahrzeugen besteht. Die Untersuchung wurde mit dem Simulationswerkzeug BABSIM durchgeführt. Gestützt auf eine vorhergehende Untersuchung von [Fri15] wird angenommen, dass sich die Kapazität durch Verringerung der Zeitlücken erheblich erhöhen lässt. Als Zeitlücke für automatisierte Fahrzeuge wird hier 0,5 s, für menschliche Fahrer 1,1 s angegeben. Unter der Annahme, dass ein Fahrer weiterhin im Bedarfsfall ins Fahrgeschehen eingreifen muss, werden in dieser Untersuchung jedoch etwas größere Zeitlücken angenommen, die dennoch deutlich unter denen

menschlicher Fahrer liegen. Auch bei Verflechtungsvorgängen wird von einer positiven Wirkung automatisierten Fahrens auf die Kapazität ausgegangen. In dieser Untersuchung wurden jedoch Mischverkehrsszenarien nicht untersucht. Die Parametrierung des Fahrzeugfolgmodells [Wie74] für automatisierte Fahrzeuge wurden gegenüber konventionellen Fahrzeugen wie folgt angepasst:

- etwas geringeres Sicherheitsbedürfnis (Einflussfaktor auf Abstandswahl)
- nahezu perfekte Beherrschung des Gaspedals und nahezu perfekte Schätzung von Geschwindigkeit und Abstand zum Vorausfahrenden
- weniger Streuung der Wunschgeschwindigkeiten; nur geringe Überschreitung von Geschwindigkeitsbeschränkungen

Auch in [Ari16] wurden Auswirkungen der unterschiedlichen Verhaltensweisen menschlicher und automatisierter Fahrzeuge mittels mikroskopischer Verkehrsflusssimulation (hier: VISSIM mit WIEDEMANN 99) bewertet. Auch in diesem Falle wurden nur Szenarien mit jeweils ausschließlich konventionellen und ausschließlich automatisierten Fahrzeugen betrachtet. Wirkungen von Verkehrsbeeinflussungsanlagen wurden im Gegensatz zu [Wie16] nicht betrachtet. Hierbei wurde festgestellt, dass durch automatisierte Fahrzeuge höhere Verkehrsdichten (+ ca. 8 %) und gleichzeitig höhere Fahrgeschwindigkeiten (+ ca. 8,5 %) erreicht werden. Die Anpassungen automatisierten Fahrverhaltens gegenüber dem menschlichen Verhalten bestand in

- einem Verzicht auf die vorübergehende Unaufmerksamkeit
- einer Anpassung der Vorausschauweite und Zurückschauweite
- einer deutlich verringerten Zeitlücke
- einer deutlich strikteren Einhaltung der Geschwindigkeitsbeschränkungen
- früher notwendigen Fahrstreifenwechseln

Es ist anzumerken, dass in dieser Studie unterstellt wurde, dass automatisierte Fahrzeuge auch untereinander vernetzt sind und sich dadurch kooperativer verhalten können.

2.3.4.1 Schlussfolgerungen

Ziel dieses Kapitels ist es, relevante Parameter der Längs- und Querführung von HAF zu identifizieren und sinnvolle Wertebereiche zu ermitteln, sodass in AP 4 ein Fahrzeugfolgmodell in den Ausprägungen progressiv, defensiv und aus Betreibersicht wünschenswert erstellt und parametrierbar werden kann. Anhand einer Literaturrecherche wurden die Längs- sowie Querbefleunigung, die Zeitlücke und die Wunschgeschwindigkeit als relevant identifiziert.

Für die Längsbefleunigung wurden drei verschiedene Wertebereiche gefunden: $[-1 \text{ bis } 1,5] \text{ m/s}^2$ kann komfortabel für HAF angesehen werden, $[-2,5 \text{ bis } 1,7] \text{ m/s}^2$ repräsentiert menschliches Verhalten und $[-3,5 \text{ bis } 2] \text{ m/s}^2$ könnte als normative Obergrenze betrachtet werden. Kann im später verwendeten Fahrzeugfolgmodell eine gewünschte und eine maximale Verzögerung parametrierbar werden, können Gefahrenbremsungen wie beim Annähern an einen Stau ebenfalls berücksichtigt werden. Im Zusammenhang mit Fahrstreifenwechseln und Überholvorgängen bewegt sich die maximale Querbefleunigung zwischen $0,3 \text{ m/s}^2$ und $0,7 \text{ m/s}^2$ bis hin zu $1,1 \text{ m/s}^2$. Bezüglich der maximalen Kurvengeschwindigkeit kann eine mögliche Obergrenze der Querbefleunigung als Funktion der Fahrzeuggeschwindigkeit aus [Rey16] entnommen werden.

Auch für die Zeitlücke wurden verschiedene Grenzwerte gefunden: Im Hinblick auf Komfort scheinen 1,8 s ein guter Anhaltspunkt für den Mischverkehr zu sein. Kleinere Zeitlücken im Bereich von 1,2 s bis 1 s könnten in Szenarien mit größerer Durchdringung von HAF gewählt werden, etwa falls ein vernetztes HAF vorausfährt oder ein großes Vertrauen auf das HAF angenommen wird. In einzelnen Studien wurden auch deutlich geringere Zeitlücken angenommen, jedoch ausschließlich für das Folgeverhalten zwischen zwei automatisierten Fahrzeugen, bei denen eine Einwirkung der Fahrzeuginsassen nicht mehr vorgesehen ist. Auch wird in mehreren Studien angenommen, dass das Abstandsverhalten geringeren Schwankungen unterliegt als bei menschlichen Fahrern. Das bedeutet z. B., dass die in einigen Fahrzeugfolgmodellen berücksichtigte Unvollkommenheit des Fahrers [Kra98] bzw. unvollkommene Beherrschung des Gaspedals [Wie74] sowie zufälliges Trödeln [PTV11] [Har07] nicht mehr oder zumindest nur in geringer Ausprägung auftreten. Nicht zuletzt ist anzumer-

ken, dass von einer deutlich geringeren Reaktionszeit automatisierter Fahrzeuge gegenüber menschlichen Fahrern auszugehen ist, was letztlich die Grundlage dafür ist, dass auch niedrigere Zeitlücken akzeptiert werden können.

Belastbare Werte zur Geschwindigkeitswahl automatisierter Fahrzeuge wurden nicht gefunden, jedoch wird i. d. R. unterstellt, dass

- Geschwindigkeitsbeschränkungen strikt eingehalten werden,
- Geschwindigkeitsbeschränkungen auch räumlich exakter eingehalten werden (früheres und ggf. stärkeres Verzögern, späteres Beschleunigen bei Aufhebung) sowie
- die einzelnen Fahrgeschwindigkeiten geringeren Streuungen unterliegen.

Derzeit bildet die Sensorreichweite nach vorn eine Grundlage für die Wahl der Wunschgeschwindigkeiten beim freien Fahren (d. h. Fahren ohne unmittelbar vorausfahrendes Fahrzeug). Das Fahrzeug muss in der Lage sein, vor einem Objekt innerhalb der Sensorreichweite zum Stehen zu kommen. Eine Annahme bzgl. der künftig noch erschließbaren Potenziale zur Erhöhung der Sensorreichweite ist nicht möglich; in der Literatur konnten hierzu keine Abschätzungen gefunden werden. Eine Erhöhung der Vorausschauweite durch Fahrzeugvernetzung kann hierbei nur eingeschränkt einbezogen werden, da Hindernisse auch existieren können, wenn sie zuvor weder von der Infrastruktur noch von anderen Fahrzeugen erfasst wurden.

Andere Parameter wie der Ruck wirken sich zwar entscheidend auf das Komfortempfinden aus, sind jedoch im Hinblick auf die Verkehrsflusssimulation nicht von Bedeutung.

In Bezug auf die Fahrstreifenwahl wurde für automatisierte Fahrzeuge angenommen, dass notwendige Fahrstreifenwechsel früher initiiert werden als bei menschlichen Fahrern. Auf der anderen Seite wurde festgestellt, dass die Häufigkeit freiwilliger Fahrstreifenwechsel zum Überholen bei Einsatz von Assistenzfunktionen zur Längsführung abnimmt [Jam13] (zitiert in [Ari16]). Dies kann z. T. darauf zurückzuführen sein, dass die heute verfügbaren Assistenzfunktionen einen manuellen Eingriff zur Initiierung und Durchführung des Fahrstreifenwechsels erfordern. Wird der Fahrstreifenwechsel eben-

falls automatisiert durchgeführt, könnte dieser Effekt schwächer ausfallen.

Auf makroskopischer Ebene können die verringerten Reaktionszeiten und Abstände sowie die verringerte Streuung von Geschwindigkeiten u. a. zu einer Harmonisierung des Verkehrsflusses und einer Vermeidung von Geschwindigkeitseinbrüchen führen; einige Studien weisen unter bestimmten Voraussetzungen sogar auf Potenziale zur Erhöhung der Kapazität hin (u. a. [VDA17], [Wie16]). Im Mischverkehr mit konventionellen Fahrzeugen werden sich diese Effekte jedoch nur eingeschränkt einstellen; insbesondere sind durch unterschiedliche Verhaltensweisen zwischen menschlichen und konventionellen Fahrzeugen auch negative Effekte denkbar.

2.4 Verkehrliche Wirkungen von Streckenbeeinflussungsanlagen

Um die Verkehrssicherheit zu erhöhen, die Auswirkungen von Verkehrsstörungen zu mindern und deren Entstehung möglichst zu vermeiden, werden auf Autobahnen und autobahnähnlichen Schnellstraßen bereits seit Jahrzehnten Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA) eingesetzt. Im Rahmen des Projektplans Straßenverkehrstelematik 2015 wurden Modernisierungs- und Neubauprojekte für SBA in erheblichem Umfang geplant und zu einem Teil schon umgesetzt. Das unterstreicht, dass dieser Form der Verkehrsbeeinflussung auch zukünftig eine große Bedeutung zugemessen wird. Gleichzeitig gewinnen auch Qualitätsmanagement und -sicherung bzgl. der bestehenden Anlagen an Bedeutung. In Deutschland sind das MARZ [BASt99] bzw. [BASt18], die TLS [BASt12] sowie die RWVA [BASt97a] und RWVZ [BASt97b] die maßgeblichen Richtlinien für Planung und Betrieb von SBA.

In diesem Vorhaben werden lediglich Wirkungen von SBA betrachtet. Andere Formen von Verkehrsbeeinflussungsanlagen, etwa temporäre Seitenstreifenfreigabe, Netz- oder Knotenpunktbeeinflussungsanlagen, werden nicht in die Untersuchung einbezogen.

Nachfolgend wird zunächst die grundsätzliche Funktionsweise des Systems SBA beschrieben. Anschließend wird dargestellt, durch welche Maßnahmen auf den Verkehrsprozess und das Fahrverhalten eingewirkt wird und welche Ziele jeweils mit diesen Maßnahmen verknüpft sind.

2.4.1 Aufbau und Funktionsweise

SBA erfassen über lokale Detektionseinrichtungen u. a. Verkehrsstärke und mittlere Geschwindigkeiten, leiten daraus weitere Verkehrskenngrößen ab und nutzen diese zur automatisierten Bewertung der Verkehrssituation. Zusätzlich werden mittels entsprechender Sensorik auch die Wetter- und Umfeldbedingungen erfasst, u. a. Niederschlag, Fahrbahnässe und Sichtweite. Hieraus wiederum werden automatisiert Maßnahmen zur Gefahrenwarnung und zur Beeinflussung des Verkehrsablaufs abgeleitet, die über Wechselverkehrszeichen an die Verkehrsteilnehmer ausgegeben werden. Zusätzlich zu diesen Automatikprogrammen einer SBA können die Operatoren einer Verkehrs- und Betriebszentrale auch manuelle Hand- oder Sonderprogramme aktivieren, z. B. um vor Unfällen zu warnen oder die Absicherung von Arbeitsstellen zu unterstützen. Der funktionale Aufbau einer SBA mit ihren einzelnen Komponenten und Prozessen ist im MARZ [BAS99] detailliert dokumentiert.

2.4.2 Maßnahmen und Wirkziele

Die Wirkung einer SBA ist mit folgenden Zielen und Erwartungen verbunden:

- Steigerung der Verkehrssicherheit
- Steigerung der Stabilität des Verkehrsablaufs
- Verbesserung der Aufmerksamkeit
- Verringerung der Streuung der Geschwindigkeiten
- Verbesserung des Abstandsverhaltens

Die Wechselzeichengeber einer SBA bieten folgende Einflussmöglichkeiten auf den Verkehrsprozess:

- zulässige Höchstgeschwindigkeit
- Fahrstreifensignalisierung
- Überholverbote
- Gefahrenwarnungen

Auf der Grundlage verschiedener, parallel eingesetzter Situationserkennungsverfahren werden Maßnahmen abgeleitet, die lokal und längs der Strecke abgeglichen und priorisiert werden. Das resultierende Schaltbild kann eine oder mehrere der o. g. Einflussmöglichkeiten umfassen; u. U. können mehrere Maßnahmen überlagernd wirksam sein.

Programm	Steigerung der Verkehrssicherheit	Steigerung der Stabilität des Verkehrsablaufs	Verbesserung der Aufmerksamkeit	Verringerung der Streuung der Geschwindigkeiten	Verbesserung des Abstandsverhaltens
Geschwindigkeitsharmonisierung (Automatik)		X		X	X
Lkw-Überholverbot (Automatik)	X	X		X	
Stauwarnung (Automatik)	X		X		
Nässewarnung mit/ohne Lkw-Überholverbot (Automatik)	X		X		X
Nebelwarnung (Automatik)	X		X		X
Fahrstreifensignalisierung (Sonderprogramm)	X				
Baustelle (Sonderprogramm)	X		X		
Unfall (Sonderprogramm)	X		X		
Glättewarnung (Sonderprogramm)	X		X		

Tab. 2-2: Zuordnung der SBA-Programme nach MARZ 1999 zu ihren Wirkzielen

Tabelle 2-2 liefert einen Überblick über die wichtigsten Maßnahmen einer SBA und die jeweils zugeordneten Wirkziele.

2.4.3 Kenntnisstand

Ein wichtiger Bestandteil dieses Vorhabens besteht darin, die Wirkungen von SBA-Maßnahmen auf das Verhalten zu ermitteln, um diese im Rahmen der mikroskopischen Verkehrssimulation abbilden zu können. Dies umfasst sowohl erwünschte Wirkungen als auch zusätzliche Nebeneffekte, die durchaus auch unerwünscht sein können. Die Reaktion der Verkehrsteilnehmer auf bestimmte Anzeigezustände der SBA, einschließlich ihrer Variation zwischen den Verkehrsteilnehmern, muss in den Verhaltensmodellen der Verkehrsflusssimulation so abgebildet werden, dass diese auf makroskopischer und mikroskopischer Ebene den empirischen Beobachtungen entspricht. Das heute beobachtbare Verhalten dient als Referenz bezüglich

- des Verhaltens automatisierter Fahrzeuge (in unterschiedlichen Durchdringungsszenarien),

- des Verhaltens von simulierten Fahrzeugen im Vergleich zu den empirischen Beobachtungen im Rahmen der Kalibrierung und Validierung der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation.

In den nachfolgend beschriebenen Untersuchungen konnten z. T. erhebliche Nutzenpotenziale sowohl im Hinblick auf die Verkehrssicherheit als auch auf die Harmonisierung des Verkehrsflusses (präventive Schaltungen) nachgewiesen werden. Der Begriff Wirksamkeit ist von der verkehrlichen Wirkung von SBA zu differenzieren. Die in dieser Studie gewählten Kenngrößen zur Beschreibung der Wirkung von SBA auf den Verkehrsablauf sind mikroskopische Kenngrößen die durch die Brutto-/Nettozeitlücke, Fahrzeugabstände, Fahrstreifenwechsel, Belegungszeit oder die Auffahrzeit (Time-To-Collision) beschrieben werden. Die Wirkung von VBA ist in der Realität abhängig von der Wahrnehmung, Akzeptanz und Befolgung der Verkehrsteilnehmer. Bisherige Untersuchungen zu SBA lassen sich wie folgt kategorisieren:

- Ermittlung von Nutzen, Wirksamkeit oder Wirkungen von SBA allgemein; Entwicklung von Bewertungsverfahren für Investitionsentscheidungen
- Evaluation der Wirksamkeit einzelner SBA (z. B. nach ihrer Errichtung)
- Bewertung alternativer Steuerungsverfahren von SBA; Vergleich mit konventionellen Verfahren
- Entwicklung und Validierung von Verfahren zur Qualitätsbewertung von SBA im laufenden Betrieb

Bei Untersuchungen zu Nutzenpotenzialen von SBA stand zunächst vor allem die Bewertung hinsichtlich der Verkehrssicherheit im Vordergrund. So wurde z. B. in [Sie00] eine deutliche Reduktion von Unfallzahlen durch SBA nachgewiesen. Da Unfälle seltene Ereignisse darstellen, sind für solche Untersuchungen jedoch lange Betrachtungszeiträume erforderlich. Daher existieren Ansätze, die Verkehrssicherheit über Ersatzkenngrößen, etwa Anteile oder Häufigkeiten kritischer Zeitlücken oder Auffahrzeiten (engl. Time to Collision, TTC) zu bewerten. In [Ste02] wird hierzu z. B. ein Versagensmodell für die Unfallwahrscheinlichkeit bei starken Geschwindigkeitseinbrüchen aufgestellt, das mehrere Ersatzkenngrößen und den Einfluss der SBA miteinander verknüpft. Hinsichtlich präventiver

Schaltungen zur Harmonisierung des Verkehrsflusses konnte so u. a. eine Verringerung kritischer Zeitlücken und Auffahrzeiten festgestellt werden (weitere Ergebnisse hinsichtlich anderer Wirkdimensionen werden weiter unten erwähnt). Für die Bestimmung der Ersatzkenngrößen sind lokale Einzelfahrzeugdaten unerlässlich.

Nachfolgend werden die bisherigen nationalen wie internationalen Untersuchungen, die sich mit der Wirkung von SBA befassen, aufgeführt und zusammengefasst. Die der Beschreibung der Wirkung dienenden Kenngrößen sollen am Ende strukturiert und zusammengefasst werden.

2.4.3.1 Studien zu SBA in Deutschland

FÄRBER u. FÄRBER, 2002

[Fär02] untersuchten in ihrer Arbeit die Beweggründe für die teils mangelnde Akzeptanz von Wechselverkehrszeichen (WVZ) mithilfe von Laborexperimenten und einer Befragung von Verkehrsteilnehmern.

Dabei wurden anfangs verschiedene Leitfragen formuliert zu den Themen Verständlichkeit von Verkehrszeichen, Wahrnehmbarkeit und die Dauer der Anzeige von WVZ sowie zum Aufforderungscharakter und der Akzeptanz von WVZ und wie sich diese auf das Fahrverhalten auswirken.

Eine Befragung wurde mit 50 Probanden im Alter von 20 bis 70 Jahren durchgeführt. Die Teilnehmer wurden zu ihrer Verständlichkeit, Wahrnehmung und Akzeptanz der Verkehrsschilder befragt. Als Ergebnis konnte festgehalten werden, dass insbesondere Schriftfelder mit langen Schriftzügen zur Ablenkung des Fahrers führen. Die Verständlichkeit der Schilder war, bis auf einige wenige, durchweg zufriedenstellend.

Neben dem Laborexperiment wurden 77 Verkehrsteilnehmer im Testfeld der SBA A8/Ost zum Fahrverhalten im Bereich der SBA befragt, wenn entweder eine alleinige Geschwindigkeitsbegrenzung (120 km/h) oder eine Geschwindigkeitsbegrenzung (120 km/h) inkl. Zeichen „Gefahrenstelle“ und Textzusatz „Staugefahr“ angezeigt wird. Von den Befragten gaben 38 % an, gar nicht auf die Anzeigen zu reagieren, 26 % gingen kurz vom Gas und 15 % bremsen ab. Die restlichen 21 % gaben an, die Geschwindigkeit angepasst zu haben, aufmerksamer zu fahren, den Fahrstreifen zu wechseln oder sonstige Reaktionen zu haben.

Auf die Frage, welche Geschwindigkeit gefahren würde, wenn das Fahrzeug vor dem Befragten schneller fahren sollte, die Schilderbrücke aber 100 km/h anzeigte, gaben 60 % an, sich an die angezeigte Geschwindigkeit zu halten, zzgl. 10 %. 34 % gaben an, „im Strom mitzuschwimmen“, sprich, sich an die schneller fahrenden Fahrzeuge anzupassen. 6 % gaben an, unabhängig von der angezeigten Geschwindigkeit, 140 km/h oder 20 % schneller als erlaubt zu fahren.

In der Untersuchung konnten nur exemplarische Reaktionen mittels Befragung der Verkehrsteilnehmer auf einige wenige Verkehrszeichen ermittelt werden. Empirisch ermittelte Daten, aus denen Rückschlüsse auf die Wirkung verschiedener WVZ gezogen werden können, wurden in [Ste02] untersucht.

STEINHOFF et al., 2002

Die Untersuchung befasst sich mit der Wirkung präventiver Schaltungen auf den Verkehrsfluss. Die Motivation war, dass der Grund von präventiven Schaltungen einer SBA (80 – 120 km/h) i. d. R. für den Verkehrsteilnehmer nicht direkt zu erkennen ist.

[Ste02] untersuchte dazu drei SBA (A1, A3, A8/Ost) mit unterschiedlichen präventiven Schaltprogrammen (Harmonisierung, Unruhe im Verkehr, Ferrari, Traffic Forecast) in Deutschland hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Qualität der Verkehrssicherheit. Dazu wurden anfangs verschiedene Kenngrößen definiert, die der Beschreibung des Geschwindigkeitsniveaus und der Verkehrssicherheit dienen, aber auch Rückschlüsse auf die Verkehrsqualität zulassen. Neben aggregierten Verkehrsdaten und Schaltzuständen wurden auch Einzelfahrzeugdaten an fünf ausgewählten Standorten erhoben und genutzt. Der Betrachtungszeitraum lag bei fünf Wochen.

Zur Beschreibung des Geschwindigkeitsniveaus wurde der Befolgungsgrad der Anlage erfasst. Der Befolgungsgrad wird von [Ste02] als ein Maß für den Anteil der mittleren Änderung des Geschwindigkeitsniveaus der Pkw beschrieben. Dabei werden die Kontexte der Schaltungen mitberücksichtigt und die aktuelle und die erwartete Geschwindigkeit der Pkw spielen eine wichtige Rolle.

Ein Kriterium für die Verkehrssicherheit stellt der Anteil kritischer Auffahrzeiten bzw. Zeitlücken dar,

die wiederum mittels der Netto-Zeitlücke – also der Zeitlücke zwischen dem Ende des vorausfahrenden Fahrzeugs und dem Anfang des aktuellen – und der Auffahrzeit (TTC) beschrieben wird. Die Auffahrzeit beschreibt die Zeit, die zu einer Kollision führen würde, falls zwei hintereinander fahrende Fahrzeuge ihre momentane Geschwindigkeit und den Fahrstreifen beibehalten wollen.

Die Standardabweichung der mittleren Geschwindigkeit der einzelnen Fahrzeuge in 30-Sekunden-Intervallen, bezogen auf einen Fahrstreifen, dient einer Beschreibung eines harmonischen Verkehrsflusses.

[Ste02] nutzte außerdem eine Spektralanalyse, um fahrstreifenbezogene Schwankungscharakteristiken der Flussgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von den betrachteten Zeitintervallen darzustellen.

Die Ergebnisse lieferten Erkenntnisse über die Wirkung von präventiven Schaltungen. So konnte festgestellt werden, dass eine Schaltung das Geschwindigkeitsniveau zwar geringfügig, jedoch positiv beeinflusste. Im Mittel betrug die Reduktion ca. 2 km/h des Geschwindigkeitsniveaus auf 10 km/h Senkung der angezeigten und zulässigen Geschwindigkeit.

Das Harmonisierungsmaß, also die Standardabweichung der Einzelgeschwindigkeiten (30-Sekunden-Intervalle), konnte im Falle einer präventiven Schaltung im Mittel um 4 km/h verringert werden. Dies galt insbesondere für Geschwindigkeiten im Bereich von 90 km/h und 120 km/h auf dem mittleren und rechten Fahrstreifen sowie für Geschwindigkeiten zwischen 100 km/h und 130 km/h auf dem linken Fahrstreifen. Eine Schaltung von 100 km/h und Lkw-Überholverbot wurde dabei als besonders wirksam identifiziert.

Mittels der Spektralanalyse konnte [Ste02] zeigen, dass eine präventive Schaltung einen in Längsrichtung harmonischeren Verkehrsfluss bewirkte.

Zusätzlich wurde festgestellt, dass sich die Anzahl von gefährlichen Zeitlücken und Auffahrzeiten grundsätzlich verringerte.

Die gewählten Ansätze wurden in [Ste03] weiterentwickelt.

STEINHOFF, 2003

Die Autorin greift die in [Ste02] untersuchten Kriterien auf, um die Wirksamkeit von präventiven Schal-

tungen zur Harmonisierung des Verkehrsflusses während des Betriebes fortlaufend zu bewerten.

Den Anteil kleiner Zeitlücken wurde als Kriterium für die Verkehrssicherheit definiert. Wird der Anteil der kleinen und gefährlichen Zeitlücken infolge einer präventiven Schaltung reduziert, kann von einer positiven Wirkung der Anlage ausgegangen werden. Bei der Untersuchung der kleinen Zeitlücken ($t_{\text{netto}} \leq 1$ Sek.) ergaben sich die größten Sicherheitsgewinne mit einem Anteilsrückgang von t_{netto} um 20 bis 40 %, wenn die mittlere Geschwindigkeit bei 100 km/h liegt. Am wirksamsten wurde die Schaltung 100 km/h mit Lkw-Überholverbot ermittelt. Bei der Anzeige einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h konnte auf dem linken Fahrstreifen ein Anteilsrückgang von 5 bis 20 % festgestellt werden. Auf dem mittleren Fahrstreifen konnten bei der Anzeige von 100 km/h und Lkw-Überholverbot Sicherheitsgewinne bei einem Rückgang von 5 bis 10 % nachgewiesen werden. Auf dem rechten kam es bei der gleichen Schaltung zu einer Zunahme von kleinen Zeitlücken.

Eine kleine gefährliche Zeitlücke wurde als $t_{\text{netto}} \leq 0,5$ Sek. definiert und impliziert nach [Ste03] extremes Drängeln, knappes Einscheren und eine hohe Risikobereitschaft. Auf beiden Überholfahrstreifen konnte bei einer Schaltung ein Rückgang des Anteils kleiner gefährlicher Zeitlücken von 1 bis 2 % nachgewiesen werden, wenn die Geschwindigkeit gut eingehalten wurde. Als wirksamste Schaltung stellte sich abermals die Anzeige von Tempo 100 km/h und Lkw-Überholverbot dar.

Die Auffahrzeit (TTC) wurde als kritisch erachtet, wenn die Werte kleiner 10 Sek. waren. [Ste03] konnte zeigen, dass bei einer Schaltung von 120 km/h und Lkw-Überholverbot der Anteil kritischer TTC um 1 % (statistisch signifikant) zurückging. Fahrzeuge, die die Geschwindigkeitsbegrenzung nicht befolgten, erhöhten jedoch den Anteil kritischer TTC-Wert um bis zu 20 %. Ein Lkw-Überholverbot führte bei gleich hoher Geschwindigkeitsbeschränkung zu einer deutlichen Verringerung des Anteils kritischer Auffahrzeiten.

Eine positive Wirkung auf die Verkehrsqualität infolge einer Schaltung konnte nachgewiesen werden. So betrug eine allgemeine Verringerung des Geschwindigkeitsniveaus ca. 2 km/h auf 10 km/h Verringerung der zulässigen Geschwindigkeit. Eine deutliche Absenkung konnte abermals durch eine zusätzliche Schaltung des Lkw-Überholverbotes

oder der Darstellung von Warnungen („Gefahrenstelle“ oder „Baustelle“) erzielt werden.

PISCHNER et al., 2003

[Pis03] beschäftigte sich in seiner Untersuchung mit der Quantifizierung von Nutzenkomponenten, wie den Reisezeitgewinnen und Emissionssenkungen. Zusätzlich wurde ein Konzept erarbeitet, welches den Nutzen eines verbesserten Verkehrsablaufes beschreiben kann. Er untersuchte dabei die Auswirkung von SBA hinsichtlich folgender Kriterien:

- Kapazität (im Sinne der empirisch bestimmten maximalen Verkehrsstärke)
- Harmonisierung des Verkehrs (Fahrstreifenaufteilung und Verteilung der Geschwindigkeiten zwischen den Fahrstreifen in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke)
- Stabilisierung des Verkehrsflusses (Vermeidung bzw. Verzögerung des Übergangs vom stabilen in den instabilen Zustand)

Für die Untersuchung erhob [Pis03] Verkehrsdaten an neun ausgewählten SBA in Deutschland und gliederte diese mit Referenzdaten von zwei unbeeinflussten Querschnitten der A8 und A9 ab. Daraus konnte die Wirkung einer SBA auf Basis eines Vergleiches zwischen dem Mit-Fall (Einfluss durch SBA) und dem Ohne-Fall (kein Einfluss) abgeleitet werden.

Ebenfalls wurde ein Harmonisierungseffekt der SBA untersucht. Zur Beschreibung der Harmonisierung dienen dabei die Verteilung des Verkehrs auf die Fahrstreifen, die Fahrstreifenwechsel zwischen den Fahrstreifen und Unterschiede in den Geschwindigkeiten auf verschiedene Fahrstreifen und zwischen Fahrzeugen auf einem Fahrstreifen. Die Messdaten wurden dazu in Ein-Minuten-Intervallen in ausgewählten 14-Tage-Zeiträumen nach der Gesamtverkehrsstärke in Klassen aggregiert, um die vorab genannten Punkte darstellen zu können.

[Pis03] konnte durch den Vergleich zeigen, dass SBA eine positive Wirkung auf die Harmonisierung haben. Eine Wirkung wurde insbesondere im Bereich von 35 und 65 Kfz/min deutlich, in dem das Geschwindigkeitsniveau mit zunehmender Verkehrsstärke anstieg. Durchschnittlich konnte das Geschwindigkeitsniveau um 10 bis 15 km/h angehoben werden. Zusätzlich konnte beobachtet werden, dass eine Geschwindigkeitsschaltung von bei-

spielsweise 120 km/h langsame Verkehrsteilnehmer zum schnelleren Fahren motivieren kann und somit zu einer Steigerung der Durchschnittsgeschwindigkeit führt.

In Hinblick auf die Fahrstreifenverteilung konnte, insbesondere auf dem linken und mittleren Fahrstreifen, bei hohen Verkehrsstärken (> 40 Kfz/min), eine gleichmäßigere Verteilung nachgewiesen werden. Für geringe Verkehrsstärken konnte nur eine geringe Wirkung von Schaltungen gezeigt werden.

Es konnte anhand eines Mit-Ohne-Vergleichs aufgezeigt werden, dass die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen dem linken und rechten Fahrstreifen (dreistreifige Richtungsfahrbahn) bei einer Anzeige von 60 km/h im Vergleich zu keiner Anzeige deutlich niedriger ist. Es findet also eine Angleichung der Geschwindigkeiten statt.

Die Untersuchung basierte grundsätzlich auf makroskopischen Kenngrößen, wie der Verkehrsstärke, Verkehrsdichte oder der mittleren Geschwindigkeit. Die Wirkung von SBA auf Einzelfahrzeuge wurde von [Pis03] mangels Daten nicht untersucht.

Eine Wirkung der SBA auf die Gesamtkapazität der Strecke konnte in [Pis03] nicht festgestellt werden. Andere Untersuchungen liefern hierzu ein nicht einheitliches Bild: Teilweise konnte eine Erhöhung der Kapazität beobachtet werden ([Rie15]), in anderen Fällen jedoch nicht ([Sch03], [Pis03]).

SCHICK, 2003

Im Rahmen seiner Dissertation untersuchte [Sch03] die Auswirkung von SBA auf die Kapazität und die Leistungsfähigkeit der Strecke sowie auf die Homogenität und die Stabilität des Verkehrsflusses. Dazu erfolgte eine empirische Betrachtung des Verkehrsflusses an Strecken mit und ohne SBA in Deutschland.

[Sch03] konnte in seiner Arbeit keine kapazitätssteigernde Wirkung von SBA feststellen (außer bei SBA mit TSF). Jedoch konnte gezeigt werden, dass SBA einen positiven Einfluss auf die Zusammenbruchswahrscheinlichkeit des Verkehrsflusses haben. Der Zusammenbruch wurde dabei durch ein Abfallen der Geschwindigkeit um mind. 15 km/h in einem Zeitraum von max. 5 min definiert.

Ein positiver Einfluss von SBA auf das Geschwindigkeitsniveau und die Fahrstreifenaufteilung, in Abhängigkeit vom Schaltzustand, kann [Sch03] mit

hilfe eines unechten Mit-Ohne-Vergleichs deutlich machen. Das heißt, die Verkehrsdaten wurden während des Automatikbetriebs der Anlage erfasst. Dabei ergibt sich das Problem, dass sich nicht erkennen lässt, ob das Schaltbild den Verkehrszustand erzeugt hat oder umgekehrt, ob das Schaltbild auf Grundlage des Verkehrszustandes von der Anlagenautomatik ausgewählt wurde. Es kann daher nicht von konstanten Verkehrsbedingungen ausgegangen werden.

KAPPICH et al., 2010

[Kap10] untersucht in seiner Arbeit verschiedene Kenngrößen, anhand derer sich ein harmonischer Verkehrsablauf online beschreiben lässt. Die ermittelten Bewertungsgrößen sollen zu einer Komponente zusammengefasst werden. Dieses Wirkungskriterium soll die Größe von möglichen Verbesserungen bzw. Verschlechterungen des Harmonisierungsgrades einer aktivierten Anlage gegenüber einer deaktivierten Anlage beschreiben.

Um dies zu erreichen, werden zwei unterschiedliche Bewertungsansätze gewählt. Im ersten Ansatz werden mikroskopische Kenngrößen hinsichtlich verschiedener Verkehrszustände untersucht. [Kap10] unterteilt die mikroskopischen Kenngrößen, mit denen sich die Wirkung einer SBA beschreiben lässt, in vier Gruppen. Die erste Gruppe beschreibt querbezogenen Kenngrößen. Diese setzen sich aus der Aufteilung zwischen den verschiedenen Fahrstreifen, dem Fahrstreifenwechselverhalten und der mittleren Geschwindigkeitsdifferenz zwischen zwei Fahrstreifen zusammen. In der zweiten Gruppe – der längsbezogenen Kenngrößen – werden die Standardabweichung der Geschwindigkeiten, Varianzen der Geschwindigkeit, das Abstandsverhalten (Weglücke, Zeitlücke, Time-To-Collision) oder die Geschwindigkeitsdifferenz aufeinanderfolgender Fahrzeuge genannt. In einer weiteren Gruppe werden aus den genannten Größen dynamische Kenngrößen, wie die Verkehrsstärkedifferenz oder Geschwindigkeitsdifferenz aufeinanderfolgender Zeitintervalle, abgeleitet. In der vierten Gruppe, den räumlichen Größen, werden die verschiedenen Beschreibungsgrößen über auseinander liegende Querschnitte beobachtet.

[Kap10] untersucht die vorab definierten Kenngrößen hinsichtlich ihrer Eignung für eine statistische Analyse mittels Regression. Um den Verkehrszustand abbilden zu können, wird zusätzlich die Ver-

kehrsdichte hinzugezogen, die neben der Verkehrsstärke noch die Geschwindigkeit berücksichtigt. Dadurch kann der Verkehrszustand mit einer Größe beschrieben werden (freier Verkehr – niedrige Dichte; gestörter Verkehr – hohe Dichte). Eine Unterscheidung der Schaltgründe für eine Geschwindigkeitsvorgabe wurde in der Untersuchung nicht berücksichtigt.

Für die verschiedenen Kenngrößen wurde jeweils eine Regressionsanalyse für den unbeeinflussten sowie für den beeinflussten Querschnitt durchgeführt. Ein Vergleich der Regressionsgeraden sollte Aufschluss über die Wirkung der SBA Schaltung geben. Dabei ergab sich, dass sich die mittlere Differenzgeschwindigkeit zwischen zwei Fahrzeugen je Minutenintervall im Vergleich zu den anderen Kenngrößen am stärksten mittels einer Schaltung beeinflusst werden kann und sich daher bei dieser Kenngröße deutliche Unterschiede zwischen beeinflusstem und unbeeinflusstem Verkehr erkennen lassen. Sie wurde daher als Kenngröße zur Beschreibung der relativen Wirksamkeit verwendet. Für eine praktische Umsetzung des Bewertungsverfahrens wurden verschiedene Schwierigkeiten erkannt, weshalb das Verfahren weiterentwickelt wurde.

Das Bewertungsverfahren der absoluten Wirksamkeit basiert auf der Abweichung der Kenngrößen in einem Wertebereich verschiedener Grenzwerte, die sich entweder aus einem idealen Wert oder den vorliegenden Verkehrsdaten ergeben. Als Grundlage wird auf ein angepasstes Bewertungskonzept von [Ste03] zurückgegriffen, welches die Akzeptanz der aktuellen Schaltung und den vorhandenen Wirkungsgrad berücksichtigt.

Der Befolgungsgrad ist nach [Kap10] abhängig von der Geschwindigkeit der Pkw und der Befolgung des Lkw-Überholverbotes. Der Befolgungsgrad Pkw wird in der Untersuchung über die relative Anzahl der Fahrzeuge auf dem Überholstreifen je Minute definiert, deren Geschwindigkeit maximal um +/- 10 km/h von der zulässigen Geschwindigkeit abweicht. Der maximale Befolgungsgrad ist erreicht, wenn 100 % innerhalb dieser Grenzen liegen.

Unter Befolgungsgrad des Lkw-Überholverbotes wurde der Anteil des Schwerverkehres betrachtet, der innerhalb von 5-Minuten-Intervallen nicht auf dem rechten Fahrstreifen gefahren ist. Dabei fließt die angezeigte Geschwindigkeit mit Gewichtungsfaktoren in den Befolgungsgrad mit ein.

Die genannten Wirkungsgrößen wurden bei diesem Verfahren über die Verkehrsstärke aufgetragen. Die Kenngrößen wurden in dynamische sowie quer- und längsbezogene Kenngrößen zusammengefasst, die mit entsprechenden Gewichtungsfaktoren den Harmonisierungsindex HI ergeben.

[Kap10] kann einen positiven Effekt der SBA auf die Fahrstreifenaufteilung nachweisen. So konnte gezeigt werden, dass sich der Verkehr mit zunehmender Belastung auf den dritten Fahrstreifen verlagert (bis zu 50 %) und dass sich mit zunehmender Länge der Anlage eine gleichmäßigere Auslastung des mittleren und linken Fahrstreifens ergibt. Eine signifikante Veränderung der Differenzgeschwindigkeiten aufeinanderfolgender Minutenintervalle zwischen einem beeinflussten und unbeeinflussten Querschnitt konnte nicht festgestellt werden. Lediglich auf dem zweiten Fahrstreifen eines dreistreifigen Querschnittes konnte an einem unbeeinflussten Querschnitt ein geringerer Anteil an Differenzgeschwindigkeiten zwischen -20 bis -15 km/h und 15 bis 20 km/h im Vergleich zu den anderen Fahrstreifen festgestellt werden.

Den Befolgungsgrad der Geschwindigkeit und des Lkw-Überholverbots fasst [Kap10] in dem sogenannten Akzeptanzindex AI zusammen. Dieser wurde mit dem Harmonisierungsindex HI in dem Wirkungsindex WI zusammengefasst, mit dem sich Rückschlüsse auf die betrachtete Schaltung schließen lassen.

MAGET, 2010

[Mag10] untersucht in seiner Diplomarbeit die Einflüsse des Wetters auf die Verkehrssicherheit auf Autobahnen und entwickelt anhand von Daten, welche aus dem Wetter- und Verkehrszustand abgeleitet wurden, Indikatoren zur Beschreibung der Verkehrssicherheit. Als Datengrundlage wurden Daten (lokale Einzelfahrzeugdaten) der BAB 92 im Bereich des AK Neufahrn genutzt.

Zur Beschreibung der Verkehrssicherheit betrachtet [Mag10] neben den gängigen Kenngrößen, wie der Nettozeitlücke, Geschwindigkeit, TTC und Varianz der Geschwindigkeiten, zusätzlich das Compensated Individual Braking Time Risk (CIBTR), das Individual Braking Time Risk (IBTR) und das Platoon Braking Time Risk (PBTR).

Die IBTR beschreibt das Risiko eines Auffahrunfalls, falls das vorausfahrende Fahrzeug plötzlich

anhält. Bei der Kenngröße wird zusätzlich der Fahrbahnzustand in Abhängigkeit von den Witterungseinflüssen berücksichtigt sowie die Geschwindigkeitsbegrenzung auf dem untersuchten Streckenabschnitt.

Das CITBR wird beschrieben als der logarithmische Quotient der Zeit, die ein Fahrzeug für einen Bremsvorgang benötigen würde, um nicht auf das vorausfahrende Fahrzeug aufzufahren sowie der Nettozeitlücke zweier Fahrzeuge.

Die PTBR wird genutzt, um die Sicherheit von Fahrzeugkolonnen beschreiben zu können. Die Kenngröße wird definiert als die gesamten Einzelrisiken (IBTR) innerhalb einer Fahrzeugkolonne. Die Risiken innerhalb einer Kolonne werden so lange addiert, bis ein Fahrzeug mit einem ausreichenden Sicherheitsabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug folgt.

[Mag10] konnte in seiner Arbeit zeigen, dass die Kenngrößen Geschwindigkeit, Nettozeitlücke, CIBTR und IBTR die stärksten Reaktionen auf Niederschlagsereignisse hatten und sich somit zur Beschreibung der Verkehrssicherheit nutzen lassen. Es konnte jedoch nicht aufgezeigt werden, ob die Reaktionen aufgrund des Wetterereignisses oder der SBA-Schaltungen zustande kamen. Die TTC konnte keine Zusammenhänge zwischen den Witterungseinflüssen und der Verkehrssicherheit darstellen.

RIEGELHUTH u. GLATZ, 2015

[Rie15] beschreibt in seinem Bericht die Erfahrung mit SBA in Hessen.

Ein entscheidendes Kriterium für die Wirkung einer Anlage ist laut [Rie15] der Befolgungsgrad. Die Voraussetzungen für eine hohe Befolgung ist aus Steuerungssicht ein hoher Anteil erkannter Verkehrsstörungen und eine niedrige Fehlalarmquote. Den Befolgungsgrad definiert [Rie15] als den Anteil der Fahrzeuge, der die angezeigte Geschwindigkeit zuzüglich 20 km/h unterschreitet.

Als Wirkung wurde eine Änderung der Verkehrssicherheit, der Verkehrsqualität und der Kapazität beschrieben. Bei der SBA auf der A5 konnte eine Verbesserung der Verkehrssicherheit – hier bewertet durch einen Rückgang der Geschwindigkeitsunterschiede (35 bis 45 %) gegenüber dem Zustand ohne SBA – sowie ein Rückgang von Unfällen mit Personenschäden nachgewiesen werden.

Zusätzlich wurde die Befolgung von statischen (zeitabhängig) und dynamischen (verkehrsabhängig) Verkehrszeichen untersucht. Dynamische Anzeigen wurden dabei deutlich besser befolgt als statische Anzeigen.

Entgegen der Ansicht von [Sch03] konnten bei entsprechender Steuerung der Anlage eine deutliche Erhöhung der Kapazität (größte Verkehrsstärke in 60 aufeinanderfolgenden Ein-Minuten-Intervallen bei vorhandenem Rückstau) festgestellt werden. Die Kapazität konnte nach Inbetriebnahme der SBA von 5.200 Kfz/h um bis zu 13 % (auf 5.900 Kfz/h) und nach einer Optimierung der Steuerungsparameter um weitere 8 % (auf 6.400 Kfz/h) gesteigert werden. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Kapazität hier als Kapazität aus dem Stauabfluss definiert ist.

MAIER u. GRÖTSCH, 2016

In dem Beitrag wurde eine Wirkungsuntersuchung hinsichtlich des Verkehrsflusses, der Verkehrssicherheit sowie der Zuverlässigkeit der Stauwarnung an der BAB A9 in Bayern durchgeführt. Dabei wurden in einem ersten Schritt Schaltstrategien bei Nässe von verschiedenen Mess- und Anzeigenquerschnitten untersucht und im Weiteren Änderungen des Verkehrsflusses vor und nach dem Einsatz eines neuen Steuerungsparametersatzes analysiert.

Die Beurteilung des Verkehrsflusses erfolgte anhand von Reisezeitschätzungen aus lokal gemessenen, minütlich gemittelten Pkw-Geschwindigkeiten, welche mit zugehörigen Verkehrsmengen und Kostensätzen verrechnet wurden. Mikroskopische Kenngrößen bezüglich des Verkehrsflusses konnten aus dem Bericht von [Mai16] nicht gewonnen werden.

Zur Untersuchung der Verkehrssicherheit wurden beispielhaft Daten (lokale Einzelfahrzeugdaten) von drei Querschnitten der BAB A9 und der BAB A92 von zehn repräsentativen Tagen untersucht und hinsichtlich relevanter Regenereignissen untersucht. Die Bewertung der Verkehrssicherheit erfolgte auch hier über die TTC. [Mai16] sieht jedoch, abweichend zu [Ste02], die TTC erst als kritisch, wenn die Werte unterhalb von 4 Sekunden liegen. [Ste02] hatte Werte kleiner 10 Sekunden als kritisch erachtet. Bei Querschnitten, die „80/Schleudergefahr“ angezeigt hatten, konnte eine günstigere TTC Verteilung bei Nässe beobachtet werden als bei Quer-

schnitten, die nur eine Geschwindigkeitsbegrenzung anzeigen. Dabei konnte nicht genau differenziert werden, ob die restriktive Geschwindigkeitsbegrenzung oder die Warnzeichen für die Verbesserung verantwortlich sind.

Bezüglich der Geschwindigkeitswahl konnte an einem Querschnitt mit dem angezeigten Schaltbild „80/Schleudergefahr“ ein Rückgang der Geschwindigkeiten bei Niederschlag nachgewiesen werden. 5 % der Pkw-Fahrer wählen jedoch auch bei dem genannten Schaltbild und Nässeereignissen eine Geschwindigkeit von mehr als 110 km/h.

2.4.3.2 Internationale Studien zu streckenbezogener Verkehrsbeeinflussung

RÄMÄ, 2001

[Räm01] untersuchte in seiner Dissertation die Einflüsse von Schaltbildern, wie der Anzeige von Witterungseinflüssen, auf das Fahrverhalten.

Um Rückschlüsse auf das Fahrverhalten zu gewinnen, wurden mehrere Studien durchgeführt. Bei der ersten Studie wurden die Schaltbilder von einem Mitarbeiter in der Verkehrsrechnerzentrale gesteuert. Vor Witterungseinflüssen (Eis, Schnee, Regen) wurde mittels der Signalbegriffe „Nässe“, „Rutschgefahr“ oder „Mindestabstand“ gewarnt.

Um eine Aussage über das Fahrverhalten hinsichtlich der gefahrenen Geschwindigkeit und der Fahrzeugabstände treffen zu können, wurden Verkehrsdaten an drei unterschiedlichen Orten in Finnland erhoben (über zwei Winter hinweg). Bei den Teststrecken handelte es sich jeweils um einen Autobahnabschnitt. An jedem der Standorte wurden Daten einerseits erfasst, bevor der Verkehrsteilnehmer die Warnung sehen konnte (360 m – 1.100 m vorher) und andererseits nach dem Anzeigequerschnitt. Dabei stellte die erste Messung den Referenzfall dar.

Die Ergebnisse zeigten, dass sich die Durchschnittsgeschwindigkeit bei der Anzeige der entsprechenden Schaltbilder um 1-2 km/h reduzierte. Hinsichtlich des Abstandsverhaltens konnte ein leichter Rückgang des Anteils von Zeitlücken kleiner 1,5 Sek. verzeichnet werden.

In einer weiteren Studie wurde die Wirkung einer witterungsabhängigen Schaltung auf einem 14 km langen Autobahnabschnitt (zwei Fahrstreifen je Richtung) untersucht. Die SBA konnte dabei Ge-

schwindigkeitsbegrenzungen und Warnungen anzeigen. Die Daten wurden mit Induktionsschleifen erfasst.

Bei schlechten Witterungsverhältnissen im Winter wurde die angezeigte Geschwindigkeit von 100 km/h auf 80 km/h reduziert, im Sommer von 120 km/h auf 100 km/h.

[Räm01] zeigte, dass die mittlere Geschwindigkeit im Winter um ca. 9,7 km/h niedriger war, wenn statt einer Schaltung von 100 km/h die Anzeige auf 80 km/h geschaltet wurde. Wurde zu der Geschwindigkeitsbegrenzung zusätzlich die Warnzeichen angezeigt, war die mittlere Geschwindigkeit geringer (-11,1 km/h).

Im Sommer war ein Rückgang der mittleren Geschwindigkeit bei einer Schaltung von 120 km/h auf 100 km/h von durchschnittlich 7,2 km/h zu verzeichnen.

[Räm01] untersuchte zusätzlich die Unterschiede von statischen und dynamischen Verkehrszeichen auf einer einstreifigen Straße. Für die Studie wurde an einer Straße mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h entweder eine variable Geschwindigkeitsbegrenzung (dynamisch) oder ein statisches Verkehrsschild installiert. Beide zeigten eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 60 km/h an. Vor und nach den jeweiligen Zeichen wurde die mittlere Geschwindigkeit und die Zeitlücken (≥ 5 Sek.) erfasst.

Die Ergebnisse zeigten, dass es vor den jeweiligen Schildern keine nennenswerten Unterschiede in der mittleren Geschwindigkeit gab.

Hinter den Schildern betrug die mittlere Geschwindigkeit der variablen Geschwindigkeitsbegrenzung 66,3 km/h und hinter der statischen Geschwindigkeitsanzeige 70,4 km/h. Grundsätzlich überschritten mehr Verkehrsteilnehmer die Geschwindigkeitsbegrenzung, wenn das statische Schild installiert war (65,5 %) als wenn das dynamische Schild installiert war (47 %).

KOLISSETY et al., 2006

[Kol06] untersuchte in seinem Paper den Einfluss von Variable Message Signs (VMS) auf das Fahrverhalten bei ungünstigen Sichtbedingungen. Die Studie fand in einem Fahrsimulator mit 10 Probanden statt und weist daher keine statistische Signifikanz auf, sondern lässt sich lediglich als experi-

mentelle Studie betrachten. Simuliert wurde eine 8,5 km lange Teststrecke des Meishin Expressway (Japan). Die Probanden führen die Strecke bei nebeligen Konditionen einmal mit einer aktiven SBA und einmal mit einer deaktivierten SBA. Bei einer aktiven SBA wurde die Zeichenkombination „Nebel + 60 km/h“ angezeigt.

[Kol06] konnte zeigen, dass rund 40 % der Probanden effektiv beeinflusst wurden (durchschnittliche Geschwindigkeitsverringerung größer 10 km/h im Vergleich zur unbeeinflussten Strecke). Ebenfalls bei 40 % konnte ein geringer Einfluss der Schaltung nachgewiesen werden (durchschnittliche Geschwindigkeitsverringerung zwischen 5 und 10 km/h im Vergleich zur unbeeinflussten Strecke). Bei den verbleibenden 20 % konnte keine Wirkung nachgewiesen werden (durchschnittliche Geschwindigkeitsverringerung kleiner 5 km/h im Vergleich zur unbeeinflussten Strecke).

Es konnte nachgewiesen werden, dass SBA auf die Verkehrsteilnehmer eine positive Wirkung entfalten, die sich durch eine Reduzierung der durchschnittlichen Geschwindigkeitsdifferenz bemerkbar macht. Die Repräsentierbarkeit ist jedoch aufgrund der geringen Anzahl der Probanden fraglich.

PAPAGEORGIU et al., 2006

[Pap06] untersuchte in seiner Studie die Auswirkungen von VMS auf den Verkehrsfluss und dem damit verbundenen Fundamentaldiagramm auf einer europäischen Autobahn. Genauer wird die Wirkung

von Geschwindigkeitsanzeigen auf den Verlauf des Zusammenhangs zwischen Verkehrsstärke und Belegungsgrad untersucht.

Für die Studie wurden Verkehrsdaten von 27 repräsentativen Tagen mit unterschiedlichen Witterungsbedingungen analysiert und Daten mit verschiedenen Schaltzuständen (keine Schaltung, 40 mph, 50 mph, 60 mph) in einem Verkehrsflussdiagramm (Verkehrsstärke – Belegungszeit) gegenübergestellt. Erfasst wurden die Daten einer Autobahn mit drei Fahrstreifen je Richtung.

[Pap06] konnte zeigen, dass Geschwindigkeitsbegrenzungen bei einer noch nicht kritischen Belegung (der kritische Belegungsgrad ist dabei definiert als der Punkt, an dem die Verkehrsstärke ihr Maximum erreicht (s. Bild 2-2)) die Steigung der Kurve des Fundamentaldiagramms verringern.

Der Wert der kritischen Belegung konnte durch eine Geschwindigkeitsschaltung gesteigert werden. Es sinkt also die Verkehrsstärke bei gleichbleibendem Belegungsgrad.

Die Untersuchungen gaben keine verlässlichen Rückschlüsse auf eine Kapazitätssteigerung. An einigen Standorten konnte eine Erhöhung der Kapazität festgestellt werden, an anderen jedoch nicht.

[Pap06] untersuchte auch die Witterungseinflüsse auf den Verkehrsfluss. Es zeigte sich, dass an regnerischen Tagen die Kapazität und die kritische Geschwindigkeit (gemessene Geschwindigkeit bei der maximalen Verkehrsstärke (s. Bild 2-2) um ca. 10 % reduziert wurde.

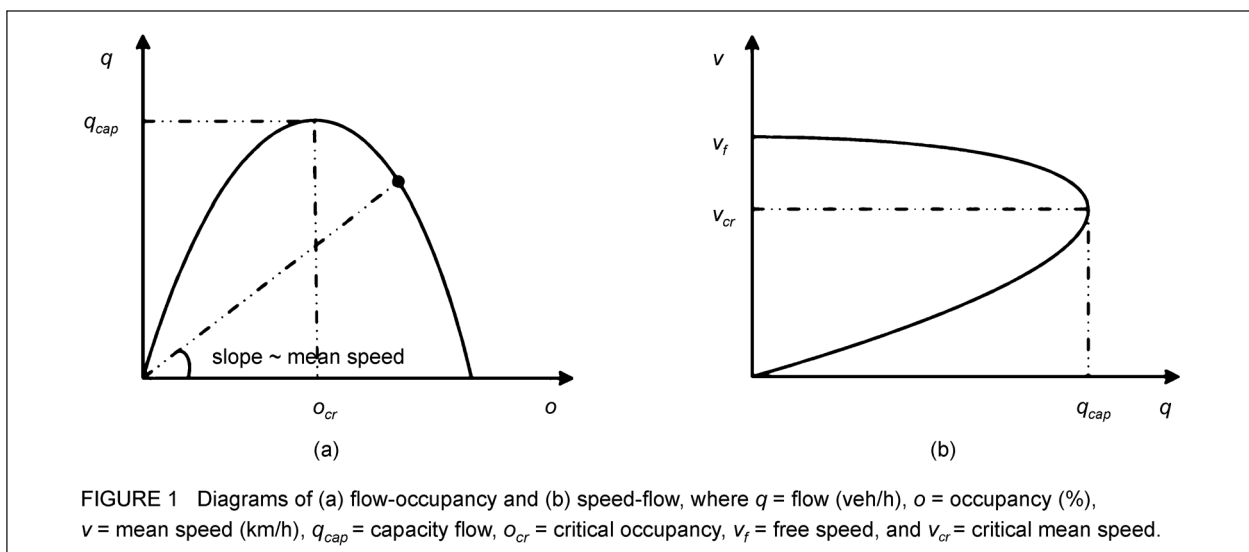


Bild 2-2: Verkehrsflussdiagramm (Verkehrsstärke-Belegungsgrad) (a) Fundamentaldiagramm (Geschwindigkeit-Verkehrsstärke) (b), [Pap06]

Die betrachteten Geschwindigkeitsschaltungen von 40 mph (~60 km/h), 50 mph (~80 km/h) und 60 mph (~100 km/h) hatten unterschiedlich große Effekte auf den Verkehrsfluss. Eine Schaltung von 50 mph konnte zu einem verbesserten Verkehrsfluss beitragen. Eine Schaltung von 60 mph hatte nur einen moderaten Effekt, wohingegen 40 mph bei einem hohen Belegungsgrad insbesondere eine Steigerung der Verkehrssicherheit bewirkte.

MOUZON et al., 2008

[Mou08] untersucht in der Studie einen Sicherheits- bzw. Risikoindikator, mit dem sich das Risiko von Auffahrunfällen beschreiben und sich diese sogar vorhersagen lassen. Gebildet wird das sogenannte Compensated Platoon Braking Time Risk (CPBTR), das gegenüber der TTC und der PBTR gewisse Vorteile aufweist.

Das PBTR berücksichtigt gegenüber der TTC den Fahrbahnzustand infolge von Witterungsbedingungen, die Zeitlücke, die Geschwindigkeit sowie einen Faktor zur Bestimmung sicherer und unsicherer Situationen. Bei vielen Fahrzeugen, die dicht und mit riskanten Abständen hintereinander herfahren, kann es jedoch vorkommen, dass der Wert PBTR schnell ansteigt, um dann zurück auf null zu fallen, sobald ein Fahrzeug mit einem sicheren Abstand folgt.

Um solch starke Schwankungen zu vermeiden, wurde von [Mou08] das CPBTR entwickelt. Hierbei nimmt das mit einem sicheren Abstand folgende Fahrzeug insofern Einfluss, in dem es das riskante Verhalten der vorausfahrenden Fahrzeuge der Kolonne bis zu einem gewissen Maße ausgleicht.

Getestet wurde diese Kenngröße anhand von Unfalldaten (2002 bis 2005) und einer Untersuchungsstrecke im Kanton Waadt (Schweiz).

Gezeigt wurde, dass sich die CPBTR ca. 30 min vor einem Auffahrunfall veränderte. Daraus wurde abgeleitet, dass die Kenngröße in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke (5-Minuten-Intervalle) dazu genutzt werden kann, um solche Unfälle vorherzusagen.

GUATTARI et al., 2009

In dem Paper wurde der Einfluss von verschiedenen VMS (Variable Message Sign) auf das Fahrverhalten untersucht. Dabei wurden das seitliche Posi-

tionsverhalten des Fahrzeuges zur Straßenachse, das Geschwindigkeitsverhalten und die Stellung des Gaspedals anhand einer Fahrstudie mit 21 Probanden untersucht. Die Studie fand am Virtual Reality Laboratory of Inter Universities Research Centre for Road Safety (CRISS) an der Universität Rom statt.

Die eingesetzten Verkehrszeichen wurden anfangs abhängig von ihrer Komplexität kategorisiert. Diese war von der Anzahl der dargestellten Piktogramme und Textzeilen abhängig. Die Bewertung erfolgte auf einer Skala von 1 bis 4, wobei der Wert 1 einem Piktogramm und einer Textzeile und der Wert 4 zwei Piktogrammen und drei Textzeilen entsprach. Angezeigt wurden Stauwarnungen, ggf. in Kombination mit der zu erwartenden Staulänge, Baustellenwarnungen mit unterschiedlichen Warnungen sowie das Zeichen „Unfallgefahr“.

Die fahrdynamischen Daten wurden jeweils 400 m vor und 100 m nach den Anzeigenquerschnitten erfasst. Eine nennenswerte Positionsänderung des Fahrzeuges auf den Fahrstreifen und die Straßenachse bezogen konnte nicht festgestellt werden. Das Geschwindigkeitsverhalten veränderte sich in Abhängigkeit von der Komplexität der WVZ. Bei schwer verständlichen Schaltbildern, wie beispielsweise einer Stauwarnung mit Längenangaben, konnte eine Differenzgeschwindigkeit von 6,9 km/h bis 11,2 km/h zwischen dem Mit-Fall und Ohne-Fall gezeigt werden.

Schaltbilder, die gut verständlich waren, wie beispielsweise eine Baustellenwarnung, wurden schnell erkannt, sodass sich die Ablenkung durch das Schaltbild nicht signifikant negativ auf die gefahrene Geschwindigkeit auswirkte. Die Geschwindigkeitsdifferenz betrug hier zwischen 3,6 km/h und 5,4 km/h.

Bei den Ergebnissen ist jedoch zu berücksichtigen, dass sich die eingesetzten WVZ nicht ohne weiteres auf den deutschen Raum übertragen lassen. Es kann aber festgehalten werden, dass die Wirkung von WVZ abhängig von der Komplexität der Verkehrszeichen ist.

NISSAN et al., 2011

[Nis11] untersuchte, ob sich der Verkehrsfluss und die Verkehrssicherheit verbessern, wenn die Geschwindigkeitsanzeigen verbindlich anstelle einer Empfehlung sind.

Dazu wurde an der E4 in Stockholm, einer dreistreifigen Teststrecke, ein Vergleich zwischen dem Abschnitt ohne SBA und mit SBA gezogen und in 5-Minuten-Intervallen die mittlere Geschwindigkeit sowie die Verkehrsstärke erhoben.

Die Ergebnisse zeigten keinen Einfluss der SBA auf das Fundamentaldiagramm. Dabei ist jedoch nochmal zu erwähnen, dass es sich bei den Schaltbildern um Empfehlungen und nicht wie in den meisten anderen Studien um verbindliche Schaltbilder handelt.

FALLAH ZAVAREH et al., 2016

Das Ziel der Studie von [Fal16] war die Untersuchung der Auswirkungen von Schaltbildern, die das Risiko-Level eines Auffahrunfalls anzeigen, auf das Fahrverhalten und der damit verbundenen subjektiven Wahrnehmung des Risikos des Fahrers.

Die Daten für die Analyse beinhalten ca. 40.000 Fahrzeuge, die über Induktionsschleifen in einer Fahrtrichtung über zwei Tage erfasst wurden. Die Daten wurden auf einem dreistreifigen Teilstück (ohne Einflüsse von Ein- und Ausfahrten, Geschwindigkeitsanzeigen und Geschwindigkeitsüberwachung) des Tehran-Saveh freeway (Iran) erhoben. Diese wurden dann einem Datenset eines Referenzfalls (ohne Beeinflussung) gegenübergestellt. Das Datenset des Referenzfalls wurde an zwei weiteren Tagen an demselben Ort erfasst.

Die Studie von [Fal16] betrachtet den Spezialfall, dass zusätzliche Textanzeigen das Risiko-Level anzeigen, um das Abstandsverhalten zu beeinflussen. Die Schaltbilder an sich lassen sich nur schwer auf den deutschen Raum übertragen, die Kenngrößen zur Beschreibung der Risikobereitschaft können jedoch zur Wirkungsermittlung herangezogen werden.

Abhängig von der Fahrzeuggeschwindigkeit, der Auffahrzeit (TTC) und einer Sicherheitsmarge wurden über die WVZ unterschiedliche Risiko-Level angezeigt. Die Daten wurden in 5-Minuten-Intervallen erfasst. Um Rückschlüsse auf das Fahrverhalten zu ziehen, wurde eine no-effect-Schaltung der Risiko-Schaltung (Low, Medium, High) gegenübergestellt.

Das Risiko-Level (low, medium, high) wurde mittels des Rear-end collision index (RCRI) beschrieben, der in [Fal16] genauer beschrieben wird.

Die Änderung des Fahrverhaltens wurde mittels Risiko-Wahrnehmungs-Indikatoren beschrieben.

In die Sicherheitsmarge fließt der relative Abstand zweier aufeinanderfolgender Fahrzeuge, die Reaktionszeit des Fahrers und des Fahrzeuges ein.

Die Ergebnisse zeigten, dass nachts bei den low- und -medium-Schaltungen eine riskantere Fahrweise gewählt wurde, die sich in einer höheren Geschwindigkeit gegenüber dem Referenzfall ausdrückte. Bei der Schaltung „high“ konnte ein Rückgang der mittleren Geschwindigkeit nachgewiesen werden.

2.4.4 Zusammenfassung

Die Wirkung von Streckenbeeinflussungsanlagen ist ein viel diskutiertes Thema in der aktuellen Literatur, wobei es unterschiedliche Auffassung über die beschreibenden Kenngrößen gibt und längst nicht alle Wirkungspotenziale einer SBA erfasst bzw. ausreichend untersucht wurden. Das Ziel der Literaturanalyse war, die derzeit existierenden bzw. beschreibenden Kenngrößen der Wirkung zu sammeln und entsprechende Lücken zu identifizieren.

Die Wirkung wird durch die Änderung des Fahrverhaltens der Verkehrsteilnehmer beschrieben, welches durch den Einsatz von Wechselverkehrszeichen und den darauf angezeigten Schaltbildern beeinflusst werden kann.

Eine besondere Herausforderung der Wirkungsermittlung stellt die trennscharfe Differenzierung der Wirkungen, die tatsächlich durch die Schaltbilder erreicht werden und der Wirkungen, die auf äußere (zufällige) Einflüsse, wie beispielsweise Witterungseinflüsse oder infrastrukturelle Besonderheiten, zurückzuführen sind.

Die Wirkung von SBA kann einerseits durch makroskopische Kenngrößen, wie die Kapazität, die Verkehrsstärke, die Verkehrsdichte oder die mittleren Geschwindigkeiten, beschrieben werden, wobei diese keine Aussagen über einzelne Fahrzeuge treffen können. Andererseits können mikroskopische Kenngrößen wie Abstandsverhalten, Fahrstreifenwechselverhalten etc. die Wirkung auf Basis von Einzelfahrzeugdaten beschreiben.

Mikroskopische Kenngrößen zur Beschreibung der Wirkung von SBA untersuchte [Kap10] in Hinblick auf die Bewertung eines harmonischen Verkehrsablaufes. Dabei wurde auf Kenngrößen aus unter-

schiedlicher Literatur wie [Ste03] oder [Pis03] zurückgegriffen. Die gesammelten Kenngrößen zur Beschreibung der Verkehrsharmonisierung wurden in Tabelle 2-3 zusammengefasst.

Während [Kap10] und [Ste03] die Auffahrzeit (TTC), die lediglich die Geschwindigkeitsdifferenz und das Abstandsverhalten zweier aufeinanderfolgender

Fahrzeuge definiert, dazu nutzen, die Risikobereitschaft des Verkehrsteilnehmers zu beschreiben, greift [Fal16] diese auf und kombiniert sie mit einem zusätzlichen Sicherheitsindex (Safety Margin).

Die Wirkung der verschiedenen Schaltbilder wurde nur für Geschwindigkeitsbeschränkung in Kombination mit einem Lkw-Überholverbot im deutschen

	Art	Eigenschaft/Kenngröße	Autor	Forschungserkenntnisse
Mikroskopisch	quer	Fahrstreifenaufteilung	[Pis03] [Kap10]	<ul style="list-style-type: none"> • Es konnte insbesondere auf dem linken und mittleren Fahrstreifen bei hohen Verkehrsstärken (> 40 Kfz/min) eine gleichmäßigere Verteilung nachgewiesen werden. • Es konnte gezeigt werden, dass sich der Verkehr mit zunehmender Belastung auf den dritten Fahrstreifen verlagert (bis zu 50 %).
		Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen Fahrstreifen	[Pis03]	<ul style="list-style-type: none"> • Es konnte aufgezeigt werden, dass die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen dem linken und rechten Fahrstreifen (dreistreifiger Querschnitt) bei einer Anzeige von 60 km/h (Fall mit SBA) im Vergleich zu keiner Anzeige (Fall ohne SBA) deutlich niedriger ist. Es findet also eine Angleichung der Geschwindigkeiten statt.
		Fahrstreifenwechselverhalten (Anzahl)		
	längs (Fahrstreifen)	Standardabweichung der Geschwindigkeiten	[Ste02]/ [Ste03]	<ul style="list-style-type: none"> • Das Harmonisierungsmaß konnte im Falle einer präventiven Schaltung im Mittel um 4 km/h verringert werden. Dies galt insbesondere für Geschwindigkeiten im Bereich von 90 km/h und 120 km/h auf dem mittleren und rechten Fahrstreifen sowie für Geschwindigkeiten zwischen 100 km/h und 130 km/h auf dem linken Fahrstreifen.
		Varianzen der Geschwindigkeiten	[Kol06] [Rie15]	<ul style="list-style-type: none"> • Geschwindigkeitsverringern infolge Schaltung zwischen ~5 km/h und ~10 km/h (Studie kaum statistisch signifikant und betrachtet den Fall von Nebeinflüssen). • Rückgang der Geschwindigkeitsunterschiede zwischen 35 % und 45 %.
		Abstandsverhalten (Weglücke; Zeitlücke; Time-To-Collision)	[Ste02]/ [Ste03]	<ul style="list-style-type: none"> • Es konnte eine Verbesserung von gefährlichen Zeitlücken und Auffahrzeiten nachgewiesen werden. • Der Anteil kleiner Zeitlücken (≤ 1 Sek.) ging um 20 % bis 40 % zurück, wenn die mittlere Geschwindigkeit bei 100 km/h liegt. • Der Anteil kleiner gefährlicher Zeitlücken ($\leq 0,5$ Sek.) ging um 1 % bis 2 % zurück. • Die Auffahrzeit (TTC) wurde als kritisch erachtet, wenn die Werte kleiner als 10 Sek. waren. Bei einer Schaltung von 120 km/h und Lkw-Überholverbot ging der Anteil kritischer Zeitlücken um 1 % zurück.
		Geschwindigkeitsdifferenzen aufeinanderfolgender Fahrzeuge		<ul style="list-style-type: none"> • Die Geschwindigkeitsdifferenzen aufeinanderfolgender Fahrzeuge sind in der Literatur Bestandteil bei der Ermittlung des Abstandsverhaltens. Eine eigenständige Aufschlüsselung der Kenngröße erfolgt nicht.
		(Compensated) Individual Braking Time Risk, (Compensated) Platoon Braking Time Risk,	[Mag10], [Mou08]	<ul style="list-style-type: none"> • Es konnte gezeigt werden, dass sich die PBTR/CPBTR sowie die IBTR/CPBTR gut dazu eignen, die Verkehrssicherheit zu bewerten. Der Einfluss von SBA auf die genannten Kenngrößen wurde bisher noch nicht ausreichend untersucht.
		Verkehrsstärke aufeinanderfolgender Zeitintervalle (Zufluss)	[Pap06]	<ul style="list-style-type: none"> • Durch eine Geschwindigkeitsbeschränkung konnte eine Reduzierung der Verkehrsstärke bei gleichbleibenden Belegungsgrad festgestellt werden.
	dynamisch	Geschwindigkeitsdifferenz aufeinanderfolgender Zeitintervalle	[Kap10]	<ul style="list-style-type: none"> • Es konnte keine signifikante Veränderung der Differenzgeschwindigkeiten aufeinanderfolgender Minutenintervalle zwischen einem beeinflussten und unbeeinflussten Querschnitt festgestellt werden. Lediglich auf dem zweiten Fahrstreifen eines dreistreifigen Querschnittes konnte an einem unbeeinflussten Querschnitt ein geringerer Anteil an Differenzgeschwindigkeiten zwischen -20 bis -15 km/h und 15 bis 20 km/h, im Vergleich zu den anderen Fahrstreifen festgestellt werden.
	räumlich	Veränderung diverser Größen über verschiedene Querschnitte	[Ste03] [Pis03]	<ul style="list-style-type: none"> • Eine allgemeine Verringerung des Geschwindigkeitsniveaus betrug ca. 2 km/h auf eine Verringerung der zulässigen Geschwindigkeit von 10 km/h • Mit zunehmender Länge der Anlage ergab sich eine gleichmäßigere Auslastung des mittleren und linken Fahrstreifens erst bei höheren Verkehrsstärken
	Makroskopisch	aggregiert	Kapazität	[Sch03] [Rie15]
Geschwindigkeitsniveau/mittlere Geschwindigkeit (Stabilisierung des Verkehrsablaufs)			[Pis03]	<ul style="list-style-type: none"> • Das Geschwindigkeitsniveau stieg insbesondere im Bereich von 35 und 65 Kfz/min deutlich an. Durchschnittlich konnte das Geschwindigkeitsniveau um 10 bis 15 km/h angehoben werden.

Tab. 2-3: Kenngrößen zur Beschreibung der Wirkung von SBA

Raum im Zusammenhang mit der auftretenden Geschwindigkeitsdifferenz oder der Fahrstreifenaufteilung untersucht. [Gua09] hingegen wies unterschiedlichen WVZ verschiedene Kategorien abhängig von der Komplexität der Schilder zu und untersuchte daraufhin die auftretenden Geschwindigkeitsdifferenzen. Die von [Gua09] durchgeführte Studie bezog sich jedoch auf in Italien verwendete Schaltbilder und lässt sich nicht ohne weiteres auf den deutschen Raum übertragen. Sie bietet jedoch gute Ansätze, um eine solche Wirkung mithilfe eines Fahrsimulators in Deutschland zu ermitteln.

Die Definition des Befolungsgrades ist nach der Literaturrecherche noch nicht eindeutig geklärt. [Rie15] definiert den Befolungsgrad als den Anteil der Fahrzeuge, die die angezeigte Geschwindigkeit zuzüglich 20 km/h unterschreiten. [Ste03] greift in ihrer Studie auf die gefahrene mittlere Geschwindigkeit zurück und definiert verschiedene Bedingungen, die den bei einer Schaltung vorherrschenden Kontext berücksichtigen. Aus den untersuchten Studien lässt sich ableiten, dass eine Definition des Befolungsgrades aufgrund der Komplexität der jeweiligen Fragestellungen meist projekt- bzw. kontextbezogen erfolgte.

Die vorliegende Literatur beschreibt die Wirkung einer SBA größtenteils mittels einer Änderung der Geschwindigkeiten und Fahrstreifenaufteilung [Pis03]. Lediglich [Ste03] und [Kap10] bilden mikroskopische Kenngrößen, mit denen sich die Wirkung auf Einzelfahrzeuge beschreiben lässt. Eine Definition maßgeblicher Kenngrößen zur Beschreibung der Wirkung erfolgt in Kapitel 3.3.

Bereits durchgeführte Fahrsimulatorstudien – insbesondere aus internationalen Untersuchungen – bieten zusätzliche Informationen zur Wirkung von Verkehrsmanagementmaßnahmen auf das Fahrverhalten, die Ergebnisse sind aber nicht auf den deutschen Raum übertragbar. Da zusätzlich die Anzahl der Probanden in den zitierten Studien zu klein ist, um statistisch repräsentative Ergebnisse zu erlangen, können die Ergebnisse nicht für die Kalibrierung des Simulationsmodells verwendet werden. Eine Durchführung eigener Fahrsimulatorstudien im Rahmen dieses Projekts ist allerdings nicht vorgesehen.

Die gesammelten Kenngrößen aus der Literatur wurden in Tabelle 2-3 beschrieben. Dabei fällt auf, dass nach wie vor Lücken, wie beispielsweise die Anzahl der Fahrstreifenwechsel oder die Geschwin-

digkeitsdifferenzen aufeinanderfolgender Fahrzeuge, bei der Beschreibung der Wirkung von SBA existieren. Die Beschreibung der Auswirkung von SBA auf die Verkehrssicherheit unter Berücksichtigung der CIBTR/CPBTR konnte bisher noch nicht nachgewiesen werden.

In vielen Untersuchungen wurden lediglich kurze Zeiträume analysiert. Teils ist dies dem Aufwand der Datenerhebung geschuldet (z. B. wenn Einzelfahrzeugdaten gesondert in der Streckenstation abgegriffen werden mussten oder Versuchsfahrten stattfanden). Durch Zeiträume mit eingeschränkter Datenqualität, aber auch durch andere Störeinflüsse (Witterung, Vollsperrungen) kann die Menge der nutzbaren Daten noch weiter eingeschränkt werden. Gleichzeitig ist eine Differenzierung des Verhaltens nach Schaltbildern notwendig, die zum Teil nur kurzzeitig anstehen bzw. während des Betrachtungszeitraums wechseln. Daher wird in diesem Projekt eine vergleichsweise große Datenbasis zugrunde gelegt. Dies schränkt jedoch die Möglichkeiten der manuellen Auswertung und Interpretation von Ergebnissen ein, sodass hier eine Automatisierung – insbesondere im Hinblick auf den Prozess der Kalibrierung und Validierung der Verkehrsflusssimulation – erfolgen muss.

3 Festlegung der verkehrlichen Szenarien

Zur Festlegung der verkehrlichen Szenarien wurden zunächst die zur Verfügung stehenden Referenzstrecken analysiert und hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile für die weitere Projektbearbeitung bewertet. Darauf aufbauend wurde gemeinsam mit dem Auftraggeber die Auswahl der Strecken für die weitere Untersuchung getroffen. Die Auswahl der Referenzstrecken hat eine wesentliche Bedeutung für die Belastbarkeit und Übertragbarkeit der Ergebnisse. Wichtige Auswahlkriterien sind

- die Art und Granularität der verfügbaren Daten (Einzelfahrzeugdaten, aggregierte Daten),
- die Repräsentativität des Streckenabschnitts (spezielle regionale Verhältnisse oder allgemein vergleichbare Verhältnisse),
- die Art und Anzahl auftretender Verkehrssituationen mit dem Schwerpunkt auf wiederkehrende Überlastungen (Adressierung von Harmonisie-

rungs- bzw. Lkw-Überholverbots- und Stauabsicherungs-Maßnahmen),

- die Länge der Strecke und
- die zeitliche Datenverfügbarkeit (Aktualität).

Darauf aufbauend wurden die Daten der beiden ausgewählten Referenzstrecken detailliert aufbereitet, sodass für die Kalibrierung und Validierung des Simulationsmodells eine ausreichende Anzahl von Verkehrsszenarien zur Verfügung stehen, die alle relevanten Situationen abdecken und hinsichtlich der Verkehrszusammensetzung repräsentativ sind.

Weiterhin erfolgte die Definition von Kenngrößen zur Bewertung des Verkehrsablaufs sowie der Ermittlung der Wirkung von SBA-Maßnahmen auf den Verkehrsablauf. Dabei wurden nicht nur klassische Kenngrößen, die auf makroskopischen Daten basieren, betrachtet, sondern im Vorgriff auf den zu untersuchenden Aspekt der zunehmenden Fahrzeugautomatisierung auch Kenngrößen, die einzelne Fahrzeugmanöver bewerten (mikroskopische Kenngrößen). Die so definierten Kenngrößen dienen im weiteren Projektverlauf der Kalibrierung des Simulationsmodells sowie der Bewertung der simulierten Szenarien hinsichtlich der Wirkung von SBA-Maßnahmen.

Zudem wurden die SBA-Maßnahmen präzisiert, die als Reaktion auf die definierten Situationen eingesetzt werden sollen (Harmonisierungs- und Stauwarn-Programme nach MARZ, der Einsatz von Lkw-Überholverböten, baustellenbedingte Schaltungen.)

Abschließend wurde ein realistisches Verhaltensmodell des Verkehrs ohne automatisierte Fahrzeuge (Status quo) aufgestellt. Dies erfolgte auf Grundlage der zur Verfügung stehenden Daten der Referenzstrecken.

Die hier zusammengestellten Grundlagen bieten die Basis für die Aufstellung des Simulationsmodells für den Status quo.

3.1 Analyse und Bewertung der Referenzstrecken

Für das Projekt standen aufgrund der breiten Unterstützung durch die Betreiber Straßen.NRW, Autobahndirektion Südbayern und Bundesamt für Straßen ASTRA verschiedene Referenzstrecken zur Untersuchung mittels mikroskopischer Verkehrsflusssimulation zur Auswahl. Um die Belastbarkeit

und Übertragbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten und ein möglichst breites Spektrum von verkehrlichen Szenarien und infrastrukturellen Spezifika abzudecken, sind im vorliegenden Projekt zwei Strecken zu analysieren. Die Auswahl der zwei Referenzstrecken erfolgte in Absprache mit den Projektbetreuern der BAST. Grundsätzlich sollen die Strecken die folgenden Anforderungen erfüllen:

- Vorhandene SBA,
- mehrere Anschlussstellen zwischen zwei Autobahnkreuzen bzw. -dreiecken,
- Mindestlänge 10 km,
- ausreichend vorhandene Schalt- und Verkehrsdaten und
- wiederkehrende Störungen in einem hinreichenden Ausmaß.

Tabelle 3-1 gibt einen kurzen Überblick über die für die Analyse vorausgewählten Streckenabschnitte, welche in den folgenden Unterkapiteln dann detailliert beschrieben werden. Weiterhin werden die Bewertung der Strecken und die sich daraus ergebende Entscheidung für zwei Referenzstrecken erläutert. Zur Auswahl standen zwei Strecken in der Schweiz (N1 und N6) und 4 Strecken in Deutschland (A4, A8 Ost, A57 und A92).

Strecke	Länge AS	Datenlage	SBA
N1 Oftringen Niederbipp	20 km 4 AS	Schaltdaten Umfelddaten MQ-Daten inkl. Einzelfzg.	nicht konform zur MARZ '99
N6 Bern-Ostring Thun-Nord	23 km 4 AS	Schaltdaten Umfelddaten MQ-Daten inkl. Einzelfzg.	nicht konform zur MARZ '99
A4 Aachen Kerpen	38 km 7 AS	Schaltdaten Umfelddaten MQ-Daten inkl. Einzelfzg. für ausgewählte MQ	MARZ '99 konform
A8 Ost Holzkirchen Bad Aibling	24 km 2 AS	Schaltdaten Umfelddaten MQ-Daten	MARZ '99 konform
A57 Kaarst Moers	23 km 6 AS	Schaltdaten Umfelddaten MQ-Daten inkl. Einzelfzg. für ausgewählte MQ	MARZ '99 konform
A92 Neufahrn Freising-Ost	13 km 4 AS	Schaltdaten Umfelddaten MQ-Daten (inkl. Einzelfzg.)	MARZ '99 konform

Tab. 3-1: Referenzstrecken – Überblick

3.1.1 Referenzstrecken – Vorauswahl

3.1.1.1 N1 vom Anschluss Oftringen bis zum Anschluss Niederbipp

Der ausgewählte Streckenabschnitt auf der N1 liegt in der Schweiz ca. 50 km westlich von Zürich. Der Abschnitt von rund 20 Streckenkilometern ist in beiden Fahrrichtungen mit je 15 Anzeigequerschnitten einer Streckenbeeinflussungsanlage ausgestattet.

Zwischen den Anschlüssen Oftringen und Niederbipp liegen 4 Anschlussstellen, 3 davon sind Autobahndreiecke. Die Strecke ist etwa zu gleichen Teilen zweistreifig und dreistreifig ausgebaut (2 Fahrstreifen zwischen Niederbipp und AD Härkingen, 3 Fahrstreifen zwischen AD Härkingen und AD Wiggertal).

Auf dem Streckenabschnitt treten regelmäßig überlastungsbedingte Störungen im Verkehrsablauf auf. Die N1 fungiert als Transitstrecke, sodass ein vergleichsweise hoher Lkw-Anteil zu verzeichnen ist. Die Störungen treten aufgrund des hohen Lkw-Anteils einerseits an einem kurzen Steigungsabschnitt auf, andererseits sind die Verflechtungen an den beiden (national bedeutsamen) Autobahndreiecken hoch belastet und führen zu regelmäßigen Zusammenbrüchen des Verkehrsablaufs. Es liegen synchrone Verkehrsbelastungen vor. Der Streckenabschnitt befindet sich innerhalb einer industri- und logistikaffinen Region. Zudem kreuzen zwei nationale Routen den betrachteten Streckenabschnitt



Bild 3-1: Streckenabschnitt N1 (Quelle: © OpenStreetMap und Mitwirkende (CC-BY-SA))

(internationaler Nord-Süd-Transit und nationaler/internationaler Ost-West-Transit).

Für die Untersuchung stehen die folgenden Daten von drei Monaten zur Verfügung:

- Lokale Online-Verkehrsdaterhebungen (Einzelfahrzeugdaten) (Anzahl MQ: ca. 5 pro Richtung, www.vde.admin.ch)
- Lokale Einzelfahrzeugdaten der SBA (Anzahl MQ: ca. 12 pro Richtung, Aggregation: 1 min oder 30 s)
- Schaltdaten der SBA

3.1.1.2 N6 vom Anschluss Bern-Ostring (Zufahrt Bern-Zentrum) bis zum Anschluss Thun-Nord (Zubringer Thun-Zentrum)

Der Streckenabschnitt auf der N6 fungiert als Radiale zum Kern der Agglomeration Bern und hat eine Länge von ca. 23 Kilometern. Auf dem Streckenabschnitt befinden sich vier Anschlussstellen zusätzlich zu den Ein- und Ausfahrten am Anfang und Ende der Strecke.

Die Strecke ist im Wesentlichen zweistreifig ausgebaut, bei einigen Anschlussstellen ist die Hauptfahrbahn auf drei Fahrstreifen erweitert.

Der Streckenabschnitt weist in der Woche ausgeprägte Pendlerverkehre und am Wochenende hohe Freizeitverkehre auf. Internationaler Transitverkehr ist auf diesem Streckenabschnitt kaum zu beobachten.

Auf dem Streckenabschnitt kommt es zu regelmäßigen überlastungsbedingten Störungen im Verkehrsablauf. Im Falle von Störungen stehen keine attraktiven Alternativrouten zur Verfügung.

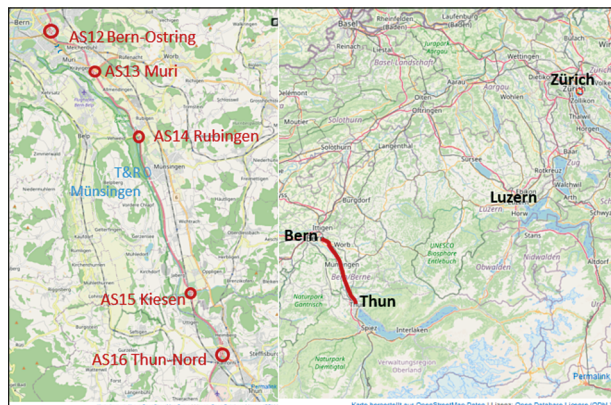


Bild 3-2: Streckenabschnitt N6 (Quelle: © OpenStreetMap und Mitwirkende (CC-BY-SA))

Für die Analyse können Daten von drei Monaten bereitgestellt werden:

- Lokale Online-Verkehrdatenerhebungen (Einzelfahrzeugdaten) (Anzahl MQ: ca. 4 pro Richtung, www.vde.admin.ch)
- Lokale Verkehrsdatenerfassungen der SBA (Anzahl MQ: ca. 15 pro Richtung, Aggregation: 1 min oder 15 s)
- Schaltdaten der SBA (Anzahl AQ: ca. 15 pro Richtung)

3.1.1.3 A4 von AK Aachen bis AK Kerpen

Der Streckenabschnitt der A4 ist 38 km lang und verfügt über sieben Anschlussstellen. Der Streckenabschnitt ist durchgängig dreistreifig ausgebaut.

Auf dem Streckenabschnitt kommt es zu regelmäßigen überlastungsbedingten Störungen im Verkehrsablauf. Diese treten zumeist aufgrund des hohen Lkw-Anteils auf.

Für die Analyse werden Daten von zwei Jahren bereitgestellt:

- Lokale Verkehrsdaten Minutenintervalle (Anzahl MQ: 25 in FR Kerpen und 23 in FR Aachen)
- Schaltdaten der SBA (Anzahl AQ: 19 in FR Kerpen und 18 in FR Aachen)
- Wetter- und Umfelddaten (12 Wetterstationen in FR Kerpen und 14 Wetterstationen in FR Aachen)

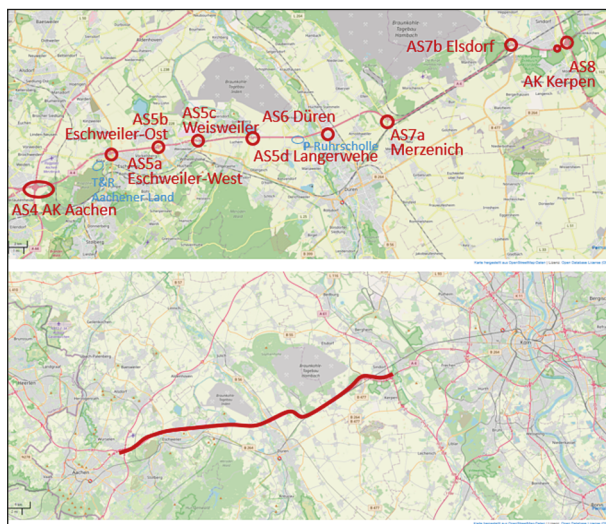


Bild 3-3: Streckenabschnitt A4 (Quelle: © OpenStreetMap und Mitwirkende (CC-BY-SA))

3.1.1.4 A8 Ost von AS Holzkirchen bis AS Bad Aibling

Der Streckenabschnitt der A8 südöstlich von München ist 24 km lang, umfasst vier Anschlussstellen und ist dreistreifig ausgebaut.

Auf dem Streckenabschnitt kommt es zu regelmäßigen überlastungsbedingten Störungen im Verkehrsablauf, insbesondere im Ferienreiseverkehr. Aufgrund der Topologie treten bei dichtem Verkehr häufig Geschwindigkeitseinbrüche und Stauwellen in Steigungsbereichen auf.

Die Strecke ist als wichtige Transitstrecke sowohl in Ost-West- als auch in Nord-Süd-Richtung nicht zuletzt auch stark durch Schwerlastverkehr belastet.

Es stehen Daten von zwei Jahren zur Verfügung:

- Lokale Verkehrsdaten Minutenintervalle (33 MQ auf Hauptfahrbahn, 3 auf Ein- und Ausfahrrampen)
- Schaltdaten der SBA (26 AQ)
- Wetter- und Umfelddaten (14 Messgeräte zur Erfassung mindestens der Niederschlagsintensität und -art; 13 Sichtweitemessgeräte)

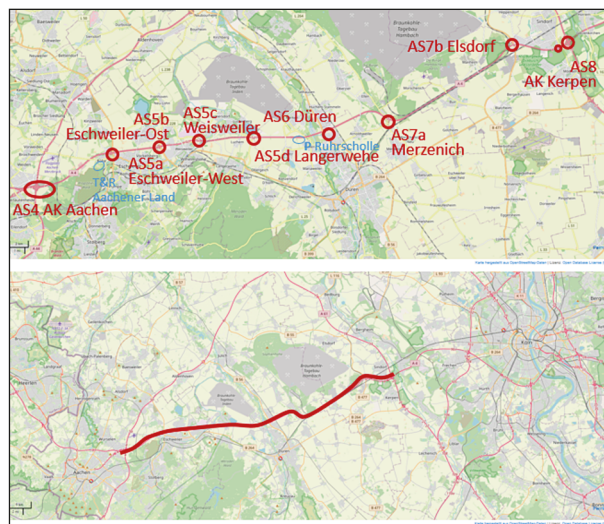


Bild 3-4: Streckenabschnitt A8-Ost (Quelle: © OpenStreetMap und Mitwirkende (CC-BY-SA))

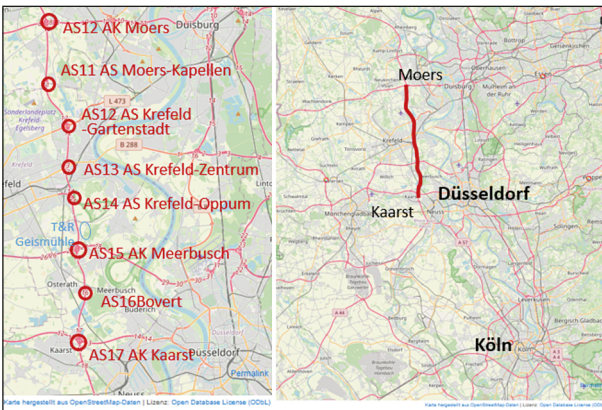


Bild 3-5: Streckenabschnitt A57 (Quelle: © OpenStreetMap und Mitwirkende (CC-BY-SA))

3.1.1.5 A57 von (AK Moers – AK Kaarst)

Der Streckenabschnitt der A57 zwischen dem AK Kaarst und dem AK Moers hat auf einer Länge von 23 km sechs Knotenpunkte, davon ist eine das AK Meerbusch.

Zwischen dem AK Kaarst und dem AK Meerbusch ist der Abschnitt dreistreifig und nördlich des AK Meerbusch zweistreifig ausgebaut.

Auf dem Streckenabschnitt kommt es zu regelmäßigen überlastungsbedingten Störungen im Verkehrsablauf. Diese treten insbesondere aufgrund der hohen Pendlerströme in den Ballungsräumen Düsseldorf und Krefeld auf. Im Bereich der Anschlussstellen und auch an der TR Geismühle kommt es aufgrund der Verflechtungsvorgänge des ein- und ausfahrenden Verkehrs zu Störungen und Verkehrszusammenbrüchen im zweistreifigen Bereich.

Es werden Daten von einem Jahr bereitgestellt:

- Lokale Verkehrsdaten Minutenintervalle (Anzahl MQ: 17 in FR Kaarst und 18 in FR Moers auf der Hauptfahrbahn)
- Schaltdaten der SBA (Anzahl AQ: 15 in FR Kaarst und 16 in FR Moers)
- Wetter- und Umfelddaten

3.1.1.6 A92 von AK Neufahrn (A9) bis AS Freising Ost

Der Abschnitt der A92 zwischen dem AK Neufahrn und der AS Freising Ost hat eine Länge von 13 km und vier zwischenliegende Anschlussstellen.

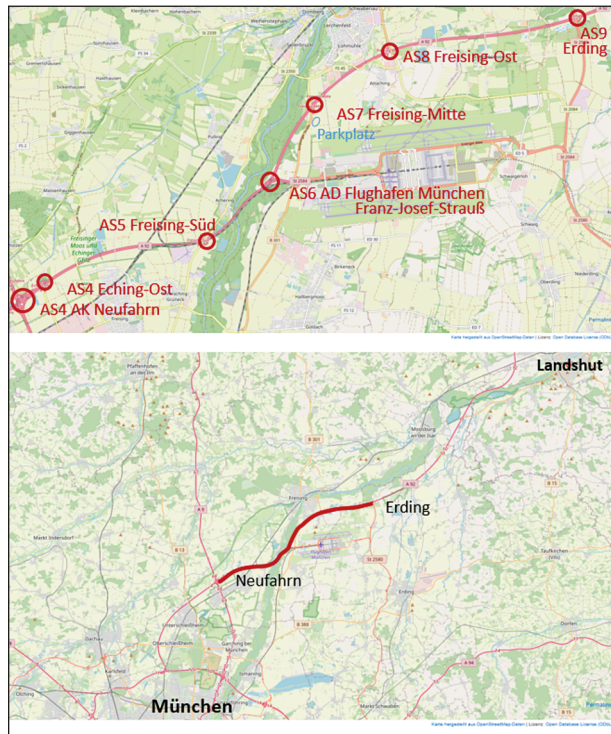


Bild 3-6: Streckenabschnitt A92 (Quelle: © OpenStreetMap und Mitwirkende (CC-BY-SA))

Der Streckenabschnitt umfasst zwei- und dreistreifig ausgebauten Bereiche.

Auf dem Streckenabschnitt treten regelmäßig überlastungsbedingte Störungen auf, vor allem bedingt durch Ein- und Auspendlerverkehr im Großraum München. Die Störungshäufigkeit ist in Fahrtrichtung München etwas stärker ausgeprägt.

Es werden Daten von zwei Jahren bereitgestellt:

- Lokale Verkehrsdaten Minutenintervalle (24 MQ auf Hauptfahrbahn, 16 in Ein- und Ausfahrrampen)
- Lokale Einzelfahrzeugdaten (11 MQ auf Hauptfahrbahn, 6 in Rampen)
- Schaltdaten der SBA (20 AQ)
- Wetter- und Umfelddaten (4 Glättemeldeanlagen mit Erfassung u. a. der Niederschlagsintensität, -art und Wasserfilmdicke; 9 Sichtweitemessgeräte)

3.1.2 Bewertung der Referenzstrecken

Die Strecken wurden bezüglich der Störungssituation, des verwendeten Steuerungsverfahrens und der verfügbaren Daten bewertet.

3.1.2.1 Störungssituation

Für die Streckenabschnitte der A4, der A8, der A57 und der A92 wurde eine detaillierte Analyse der Störungssituation basierend auf erfassten Stauereignissen durchgeführt.

Für die A8 und die A92 wurden dabei Daten aus dem Jahr 2014 analysiert (bereitgestellt durch die ABDS). Für die A8 wurden je Abschnitt zwischen 90 und 150 Stauereignisse erfasst. Für die A92 liegt die Anzahl der Störungen mit 30 bis 60 insgesamt niedriger, der Abschnitt von der AS Freising Süd zum AK Neufahrn weist aber ebenfalls über 100 Stauereignisse auf.

Für die A4 und die A57 standen Staudaten (bereitgestellt von Straßen.NRW) aus 2017 zur Verfügung. Im Bereich der A4 wurden in den einzelnen Abschnitten weniger als 30 Stauereignisse erfasst. Für die A57 konnten im gleichen Zeitraum in beiden Fahrtrichtungen Abschnitte mit mehr als 400 Stauereignissen identifiziert werden.

3.1.2.2 Datenlage

Die Datengrundlage ist für die Streckenabschnitte der N1, der N6 und der A92 am besten zu bewerten, da für diese Strecken sowohl aggregierte Verkehrsdaten in einer hohen Dichte als auch Einzelfahrzeugdaten für mehrere Messquerschnitte vorliegen.

Für die Streckenabschnitte der A8, der A4 und der A57 sind zunächst nur aggregierte Daten ebenfalls in einer hohen Dichte verfügbar. Für die Streckenabschnitte der A4 und der A57 hat Straßen.NRW die Möglichkeit, an einzelnen Messquerschnitten zusätzlich Einzelfahrzeugdaten über einen Zeitraum von jeweils mehreren Tagen zu erheben.

Schaltdaten der Anlagen und Umfelddaten sind für alle Streckenabschnitte verfügbar.

3.1.2.3 Steuerungsverfahren der SBA

Im Hinblick auf die Anbindung einer MARZ99-konformen Unterzentrale an die mikroskopische Verkehrsflusssimulation bietet sich die Auswahl von Referenzstrecken an, die bereits mit einem MARZ99 Steuerungsverfahren betrieben werden. Die Kalibrierung und Validierung des Modells werden damit vereinfacht und gleichzeitig verbessert, da zwi-

Strecke	N1	N6	A4	A8	A57	A92
Störungssituation	++	++	+	++	+++	++
Datenlage	+++	+++	++	+	++	+++
Steuerungsverfahren	-	-	++	++	++	++

Tab. 3-2: Bewertung der Streckenabschnitte

schen Modell und erfassten Daten keine Abweichungen aufgrund verfahrensbedingt unterschiedlicher Steuerungsentscheidungen zu berücksichtigen sind.

Für die vier Streckenabschnitte in Deutschland werden die VBA mit MARZ99 Steuerungsverfahren betrieben. Für die beiden Streckenabschnitte in der Schweiz werden alternative Steuerungsverfahren genutzt.

3.1.2.4 Fazit

Zur Bewertung der Abschnitte wurde für die einzelnen Kriterien eine qualitative Bewertung vorgenommen, die in Tabelle 3-2 zusammengefasst ist.

Die Übersicht zeigt, dass für die Simulation die Abschnitte der A57 und der A92 aufgrund der Störungssituation, der verfügbaren Daten und der verwendeten Steuerungsverfahren am besten zur detaillierten Untersuchung mittels mikroskopischer Verkehrsflusssimulation geeignet sind.

3.1.3 Auswahl der Referenzstrecken

Es wurden die folgenden Referenzstrecken zur Detailanalyse ausgewählt:

- A57 AK Kaarst bis AK Moers (FR Norden)
- A92 AS Freising Ost bis AK Neufahrn (FR Westen)

Mit den ausgewählten Referenzstrecken werden sowohl zwei- als auch dreistreifige Abschnitte analysiert. Ein ausgeprägter Einfluss der Streckentopologie (wie z. B. auf der A8) ist bewusst nicht beinhaltet, da in diesem Fall die Übertragbarkeit der Ergebnisse nur bedingt gewährleistet wäre.

3.2 Datenanalyse und Vorbereitung als Eingangsgrößen in das Simulationsmodell

3.2.1 Datenanalyse

Für die Datenanalyse der beiden ausgewählten Referenzstrecken standen auf der A92 ca. 4,6 GB Rohdaten für die Jahre 2014 (nur Streckenabschnitt 1) und 2015 sowie auf der A57 ca. 4,7 GB Rohdaten aus dem Jahr 2017 zur Verfügung. Diese Rohdaten umfassen lokale aggregierte fahstreifenbezogene Verkehrsdaten sowie Umfelddaten (Ein-Minuten-Intervalle), Schaltdaten und (für die Datenanalyse zunächst nicht verwendeten) lokale Einzelfahrzeugdaten.

Die Verkehrsdaten wurden zunächst in Tools so aufbereitet, dass sie zu Richtungsquerschnitten zusammengefasst, mit den in Bezug stehenden Schalt- und Umfelddaten der zugehörigen Anzeigequerschnitte und Umfelddatenmessstationen synchronisiert werden und in aussagekräftigen Diagrammen dargestellt werden. Dazu musste zunächst in einem manuellen Prozess eine Konfiguration (Zuordnung der Sensoren und Anzeigequerschnitte) erstellt bzw. aus den vorhandenen Metainformationen über die beiden SBA abgeleitet werden.

Der Datenaufbereitungsprozess dauerte ca. 10 Tage (abhängig von der Rechenleistung der verwendeten Hardware) und erzeugte für die A92 ca. 27,1 GB und für die A57 ca. 36,5 GB aufbereitete Daten.

Die Daten liegen zur weiteren Bearbeitung zunächst in MS Excel-Dateien vor. Diese sind wochenweise abgelegt. Zur besseren Interpretierbarkeit sowie für die weitere Verarbeitung (die Quelle-Ziel-Matrizen werden in 15-Minuten-Intervallen erzeugt, s. Kapitel 3.2.4; die Kalibrierung und Validierung erfolgt anhand von 5 min aggregierten Daten, s. Kapitel 3.2.5) in 1 min, 5 min und 15 min aufbereitet. Zur Visualisierung der Daten werden folgende Diagramme in den unterschiedlichen zeitlichen Auflösungen erzeugt:

- Wochenganglinie (Beispiel s. Bild 3-7)
- QV-Diagramm (Beispiel s. Bild 3-8)
- Tagesganglinie mit Schaltungen (Beispiel s. Bild 3-9)
- Tagesganglinie mit Umfeldzuständen (Beispiel s. Bild 3-10)
- Tagesganglinie der Umfelddaten (Beispiel s. Bild 3-11)
- Fahstreifenaufteilung (Beispiel s. Bild 3-12)

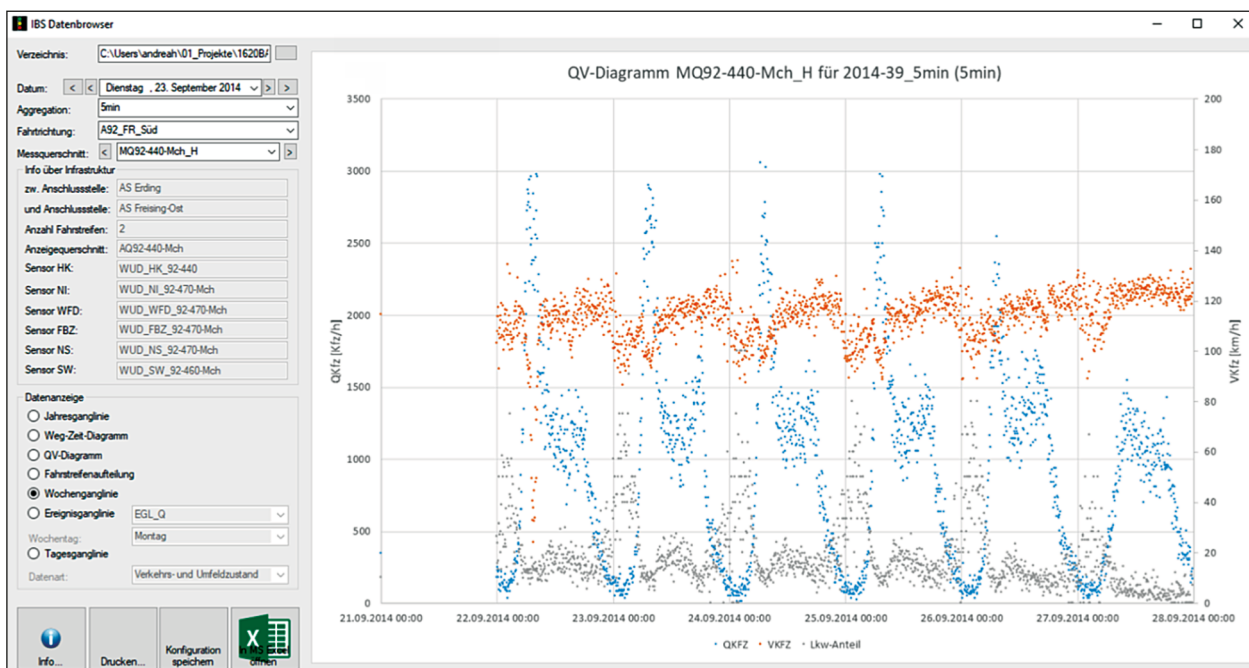


Bild 3-7: Beispielhafte Darstellung einer Wochenganglinie (Auflösung hier: 5 min)

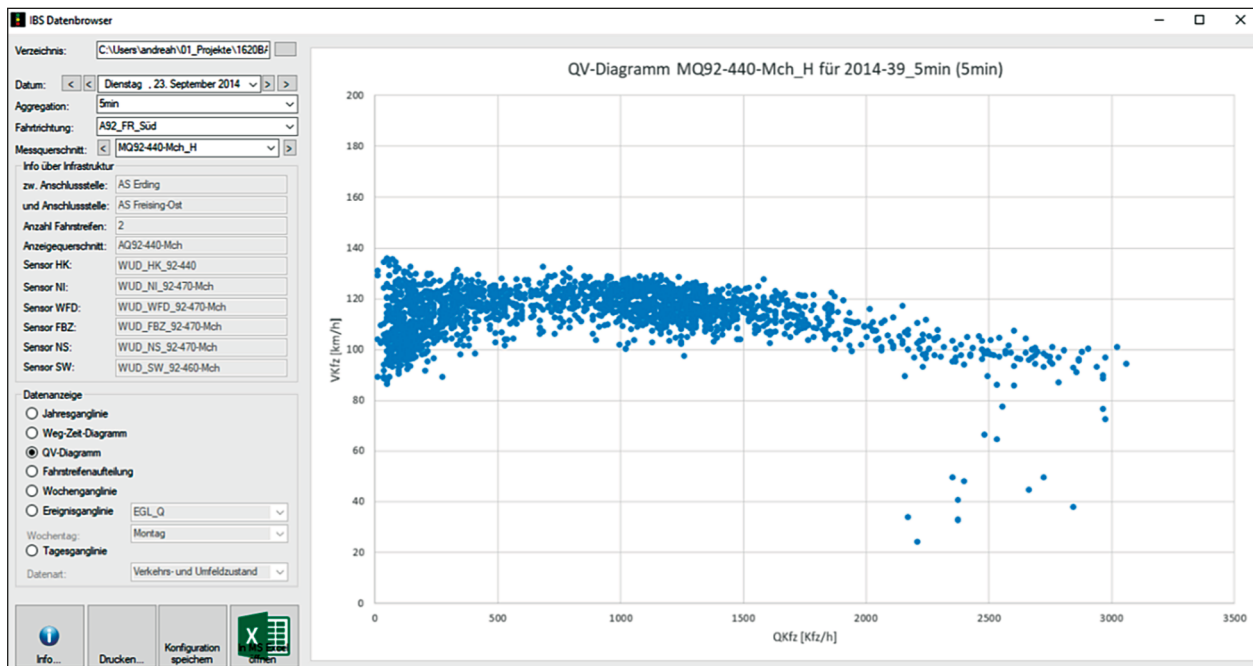


Bild 3-8: Beispielhafte Darstellung eines QV-Diagramms (Auflösung hier: 1 min)

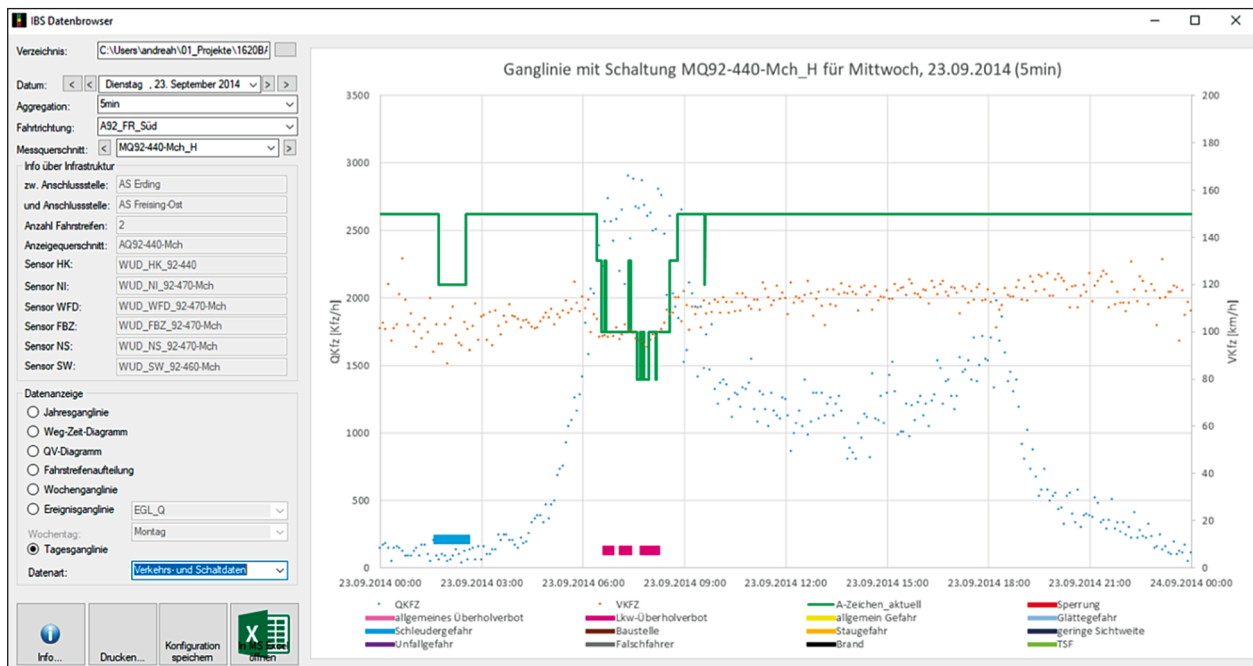


Bild 3-9: Beispielhafte Darstellung einer Tagesganglinie mit Schaltungen (Auflösung hier: 5 min)

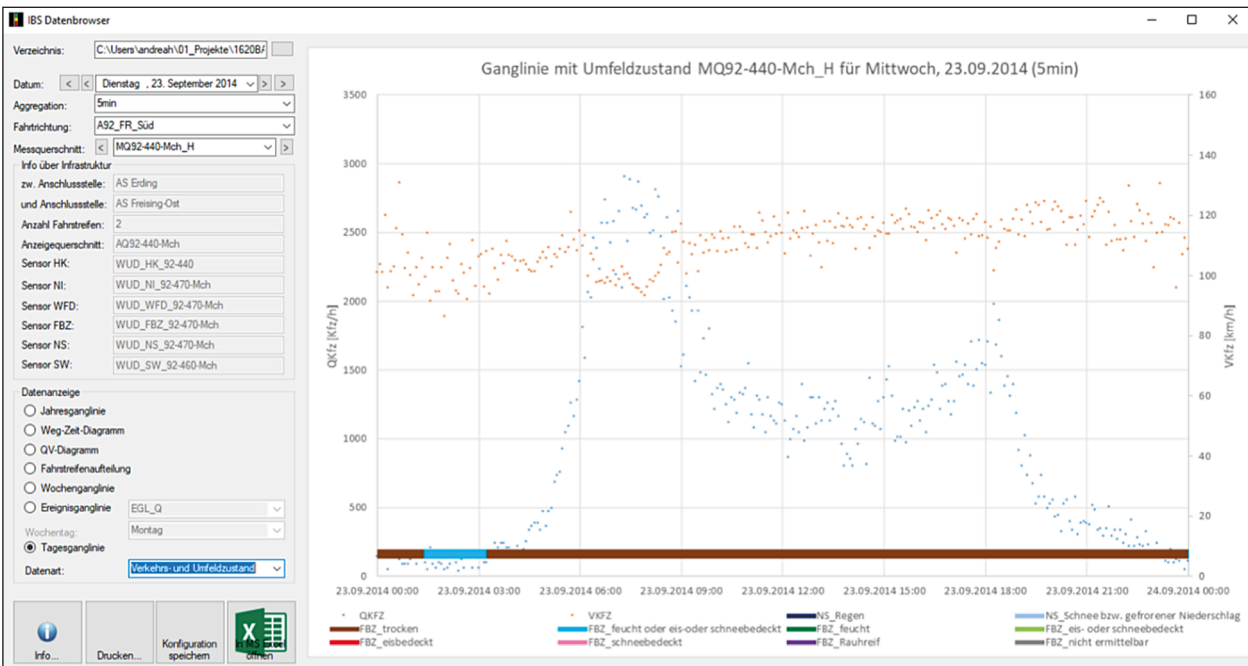


Bild 3-10: Beispielhafte Darstellung einer Tagesganglinie mit Umfeldzuständen (Auflösung hier: 5 min)

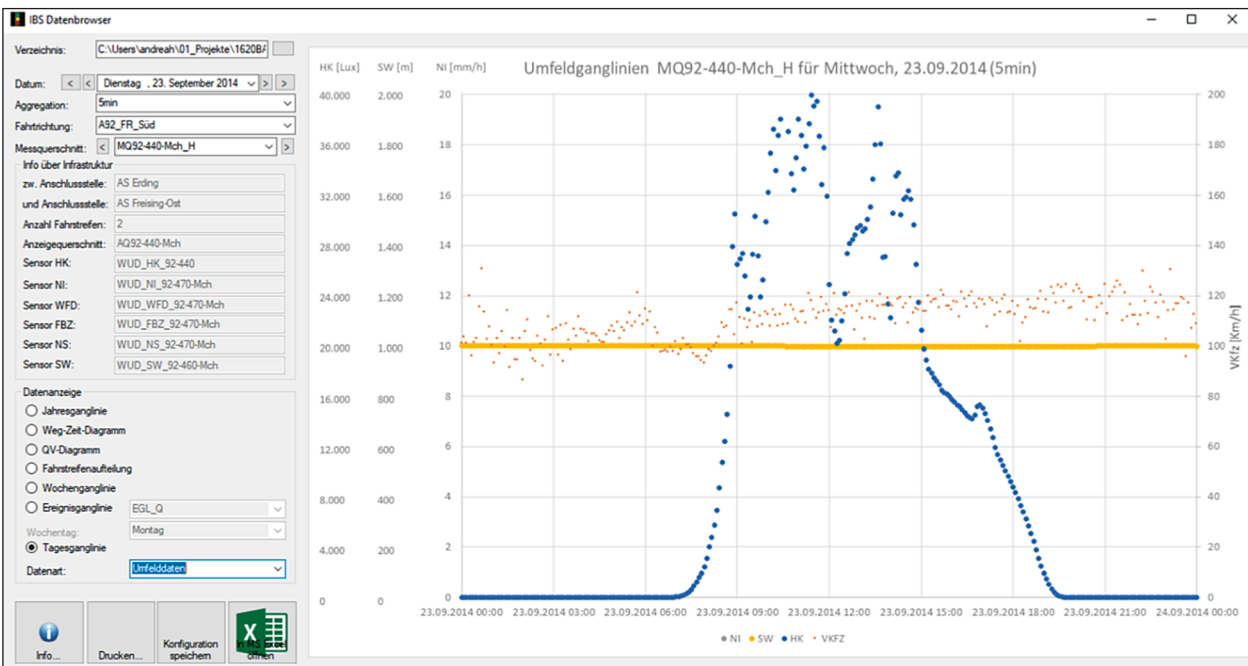


Bild 3-11: Beispielhafte Darstellung einer Tagesganglinie mit Umfelddaten (Auflösung hier: 5 min)

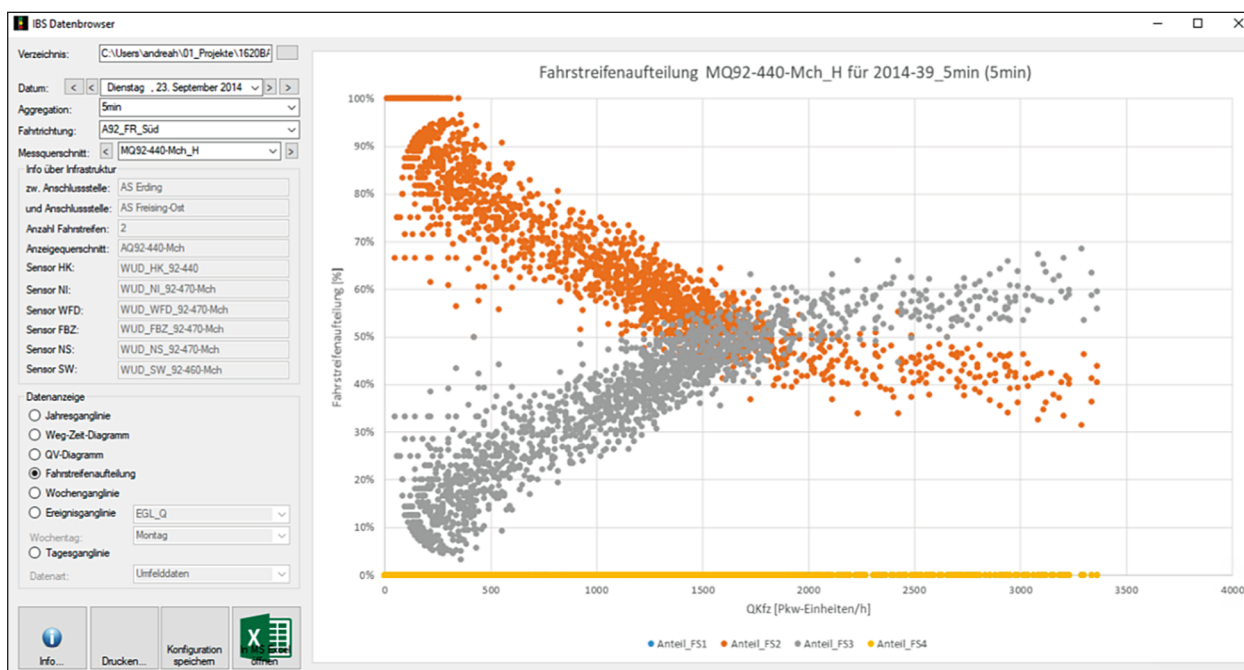


Bild 3-12: Beispielhafte Darstellung der Fahrstreifenaufteilung (Auflösung hier: 15 min)

Zudem wurden für den zeitlich-räumlichen Überblick sowie zur Identifikation von Störungsmustern Weg-Zeit-Diagramme (Beispiel s. Bild 3-13) über die mittlere Kfz-Geschwindigkeit auf Basis von Ein-Minuten-Intervallen erzeugt. Zur Analyse jahreszeitlicher Schwankungen wurden Jahresganglinien (Tagesverkehr, Lkw-Anteil und Anteil Datenausfall) erzeugt (Beispiel s. Bild 3-14). Abschließend wurde Ereigniskalender für die beiden Referenzstrecken erstellt. Dies erfolgte in einem iterativen Prozess. Zunächst wurde aus Metainformation ein grundsätzlicher Ereigniskalender auf Basis der Wochentage, Feiertage und Ferienzeiträumen erstellt. Da auf beiden Strecken ähnliche Muster an Dienstagen, Mittwochen und Donnerstagen identifiziert werden konnten, wurden diese Tage zusammengefasst. Für diese grobe Einteilung wurden die Tagesganglinien entsprechend zugeordnet, überlagert und Mittelwertganglinien gebildet. Anschließend

wurden für je zwei Messquerschnitte pro Referenzstrecke, die als repräsentativ für die Gesamtstrecke angenommen werden können, die so ermittelten Ereignisganglinien (Beispiel s. Bild 3-15) in einem manuellen Prozess auf Ausreißer überprüft. Die gefundenen Ausreißer wurden näher auf eine mögliche Ursache hin untersucht. Diese war zumeist in den Schaltdaten zu finden (z. B. Unfälle, Baustellen, sonstige Ereignisse). Häufig vorkommende Ereignisse (insb. Baustellen) wurden als zusätzliche Gruppierung in den Ereigniskalender aufgenommen. Nach Abschluss der Ausreißeruntersuchung wurde eine erneute Ereignisganglinienerzeugung vorgenommen. Die Normalereignisse (Wochentage, Feiertage, Ferientage) zeigten so eine repräsentative mittlere Ganglinie mit einem (je nach Ereignistyp variierenden) akzeptablen Korridor, in dem die zugeordneten Tagesganglinien liegen.

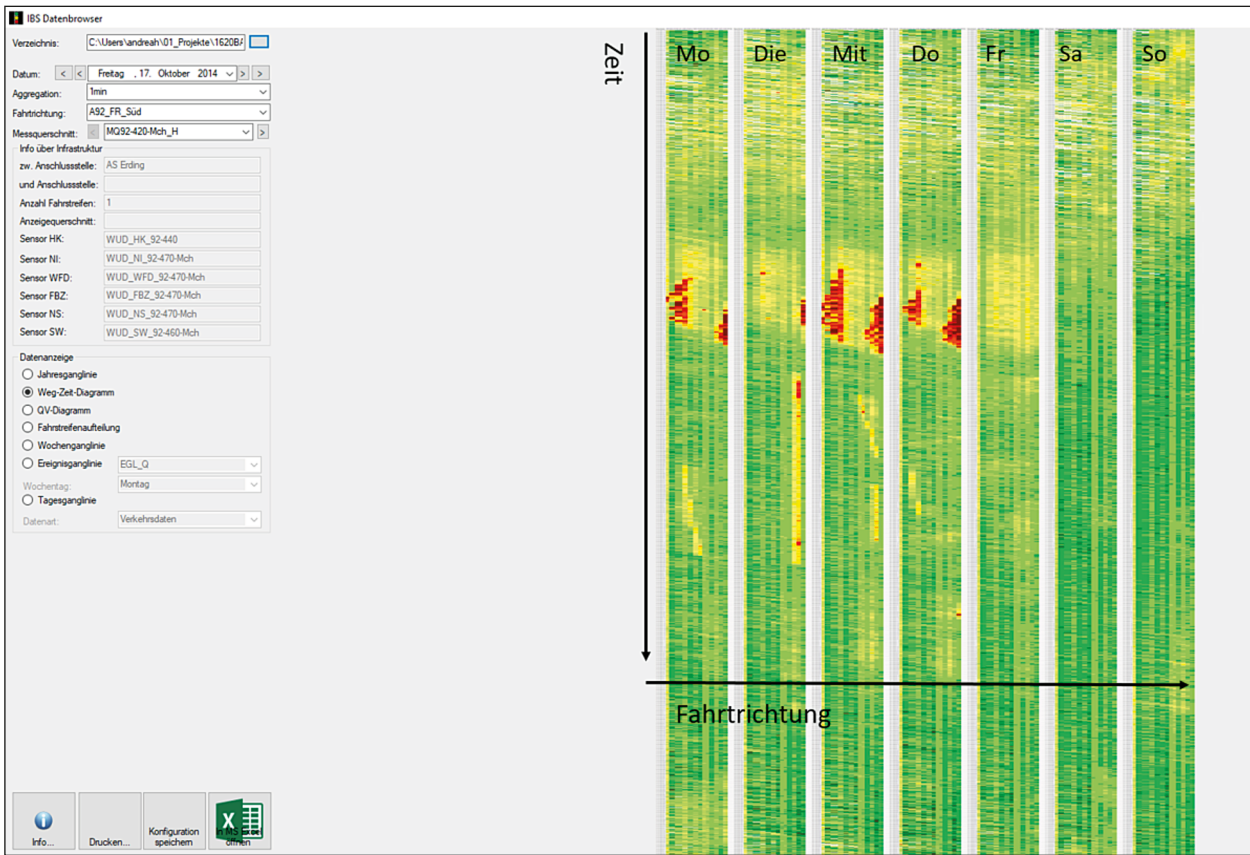


Bild 3-13: Beispielhafte Darstellung eines Weg-Zeit-Diagramms (Auflösung: 1 min)

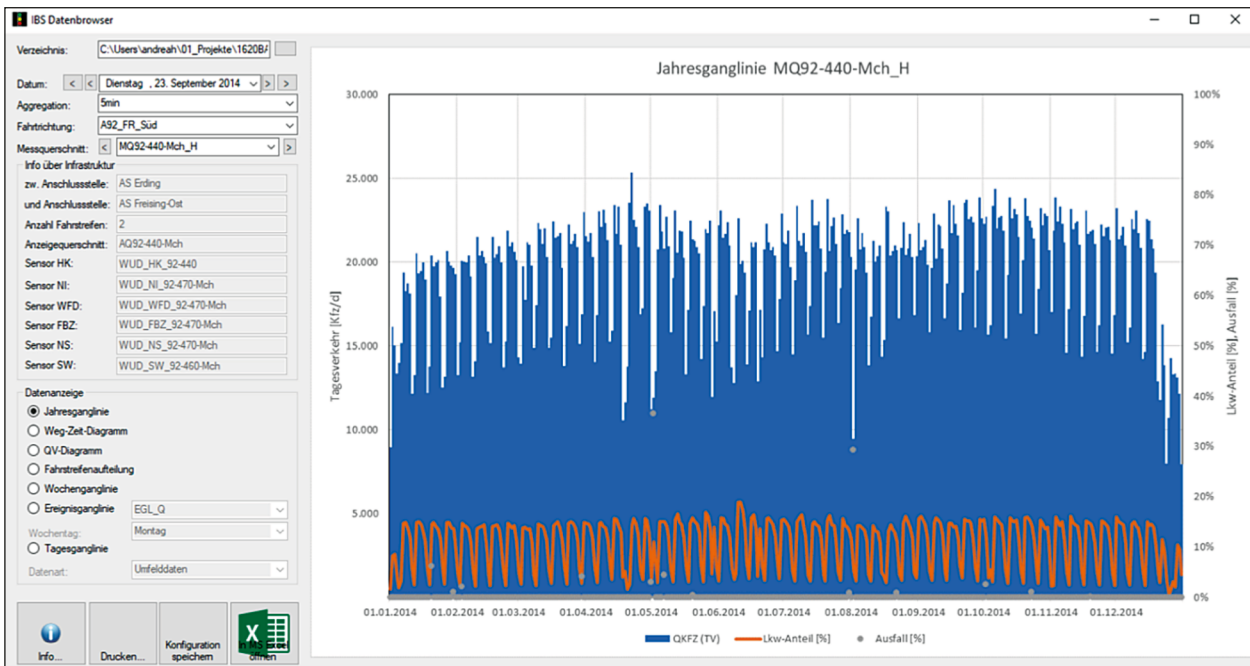


Bild 3-14: Beispielhafte Darstellung einer Jahresganglinie (Auflösung: Tagesverkehr)

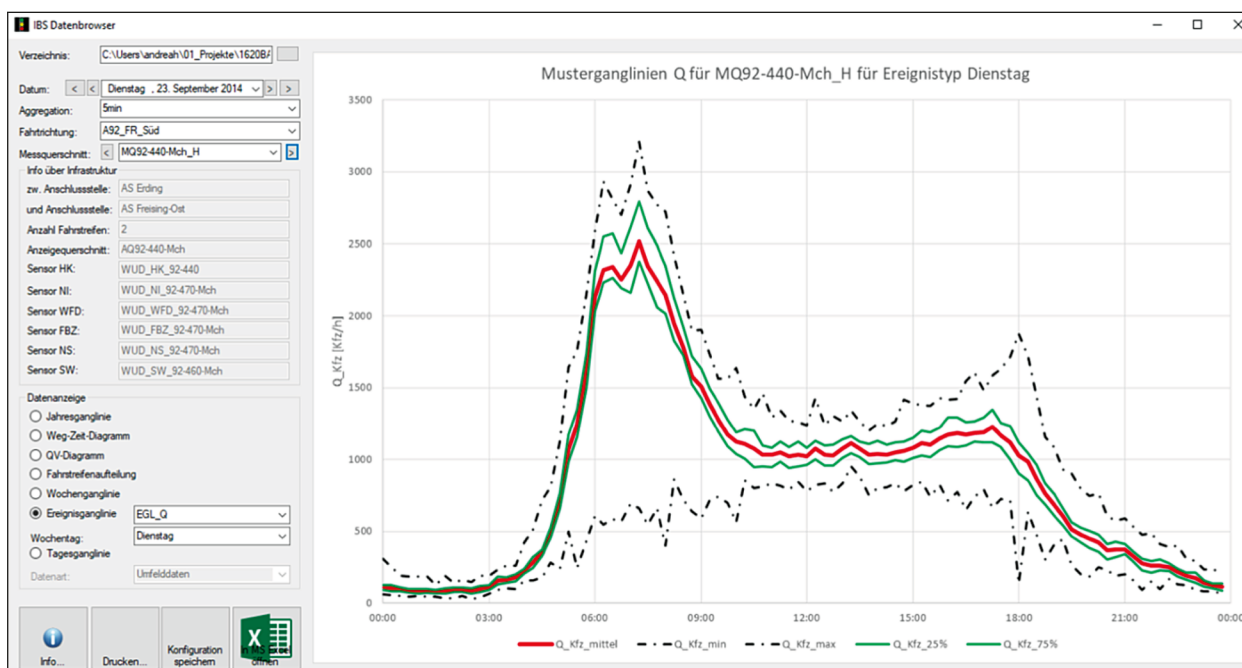


Bild 3-15: Beispielhafte Darstellung einer Ereignisganglinie (Auflösung: 15 min)

Da für das Projekt für jeden Messquerschnitt weit über 1.000 Diagramme erzeugt wurden, wurde ein sog. Datenbrowser-Tool weiterentwickelt, welches es dem Anwender ermöglicht, durch Auswahl des Messquerschnitts, des Zeitraums und der gewünschten Datensicht das zugehörige Diagramm zusammen mit weiteren Metainformationen zum Messquerschnitt (z. B. Lage, Streifigkeit, zugeordnete Umfelddatenstandorte und Anzeigequerschnitte) zu visualisieren. Falls die dem dargestellten Diagramm zugrunde liegenden Daten zur weiteren Verarbeitung benötigt werden, ist ein direkter Zugriff auf das MS Excel – Dokument aus diesem Tool heraus möglich.

3.2.2 Definition der relevanten Verkehrsszenarien – Situationserkennung

Für die Simulationsuntersuchung werden gemäß Aufgabenstellung die folgenden Szenarien untersucht:

- Werktag
 - dichter Verkehr
 - Stau
- Baustellenszenario

Für die Simulationsuntersuchungen werden jeweils 6 Stunden simuliert, in denen mehrere Szenarien (dichter Verkehr und Stau) auftreten.

Ein eigenes Szenario für Feiertage wird nicht umgesetzt, da für die Werktage auch die Nebenzeiten abgebildet werden und somit auch Zeiten geringerer Verkehrsstärken beinhaltet sind. Mit der Abbildung von Feiertagsverkehr wäre kein spezieller Erkenntnisgewinn verbunden.

3.2.3 Auswahl von repräsentativen Tagen für die Simulationskalibrierung und -validierung sowie für die Simulationsuntersuchung

Grundlage für die Auswahl von zwei repräsentativen Tagen war der in Kapitel 3.2.1 beschriebene Ereigniskalender. In Abhängigkeit von der jeweiligen Aufgabenstellung konnte so eine effiziente Vorauswahl getroffen werden. Für die Kalibrierung und Validierung wurden zunächst typische Tage ohne besondere Vorkommnisse ausgewählt. Für die zu untersuchenden Simulationsszenarien (s. Kapitel 3.2.2) wurden entsprechende Tage mit den jeweiligen Ereignissen ausgewählt. Dabei wurde darauf geachtet, dass diese Ereignisse im stromabwärts gelegenen Teil der Referenzstrecke liegen, damit die Auswirkungen des Ereignisses im Untersuchungsraum abgebildet sind. Dies konnte durch die vorliegenden Weg-Zeit-Diagramme auch visuell kontrolliert werden. Tage mit widrigen Witterungsbedingungen, die den Verkehrsablauf beeinflussen können, wurden ausgefiltert.

3.2.4 Ermittlung der Quelle-Ziel-Matrizen

Für die Ermittlung der Quelle-Ziel-Matrizen getrennt für Pkw- und Lkw-ähnliche Fahrzeuge müssen die Verkehrsdaten in 15-Minuten-Intervallen für die Zu- und Abflüsse aus dem betrachteten Netzabschnitt aufbereitet werden. Auf beiden betrachteten Referenzstrecken werden auch die Rampen zum größten Teil erfasst. Die Datenqualität weicht allerdings aufgrund des oftmals eingesetzten Seitenradars deutlich von der Datenqualität der Verkehrsdatendetektion auf der Hauptfahrbahn ab. Auf der Hauptfahrbahn selbst liegen in der Regel pro Streckenabschnitt zwischen zwei Anschlussstellen bzw. Knotenpunkten mehrere Messquerschnitte vor. Um möglichst qualitativ hochwertige Eingangsdaten in das Simulationsmodell zu erhalten, wurden zunächst repräsentative Messquerschnitte auf der Hauptfahrbahn durch ein automatisch erzeugtes Streckenprofil ausgewählt. Das Streckenprofil bildet den Tagesverkehr pro Messquerschnitt über die Zeit ab. Anhand der Abweichungen zu benachbarten Messquerschnitten kann dann der qualitativ hochwertigste Messquerschnitt pro Streckenabschnitt in einem manuellen Prozess ausgewählt werden.

Für die Ermittlung der Rampenbelastungen werden sowohl die Verkehrsdaten auf den Rampen selbst (falls verfügbar) sowie eine rechnerisch ermittelte Bilanzierung der Messquerschnitte auf der Hauptfahrbahn betrachtet. Zur Konsistenzerhaltung der Quelle-Ziel-Matrix muss dann in einem aufwendigen manuellen, iterativen Prozess die Zielgröße für den Zu- bzw. Abfluss aus dem Modell je Quelle und Senke bestimmt werden. Dabei muss darauf geachtet werden, dass sowohl die Streckenbilanz bei Übernahme der Daten aus direkter Rampendetektion stimmt als auch die Bilanz in den Fahrzeuggruppen Pkw und Lkw stimmt. Insbesondere dies erwies sich als Herausforderung, da die Differenzierung zwischen den beiden Fahrzeugklassen zum Teil von Standort zu Standort größere Abweichungen ergaben und die Seitenradardetektion sich dabei als besonders fehleranfällig erwies.

Darüber hinaus ist im relevanten Ereignisfall (Stau bzw. Störung) zu beachten, dass sich die zeitlichen Latenzen, in denen ein Fahrzeugpulk den stromabwärts nächsten Messquerschnitt erreicht, deutlich erhöhen, was die Bilanzierung in diesen Zeiträumen verfälscht und manuelle Korrekturen erforderlich macht.

3.2.5 Aufbereitung der Daten für die Kalibrierung und Validierung

Zur Aufbereitung der Daten für die Kalibrierung und Validierung (s. Kapitel 4.2) wurden die Daten in 5-Minuten-Intervallen für repräsentative Messquerschnitte auf der Hauptfahrbahn aufbereitet. Im makroskopischen Kalibrierungs- und Validierungsprozess werden QV-Diagramme, Ganglinien, Fahrstreifenaufteilungen und Weg-Zeit-Diagramme verwendet. Diese werden aus den Simulationsdaten erzeugt und mit den gemessenen Daten für den simulierten Tag überlagert. Ist die Übereinstimmung hinreichend genau, war die Kalibrierung bzw. die Validierung erfolgreich. Im Rahmen der Datenaufbereitung wurden die notwendigen Prozessschritte zur Gegenüberstellung der makroskopischen Verkehrsdaten automatisiert.

3.3 Definition der maßgeblichen Kenngrößen zur Bewertung

Um die Wirkungen von SBA-Maßnahmen und auch von Fahrzeugautomatisierung auf den Verkehrsablauf und das Fahrverhalten objektiv bewerten zu können, müssen zunächst geeignete Kenngrößen definiert werden. Diese sollen Wirkungen sowohl hinsichtlich der Verkehrssicherheit als auch hinsichtlich der Leistungsfähigkeit des Verkehrssystems und der Verstetigung des Verkehrsflusses abdecken. Die Zielstellung dieses Vorhabens, auch die Einflüsse einzelner automatisierter Fahrzeuge im Mischverkehr mit konventionellen Fahrzeugen zu untersuchen, erfordert, dass auch mikroskopische Kenngrößen einbezogen werden, die die Bewertung einzelner Fahrmanöver oder Fahrzeuginteraktionen ermöglichen.

Die ausgewählten Bewertungsgrößen sollten soweit möglich sowohl aus der vorliegenden empirischen Datenbasis (lokale Verkehrsdaten einschließlich Einzelfahrzeugdaten) als auch aus der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation ableitbar sein. Dies ist Voraussetzung für die Validierung des Verhaltensmodells für konventionelle Fahrzeuge (vgl. Kapitel 3.5). Die Vorgehensweise zur Auswahl der Bewertungsgrößen wird in Kapitel 3.3.1 beschrieben.

Anhang 2 beinhaltet eine Übersicht über die potenziell geeigneten Kenngrößen, inklusive derer, die für die weitere Verwendung im Rahmen der Modell-

validierung und Analyse der Simulationsergebnisse herangezogen werden sollen. Diese werden in den Kapiteln 3.3.2 bis 3.3.5 detaillierter vorgestellt und die Auswahl begründet. In Kapitel 5 wird beschrieben, wie die Kenngrößen zur Bewertung aus der Simulationsumgebung AIMSUN erzeugt und ausgegeben werden.

3.3.1 Vorgehensweise

Ausgangspunkt für die Auswahl der Kenngrößen bildeten Ansätze aus bisherigen Untersuchungen zu Wirkungen und Wirksamkeit von SBA. Darüber hinaus wurden auch weitere Bewertungsansätze, etwa aus der Verkehrssicherheitsforschung, einbezogen. Zunächst wurden insgesamt 46 potenzielle Kenngrößen zur Bewertung von Wirkungen u. a. auf

- das Geschwindigkeitsverhalten
- die Verkehrsstärke und -dichte
- die Fahrstreifenwahl
- das Abstands- bzw. Folgeverhalten

identifiziert. Für jede dieser Kenngrößen wurde angegeben, ob diese aus empirischen Daten und aus der Simulation bestimmbar ist und für welche Wirkdimensionen und SBA-Maßnahmen sie geeignet ist (vgl. Anhang 2). Zudem wurde je Bewertungsgröße eine qualitative a-priori-Einschätzung vorgenommen, inwiefern die jeweilige Größe durch eine SBA-Maßnahme beeinflusst werden könnte.

Aus der Menge der potenziellen Bewertungsgrößen wurden zunächst 14 Kenngrößen ausgewählt, die im weiteren Projektverlauf berücksichtigt werden sollen. Grundlage für die Auswahl war eine Einschätzung der Verfügbarkeit, der Erfolgsaussichten einer realitätsgetreuen Abbildung in der Verkehrsflusssimulation und der Relevanz für die vorliegende Untersuchung. Neben der zuvor genannten Einschätzung wurden auch Untersuchungen aus der Literatur einbezogen, z. B. hinsichtlich der Verwendung sicherheitsbezogener mikroskopischer Bewertungsgrößen in der Verkehrsflusssimulation (z. B. [Pha07], [Bev11] und [Hof13]).

Ob sich diese ausgewählten Kenngrößen in der Verkehrsflusssimulation realitätsgetreu nachbilden lassen, wird im Rahmen der Validierungsphase untersucht (vgl. Kapitel 4). Hierdurch kann die Aus-

wahl der Kenngrößen weiter eingeschränkt werden, z. B. indem unter ähnlichen Kenngrößen diejenige ausgewählt wird, die die bessere Übereinstimmung mit in der Realität beobachteten Zusammenhängen hat.

3.3.2 Bewertung Verkehrsfluss/-störungen

Bisherige Untersuchungen (vgl. Kapitel 2.4) zeigen, dass SBA dazu beitragen, den Verkehrsfluss zu harmonisieren und bei dichtem Verkehr nahe der Kapazitätsgrenze stabil zu halten. Hierdurch können Verkehrszusammenbrüche vermieden oder zumindest hinausgezögert werden. Insbesondere können auch kurzzeitige Einbrüche der Geschwindigkeit und Verkehrsstärke in Häufigkeit und Intensität vermindert werden. Eine Erhöhung der Kapazität (im Sinne der maximalen erreichbaren Verkehrsstärke) durch eine SBA konnte durch die bisherigen Untersuchungen nicht eindeutig festgestellt werden. Automatisierten Fahrzeugen wird – zumindest bei höheren Durchdringungsraten – ebenfalls ein Potenzial zur Harmonisierung des Verkehrsflusses und somit auch zur Vermeidung von Verkehrszusammenbrüchen, gleichzeitig aber auch zur Erhöhung der Kapazität zugeschrieben. Daher sollen zur Bewertung des Verkehrsflusses die zeitliche Schwankungscharakteristik von Geschwindigkeit und Verkehrsstärke sowie die Kapazität herangezogen werden. Diese lassen sich durch folgende makroskopische Kenngrößen ausdrücken:

ΔV_t	Schwankung der mittleren Geschwindigkeiten je Minutenintervall als deren Abweichung von einem gleitenden Mittelwert über mehrere Intervalle
ΔV_{drop}	Intensität eines Geschwindigkeitsabfalls nach einem signifikanten Geschwindigkeitseinbruch als Differenz der mittleren Geschwindigkeiten vor und nach dem Geschwindigkeitseinbruch (nach [Pis03])
ΔQ_t	Schwankung der Verkehrsstärken je Minutenintervall als deren Abweichung von einem gleitenden Mittelwert
Q_{max}	maximale empirische Verkehrsstärke
Δt_{Reise}	Mittlere Reisezeit zum Durchfahren eines definierten Streckenabschnitts

Die vorgenannten Kenngrößen werden mit Ausnahme der mittleren Reisezeit auf Grundlage querschnittsbezogener Verkehrskenngrößen ermittelt.

Als Schwankungsmaß für Geschwindigkeit und Verkehrsstärke wird die Abweichung von einem gleitenden Mittelwert einer direkten Differenzbildung aufeinanderfolgender Minutenwerte vorgezogen, da erwartet wird, dass diese Kenngröße ein im Zeitverlauf stabiles Maß für die Schwankungen bildet und auch besser in der Simulation reproduziert werden kann.

Auf eine Bewertung von Störungshäufigkeit, -länge und -dauer wird verzichtet, da in der Simulation einzelne Störungsereignisse untersucht werden.

Auch auf die Berechnung von Zusammenbruchswahrscheinlichkeiten oder Zuverlässigkeitsindikatoren wird verzichtet. Die Bewertung der Anzahl von tatsächlich eingetretenen Verkehrszusammenbrüchen ist nur bei hinreichend langen Untersuchungszeiträumen sinnvoll; in der Simulation ist dies nicht gegeben. Die Wahrscheinlichkeit, dass in einer gegebenen Situation ein Zusammenbruch erfolgt, ist sehr stark von den Randbedingungen ebendieser Situation abhängig, sodass aus der Literatur bekannte Verfahren (z. B. Zuverlässigkeitsindikator nach Ferrari [Fer88]) nicht unbedingt mit der in der jeweiligen Situation gegebenen Zusammenbruchswahrscheinlichkeit übereinstimmen müssen. Die mittlere Intensität von Geschwindigkeitseinbrüchen (d. h. Differenz mittlerer Geschwindigkeiten aufeinanderfolgender Zeitintervalle) kann jedoch positiv beeinflusst werden. Die Anzahl der Geschwindigkeitseinbrüche wird in diesem Zusammenhang zur Bewertung des Stichprobenumfangs aufgezeichnet, jedoch aus den zuvor genannten Gründen nicht primär zur Bewertung des Verkehrsflusses oder der Verkehrsqualität verwendet.

Die mittlere Reisezeit zum Durchfahren eines Streckenabschnitts ist nur eingeschränkt als Bewertungsgröße verwendbar, da für die Validierung des Simulationsmodells bzgl. dieser Kenngröße Reisezeitdaten nur in geringem Umfang und nur für die A92 zur Verfügung standen. Die mittlere Reisezeit soll unter Berücksichtigung dieser Einschränkungen jedoch indikativ einbezogen werden. Die Reisezeitdaten wurden von der Autobahndirektion Südbayern für einzelne Tage (13.03., 05.05., 20.05., 23.09., 06.10. und 16.10.2014) bereitgestellt. Die Reisezeitdaten wurden modellbasiert auf Basis der vorhandenen lokalen Verkehrsdatenerfassung generiert.

Die der Harmonisierung des Verkehrsflusses zugrundeliegenden Wirkeffekte auf das Geschwindig-

keits- und Abstandsverhalten sollen durch weitere, auch mikroskopische Kenngrößen beschrieben werden; hierauf wird in den Kapiteln 3.3.3 bzw. 3.3.4 eingegangen.

3.3.3 Bewertung Geschwindigkeitsverhalten

Die Wirkung einer SBA auf das Geschwindigkeitsverhalten kann unterschiedlich sein (vgl. Kapitel 2.4): Bei dichtem Verkehr kann durch präventive Maßnahmen der SBA (zulässige Höchstgeschwindigkeit und/oder Lkw-Überholverbot) das Geschwindigkeitsniveau angehoben werden. Dies wird durch die Stabilisierung des Verkehrs an der Kapazitätsgrenze und durch die Vermeidung kurzzeitiger Geschwindigkeitseinbrüche erreicht. Auf der anderen Seite wird durch Gefahrenwarnung (i. d. R. ebenfalls verbunden mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit) die mittlere Geschwindigkeit reduziert, was in diesem Falle auch erwünscht ist. Zusätzlich kann in beiden Fällen eine Verringerung der Streuung der Einzelfahrzeuggeschwindigkeiten erreicht werden, sowohl innerhalb eines Fahrstreifens als auch zwischen benachbarten Fahrstreifen. Somit werden hinsichtlich des Geschwindigkeitsverhaltens folgende Bewertungskriterien genutzt:

v_{Kfz}	Geschwindigkeitsniveau (mittlere lokale/momentane Kfz-Geschwindigkeit; je Fahrstreifen und im Querschnitt)
s_{vKfz}	Standardabweichung der lokalen bzw. momentanen Kfz-Geschwindigkeiten (je Fahrstreifen und im Querschnitt)
$\Delta v_{m,n}$	Differenzen der mittleren lokalen Kfz-Geschwindigkeiten zwischen benachbarten Fahrstreifen m und n
Δv_{ind}	Mittlere Geschwindigkeitsdifferenzen individueller aufeinanderfolgender Fahrzeuge

Der Befolgungsgrad einer durch die SBA angezeigten zulässigen Höchstgeschwindigkeit ist zwar im Rahmen der Kalibrierung und Validierung des Simulationsmodells zu berücksichtigen, wird aber nicht in die Bewertung einbezogen. Im Rahmen dieses Vorhabens sollen Szenarien untersucht werden, in denen eine Schaltung im Rahmen realistischer Toleranzen befolgt wird.

Da mit Ausnahme der in Kapitel 3.3.2 erwähnten Reisezeitdaten keine streckenbezogenen Verkehrsdaten für die Kalibrierung und Validierung des Simulationsmodells zur Verfügung stehen (und insbe-

sondere keine räumlich differenzierten Daten), erfolgt auch die Bewertung des Geschwindigkeitsverhaltens lediglich auf Grundlage lokal erfasster Zusammenhänge. Eine Bewertung von Geschwindigkeitsprofilen oder auch -schwankungen im Fahrtverlauf sowie auch eine Bewertung von Fahrt- oder Verlustzeiten wäre innerhalb der Simulation zwar technisch möglich, die Aussagekraft dieser Größen jedoch stark eingeschränkt, da keine empirischen Daten zur Validierung zur Verfügung standen.

3.3.4 Bewertung Abstandsverhalten

Durch die zuvor erwähnte Harmonisierung und Angleichung der Fahrgeschwindigkeiten wird, auch gestützt auf vorausgegangene Untersuchungen (vgl. Kapitel 2.4), eine positive Wirkung hinsichtlich beobachteter Zeit- und Weglücken erwartet. Um diese für eine Aussage zur Verkehrssicherheit nutzen zu können, müssen sie im Kontext der Fahrgeschwindigkeit betrachtet werden. Um unabhängig von selten eintretenden und u. U. in ihrer Ursache nicht vollständig erfassbaren Unfällen Aussagen zur Verkehrssicherheit treffen zu können, wurden verschiedene Ersatzkenngrößen der Verkehrssicherheit (engl. surrogate safety measures) hergeleitet.

Eine häufig verwendete Größe ist die Auffahrzeit (engl. time to collision, TTC). Nach [Hay72] (zitiert z. B. in [Bev11] und [Hof13]) ist die Auffahrzeit definiert als die Zeit, innerhalb der zwei aufeinanderfolgende Fahrzeuge kollidieren, wenn sie sich mit der gegenwärtigen Geschwindigkeit und entlang des gleichen Weges fortbewegen. Die Auffahrzeit kann als Maß für die Gefahr einer Fahrzeugfolgesituation genutzt werden. Auffahrzeiten können sowohl aus Fahrzeug- als auch aus lokalen Einzelfahrzeugdaten berechnet werden, wodurch diese Kenngröße für dieses Vorhaben grundsätzlich geeignet ist. Die Auffahrzeit TTC_i für Fahrzeug i zum vorausfahrenden Fahrzeug $i - 1$ berechnet sich wie folgt [Pha07]:

$$TTC_i = \frac{\Delta t_{\text{net},i} \cdot v_i}{v_i - v_{i-1}} = \frac{\Delta x_{\text{net},i}}{v_i - v_{i-1}}$$

mit

$\Delta t_{\text{net},i}$ Nettozeitlücke Fzg. i zu Fzg. $i - 1$

$\Delta x_{\text{net},i}$ Nettoabstand Fzg. i zu Fzg. $i - 1$

v_i Geschwindigkeit Fzg. i

v_{i-1} Geschwindigkeit Fzg. $i - 1$

Zu beachten ist, dass die Auffahrzeit nur für Situationen definiert ist, in denen ein vorausfahrendes Fahrzeug $i - 1$ vorhanden ist und dieses eine geringere Geschwindigkeit hat als das betrachtete Fahrzeug i .

Weitere Indikatoren zur Bewertung des Gefährdungspotenzials einer Fahrzeugfolgesituation sind das Compensated Individual Braking Time Risk (CIBTR) und das Individual Braking Time Risk (IBTR) sowie das darauf aufbauende Platoon Braking Time Risk (PBTR) bzw. Compensated Platoon Braking Time Risk (CPBTR). Diese Bewertungsgrößen wurden bereits in einigen Untersuchungen, auch im Kontext von Streckenbeeinflussungsanlagen, genutzt (vgl. Kapitel 2.4). Im Gegensatz zur Auffahrzeit wird bei diesen Größen eine Kollisionswahrscheinlichkeit im Falle eines unvermittelten Halts des vorausfahrenden Fahrzeugs ermittelt.

Das $CIBTR_i$ bezieht sich auf die Fahrzeugfolgesituation eines einzelnen Fahrzeugs i zum vorausfahrenden Fahrzeug $i - 1$ und berechnet sich wie folgt [Mou08]:

$$CIBTR_i = \log_2 \left(\frac{v_i}{|\gamma_{\text{max}}| \cdot \kappa \cdot \Delta t_{\text{net},i}} \right)$$

mit

$\Delta t_{\text{net},i}$ Nettozeitlücke Fzg. i zu Fzg. $i - 1$

v_i Geschwindigkeit Fzg. i

γ_{max} maximale Bremsverzögerung Fzg. i

κ Faktor zur Unterscheidung zwischen sicheren und unsicheren Situationen

Der Parameter γ_{max} ist hierbei in Abhängigkeit z. B. vom Fahrbahnzustand festzulegen. In [Pha07] werden empfohlene Werte von $-6,25 \text{ m/s}^2$ für eine trockene Fahrbahn sowie $-3,0 \text{ m/s}^2$ bei nasser Fahrbahn zitiert. Der Faktor κ ist so einzustellen, dass sich für gerade noch als sicher eingestufte Fahrzeugfolgesituationen ein CIBTR von 0 einstellt. In [Pha07] und auch in [Bev11] wird für κ ein Wert von 2 angegeben. [Mou08] nutzte für einen Autobahnabschnitt in der Schweiz Werte für γ_{max} (trocken) von $6,87 \text{ m/s}^2$ sowie für κ von 2,426. Diese Parameter wurden auch in diesem Vorhaben zugrunde gelegt, da sie bereits in einer vorangegangenen Untersuchung verwendet wurden.

Eine Kalibrierung des Parameters κ für die beiden betrachteten Streckenabschnitte sowie auch für die verschiedenen durch die SBA darstellbaren zulässi-

gen Höchstgeschwindigkeiten würde zu einer besseren Anpassung des CIBTR und der darauf aufbauenden Risikomaße (s. u.) an ein tatsächlich im Einzelfall bestehendes (unbekanntes) Gefahrenpotenzial ermöglichen. Dadurch könnte jedoch gleichzeitig die Vergleichbarkeit der Szenarien eingeschränkt werden; insbesondere relative Veränderungen dieser Kenngrößen könnten dann nicht mehr bewertet werden. Da in diesem Vorhaben nur Situationen mit trockener Fahrbahn einbezogen werden, ist auch die Verwendung eines festen Wertes für den Parameter γ_{\max} gerechtfertigt.

Das $IBTR_i$ entspricht dem CIBTR, ist jedoch für alle sicheren Fahrzeugolgsituationen stets 0:

$$IBTR_i = \max(0, CIBTR_i)$$

Das PBTR entspricht einer aufsummierten Kollisionswahrscheinlichkeit innerhalb eines Pulks. Dieses Risiko $PBTR_i$ für Fahrzeug i berechnet sich wie folgt [Mou08] [Bev11]:

$$PBTR_i = \begin{cases} 0 & \text{wenn } IBTR_i = 0 \\ IBTR_i + PBTR_{i-1} & \text{wenn } IBTR_i > 0 \end{cases}$$

Das CPBTR wurde in [Mou08] eingeführt und berechnet sich analog zum PBTR, jedoch wird anstelle des IBTR das CIBTR aufsummiert.

In diesem Vorhaben werden zur Bewertung des Abstandsverhaltens folgende Größen in die weitere Untersuchung einbezogen:

Δt_{net} Mittlere Nettozeitlücke

TTC Mittlere Auffahrzeit (time to collision)

$IBTR$ Individual Braking Time Risk

$CIBTR$ Compensated Individual Braking Time Risk

$PBTR$ Platoon Braking Time Risk

$CPBTR$ Compensated Platoon Braking Time Risk

Die empirische Datenbasis umfasst lokale Einzelfahrzeugdaten, mit denen diese Kenngrößen querschnittsbezogen (ggf. fahstreifendifferenziert) ermittelt werden können. In der Simulation können diese Kenngrößen grundsätzlich sowohl querschnitts- als auch abschnittsbezogen ermittelt werden.

Es ist zu beachten, dass sehr kurze Zeitlücken in den diesem Vorhaben zugrundeliegenden empirischen Daten auch auf Ungenauigkeiten der Verkehrsdatenerfassung zurückzuführen sein können,

z. B. wenn ein Gespann fälschlicherweise als zwei Fahrzeuge mit sehr kurzer Zeitlücke erfasst wird. Ein weiteres Problem besteht darin, dass die bestehenden Fahrverhaltensmodelle eine sichere Abstandswahl unterstellen, sodass die Nachbildung unsicherer, aber in der Realität durchaus beobachteter Zeit- und Weglücken nur eingeschränkt möglich ist [Hof13] [Bev11]. Nicht zuletzt ist festzustellen, dass es keine allgemein akzeptierte Schwelle gibt, ab der eine Zeitlücke oder auch eine Auffahrzeit als kritisch gilt. Für Auffahrzeiten finden sich z. B. in der Literatur Angaben zwischen 3 und 10 Sekunden [Bev11] [Hof13]. Aus diesen Gründen wird auf eine Bewertung der Häufigkeiten kritischer Zeitlücken, Abstände und Auffahrzeiten verzichtet und nur die mittleren Nettozeitlücken und die mittleren Auffahrzeiten betrachtet.

Bisherige Untersuchungen zum Einsatz der Ersatzkenngrößen der Verkehrssicherheit in der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation legen nahe, dass eine den empirischen Daten entsprechende Reproduktion dieser Kenngrößen eine große Herausforderung darstellt. Neben dem bereits erwähnten Umstand, dass sehr kleine Zeitlücken und TTC aufgrund der Eigenschaften der Fahrzeugfolgemodelle nicht reproduziert werden können, zeigt z. B. [Bev11] auch auf, dass diese Kenngrößen insgesamt in der Simulation unterschätzt werden. In der Validierungsphase soll dies näher untersucht werden, auch hinsichtlich der Frage, ob diese Indikatoren dennoch zumindest für eine vergleichende Bewertung unterschiedlicher Simulationsszenarien geeignet sind und welche der Kenngrößen eine gute Übereinstimmung zwischen empirischen und simulierten Zusammenhängen aufweist.

3.3.5 Bewertung Fahrstreifenwahlverhalten

Es wird erwartet, dass durch zulässige Höchstgeschwindigkeiten eine gleichmäßigere Verteilung der Fahrzeuge über die Fahrstreifen und eine bessere Ausnutzung des Hauptfahrstreifens erreicht werden kann. Außerdem wird erwartet, dass durch die geringere Geschwindigkeitsstreuung die Anzahl der Fahrstreifenwechsel zum Einleiten eines Überholmanövers abnehmen wird. Auf der anderen Seite können durch die Angleichung der Geschwindigkeiten zwischen den Fahrstreifen auch Fahrstreifenwechsel erleichtert werden.

Während der Kalibrierung und Validierung des Simulationsmodells hat sich gezeigt, dass eine realis-

tische Fahrstreifenaufteilung nur durch feste Modellvorgaben erreicht werden kann (vgl. Kapitel 4.2.3.3). Eine dynamische Anpassung der Fahrstreifenwahl in der Simulation, etwa als Reaktion auf die Schaltzustände der SBA, ist somit nur sehr eingeschränkt möglich. Die Bewertung des Fahrstreifenverhaltens mittels Kenngrößen erfolgt daher nicht.

3.4 Definition der relevanten SBA-Maßnahmen

Für beide Referenzstrecken wird eine vollständig ausgebaute MARZ-Unterzentrale an die Simulation angebunden. Somit stehen grundsätzlich alle gängigen Maßnahmenkategorien zur Verfügung. Dabei sind allerdings die lokalen Besonderheiten der beiden Referenzstrecken zu beachten.

3.4.1 A57 – SBA Maßnahmen

Auf der A57 ist im Bereich von Krefeld-Oppum bis Krefeld-Gartenstadt eine Grundversorgung mit einer Geschwindigkeitsbegrenzung auf 100 km/h eingerichtet.

Als relevante Maßnahmen zur Harmonisierung des Verkehrsablaufs auf der A57 werden in der Simulation untersucht:

- Geschwindigkeitsbegrenzung auf 120 km/h (zwischen Krefeld-Oppum und Krefeld-Gartenstadt läuft die Grundversorgung)
- Geschwindigkeitsbegrenzung auf 100 km/h
- Geschwindigkeitsbegrenzung auf 80 km/h

Darüber hinaus werden die folgenden Maßnahmen untersucht:

- Geschwindigkeitsbeschränkung auf 60 km/h (Stauabsicherung)
- Geschwindigkeitsbeschränkung auf 80 km/h (Baustelle)
- Lkw-Überholverbot (gemäß MARZ 99)

Eine Gefahrenwarnung ohne Geschwindigkeitsbeschränkung wird auf der A57 nur sehr selten geschaltet. Für diese Maßnahme gibt es daher auch nur eine geringe Anzahl an Messdaten, sodass zum einen keine eindeutigen Wirkungen aus den Mess-

daten ermittelt werden können und zum anderen keine ausreichende Datenbasis für eine Kalibrierung der Simulation vorliegt. Aus diesem Grund wird für die A57 die Maßnahme

- Gefahrenwarnung mit Geschwindigkeitsbegrenzung auf 80 km/h

als relevante zu untersuchende Maßnahme definiert.

3.4.2 A92 – SBA Maßnahmen

Auf der A92 wird u. a. im Rahmen der Harmonisierung eine Geschwindigkeitsbegrenzung von 130 km/h anstelle der im MARZ 99 vorgesehenen 120 km/h geschaltet. Eine Schaltung mit einer Geschwindigkeitsbegrenzung von 120 km/h ist daher auf dieser Strecke kaum vorzufinden. Eine weitere Besonderheit der Streckenbeeinflussungsanlage der A92 ist, dass zweierlei Harmonisierungsprogramme versorgt sind: Einerseits präventive Programme, die durch eine erhöhte Verkehrsstärke ausgelöst werden und andererseits reaktive Programme, die auf Dichte und Geschwindigkeit reagieren. Die beiden Formen von Harmonisierungsprogrammen unterscheiden sich vor allem in der Zuordnung zwischen Mess- und Anzeigequerschnitten (präventiv: Um den auslösenden Messquerschnitt wirkend, jedoch nicht über Anschlussstellen hinweg; reaktiv: Stromabwärts wirkend). Die Schaltbilder entsprechen jedoch (mit Ausnahme der Geschwindigkeitsstufe 130 km/h) dem MARZ 99.

Aus diesem Grund werden für die Simulation die folgenden relevanten Harmonisierungsmaßnahmen festgelegt:

- Geschwindigkeitsbegrenzung auf 130 km/h
- Geschwindigkeitsbegrenzung auf 100 km/h
- Geschwindigkeitsbegrenzung auf 80 km/h

Des Weiteren werden wie auf der A57 auch die Maßnahmen

- Geschwindigkeitsbeschränkung auf 60 km/h (Stauabsicherung)
- Geschwindigkeitsbeschränkung auf 80 km/h (Baustelle)
- Lkw-Überholverbot (gemäß MARZ 99)

in der Simulation umgesetzt und analysiert.

Eine Gefahrenwarnung ohne Geschwindigkeitsbegrenzung wird auf der A92 ebenfalls nur sehr selten geschaltet, sodass auch für die A92 die Maßnahmen

- Gefahrenwarnung mit Geschwindigkeitsbegrenzung auf 80 km/h

analysiert wird.

Über die closed loop – Anbindung werden von der MARZ-Unterzentrale die Beeinflussungsmaßnahmen an die mikroskopische Verkehrsflusssimulation übertragen. Dort werden dann diese Informationen zur Anpassung des Fahrverhaltens genutzt.

3.5 Aufstellung eines realistischen Verhaltensmodells ohne automatisierte Fahrzeuge

Im vorliegenden Vorhaben sollen die Einflüsse automatisierter Fahrzeuge auf den Verkehrsablauf im Zusammenhang mit den Wirkungen einer SBA untersucht und simuliert werden. Als Referenz soll ein heute vorherrschendes Kollektiv mit konventionellen, von Menschen gesteuerten Fahrzeugen herangezogen werden. Außerdem wird dieses Fahrer- und Fahrzeugkollektiv auch im Rahmen der zu untersuchenden Mischverkehrsszenarien benötigt, d. h. solchen Szenarien, in denen sich sowohl konventionelle als auch automatisierte Fahrzeuge bewegen.

3.5.1 Problemstellung

Die Abbildung des Fahrverhaltens auf Autobahnen in der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation wurde bereits vielfach untersucht und angewendet. Auch Verflechtungsvorgänge und bestimmte Formen der Verkehrsbeeinflussung (insbesondere Zuflussregelung) konnten dabei realistisch nachgebildet werden, auch wenn es hierbei einer sorgfältigen Kalibrierung bedarf. Die Wirkungen einzelner SBA-Maßnahmen wurden bislang kaum mittels mikroskopischer Verkehrsflusssimulation untersucht. Als Gründe hierfür werden u. a. die folgenden Faktoren gesehen:

- Eine SBA kann viele Kombinationen an Zuständen der einzelnen Wechselzeichengeber darstellen. Geschwindigkeitsbeschränkungen, Fahrstreifensignalisierung, Überholverbote und Warnungen können gemeinsam angezeigt werden.

- Die Umstände, unter denen ein und derselbe Anzeigezustand entstehen kann, sind sehr vielschichtig. Verschiedene SBA-Maßnahmen können bei Verträglichkeit überlagernd angezeigt werden. Zusätzlich erfolgt ein Längsabgleich der Geschwindigkeiten und Überholverbote.
- Das Verhalten der Verkehrsteilnehmer wird durch die Anzeigezustände der SBA, aber auch durch die Verkehrssituation und äußere Einflüsse (u. a. Streckencharakteristik, Wetter) beeinflusst.
- Das Verhalten der Verkehrsteilnehmer und insbesondere auch die Reaktion auf eine SBA-Maßnahme ist erheblichen Streuungen über das Fahrzeug-/Fahrerkollektiv unterworfen.
- Die Schaltzustände einer SBA können sich u. U. rasch ändern und nur kurze Zeit andauern. Dadurch wird es erschwert, die Wirkungen eines konkreten Schaltzustands zu erfassen.

Eine wesentliche Herausforderung besteht also darin, die unterschiedlichen Wirkeinflüsse in einem Wirkmodell für menschliche Verkehrsteilnehmer abzubilden. Dieses Modell muss auf Grundlage der verfügbaren lokalen Verkehrsdaten, der Anzeigezustände sowie der Wetter- und Umfelddaten kalibriert werden.

3.5.2 Einflussfaktoren auf das Fahrverhalten

Um die Einflussfaktoren auf das individuelle Fahrverhalten zu beschreiben und den verfügbaren Daten der SBA zuzuordnen, wird zunächst der Begriff Fahrsituation eingeführt. Eine Fahrsituation ist gekennzeichnet durch

- die allgemeine Verkehrslage der vergangenen Minuten (Verkehrsnachfrage und -zusammensetzung, bisheriges Geschwindigkeitsniveau des Verkehrsstroms),
- eine vorausliegende, bereits erkennbare Verkehrssituation (z. B. ein Stauende),
- den wahrgenommenen Anzeigezustand am zurückliegenden (stromaufwärtigen) Anzeigequerschnitt,
- den Anzeigezustand am vorausliegenden Anzeigequerschnitt (wenn dieser bereits erkennbar ist),
- Wiedereinflüsse, insbesondere Niederschlag, Fahrbahnzustand und Sichtweite sowie

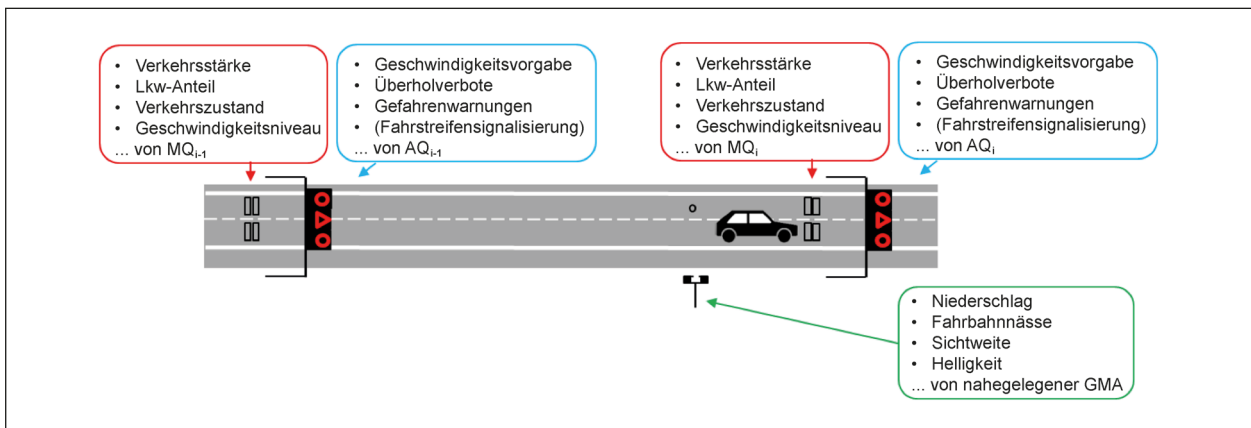


Bild 3-16: Beschreibung einer Fahrsituation mit Daten einer Streckenbeeinflussungsanlage

- den Querschnittstyp (hier: zwei- oder dreistreifige Richtungsfahrbahn).

Es wird davon ausgegangen, dass diese Einflüsse vor allem auf die taktische Fahrentscheidungsebene der menschlichen Verkehrsteilnehmer einwirken, d. h. bis zu einigen Minuten und über eine Strecke von wenigen Kilometern gelten.

Bild 3-16 zeigt exemplarisch, wie diese Eigenschaften auf die verfügbaren, lokalen Daten der SBA bezogen werden.

Bezüglich des Wettereinflusses werden in diesem Vorhaben nur Situationen betrachtet, in denen kein Einfluss des Wetters auf das Fahrverhalten gegeben ist (kein Niederschlag, trockene Fahrbahn, ausreichend große Sichtweite). Mittels der verfügbaren Wetter- und Umfelddaten werden Situationen mit Wettereinfluss aus der Datengrundlage herausgefiltert.

3.5.3 Herangehensweise

Die Aufstellung des Wirkmodells erfolgt in folgenden Schritten:

- Modellierung von Zusammenhängen zwischen Fahrsituation und Fahrverhalten
- Entwicklung einer Schnittstelle zur Anwendung der modellierten Wirkzusammenhänge auf die Fahrer-Fahrzeug-Einheiten innerhalb der mikroskopischen Verkehrsflusssituation

Auf diese beiden Schritte wird nachfolgend eingegangen. Das Modell entstand in wesentlichen Teilen im Rahmen eines parallel laufenden Promotionsvorhabens (vgl. [Gri19] und [Gri20]). Es wurde im

Rahmen dieses Vorhabens für die verwendete Simulationssoftware AIMSUN angepasst und angewendet.

3.5.3.1 Modellierung der Wirkungen

Für die Modellierung der Zusammenhänge zwischen Fahrsituation und Fahrverhalten stehen grundsätzlich folgende Möglichkeiten zur Verfügung:

- Feste (regelbasierte) Zuordnung zwischen Fahrsituation und Fahrverhalten
- Künstliche Neuronale Netze
- Bayessche Netze

Die erstgenannte Möglichkeit würde erfordern, dass für jede erdenkliche Fahrsituation ein zugehöriges Verhalten definiert werden muss. Ein Nachteil dieser Vorgehensweise ist die fehlende Generalisierbarkeit, d. h. für Fahrsituationen, die in den empirischen Daten nicht vorkommen, kann eine Aussage zum Fahrverhalten nicht unmittelbar abgeleitet werden. Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass die verschiedenen Einflüsse innerhalb einer Fahrsituation nicht differenziert bewertet und überprüft werden können.

Künstliche Neuronale Netze sind geeignet, Zusammenhänge aus Trainingsdaten so zu erlernen, dass eine Generalisierbarkeit erreicht werden kann. Jedoch bieten Künstliche Neuronale Netze ebenfalls keine Möglichkeit, einzelne Einflussfaktoren einer Fahrsituation zu betrachten. Außerdem können fehlerhafte oder fehlende Daten erhebliche Auswirkungen auf die Qualität der Modellierung haben. Werden bestimmte Wirkbeziehungen in den empiri-

schen Daten nicht ausreichend repräsentiert und dadurch abweichend zu Erfahrungen der Fachdomäne modelliert, bietet ein Künstliches Neuronales Netz keine Möglichkeit, dies unmittelbar an den Modellparametern (hier: Gewichte der Neuronen) zu erkennen oder gar zu korrigieren.

Für die gegebene Aufgabenstellung wurde daher der Weg gewählt, die Wirkzusammenhänge mittels Bayesscher Netze zu modellieren. Bayessche Netze haben den Vorteil, dass sowohl eine Generalisierbarkeit als auch eine Nachvollziehbarkeit der Modellstruktur und -parameter gewährleistet ist.

Das Erlernen von Wissen und Zusammenhängen aus Daten hat in den vergangenen Jahrzehnten stark an Bedeutung gewonnen und findet in zahlreichen Fachdomänen Anwendung, auch in der Verkehrswissenschaft. Grafische Modelle, zu denen auch die Bayesschen Netze gehören, sind in besonderem Maße geeignet, komplexe Zusammenhänge mit einer großen Zahl an Dimensionen (Einflussfaktoren, Zustände) handhabbar zu erfassen. Dies geschieht, indem verfügbare Informationen in Zustandsvariablen zerlegt und Abhängigkeitsbeziehungen (bzw. Unabhängigkeiten) zwischen diesen ausgenutzt werden. Hierbei werden die Zustandsvariablen als Knoten und Abhängigkeiten zwischen diesen als Kanten eines Graphen modelliert. Ein Bayessches Netz ist dadurch gekennzeichnet, dass dieser Graph ein gerichteter azyklischer Graph sein muss [Bor09] [Scu15]. Anwendungen Bayesscher Netze im Verkehrswesen umfassen z. B. die Verkehrszustandsanalyse und -prognose oder auch die Qualitätsmodellierung im Verkehrsmanagement (z. B. [Neu14]).

Die Zustandsvariablen (Kanten) eines Bayesschen Netzes sind Zufallsvariablen, die sowohl diskret als auch wertkontinuierlich sein können (oder auch beides in Kombination). Die Wahrscheinlichkeit, dass eine Zufallsvariable X_i einen bestimmten Wert annimmt, ist dabei abhängig von den Zuständen der Elternknoten, d. h. aller Knoten $Pa(X_i)$, von denen aus eine Kante zum aktuell betrachteten Knoten X_i führt. Somit ist jeder Zustandsvariable X_i eine bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung $P(X_i|Pa(X_i))$ zugeordnet. Hat ein Knoten keine Elternknoten, so ist ihm eine unbedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung (Randverteilung) $P(X_i)$ zugewiesen [Scu15] [Neu14].

Mit einem Bayesschen Netz können Zusammenhänge erlernt werden, indem die bedingten und un-

bedingten Wahrscheinlichkeitsverteilungen so angepasst werden, dass sich eine möglichst gute Übereinstimmung mit einer verfügbaren Datenbasis erreichen lässt. Dieses Erlernen ist vergleichsweise robust gegenüber (zufälligen) Ungenauigkeiten. Fehlende Daten, d. h. Zusammenhänge, die sich nicht aus den Daten heraus ableiten lassen, können u. U. durch Expertenschätzungen kompensiert werden; ebenso lässt sich eine Validierung der Wahrscheinlichkeiten durch Expertenschätzungen vornehmen.

Ein auf diese Weise trainiertes Bayessches Netz kann zur Schätzung eines nicht bekannten Zustands aufgrund gegebener messbarer Zustände genutzt werden. In diesem Fall werden die messbaren Zustände als sogenannte Evidenzen vorgegeben. Daraufhin werden die Wahrscheinlichkeitsverteilungen des Bayesschen Netzes unter diesen vorgegebenen Bedingungen neu berechnet. Dieser Vorgang wird als Schlussfolgern (auch Inferenz) bezeichnet.

Das Bayessche Netz wurde innerhalb der Statistikumgebung R unter Verwendung entsprechender Zusatzpakete (vor allem bnlearn) entworfen. Der Aufbau des Bayesschen Netzes, d. h. die Zustandsknoten und Kanten, wird in Kapitel 3.5.4 beschrieben.

3.5.3.2 Anwendung der Wirkungen

Um die modellierten Wirkungen von SBA-Maßnahmen im Verkehrskontext auf die mikroskopische Verkehrsflusssimulation anzuwenden, sind folgende Schritte erforderlich:

- Ermitteln der aktuellen Fahrsituation in der Simulation
- Identifikation der anzuwendenden Fahrverhaltensparameter (Verteilungsfunktion) anhand des Wirkmodells
- Identifikation der zu beeinflussenden Fahrzeuge, d. h. der Fahrzeuge, die einen Anzeigequerschnitt passieren
- Je zu beeinflussendem Fahrzeug:
 - Generieren indiv. Verhaltensparameter als Zufallszahl gemäß zuvor identifizierter Verteilungsfunktion
 - Anwenden der Verhaltensparameter

Zu diesem Zweck wurde eine Schnittstellen-Anwendung realisiert, die – ebenso wie die ebenfalls extern angebundene Unterzentralensoftware – während der Simulationslaufzeit mit der Simulationssoftware (hier: AIMSUN) interagiert. Die Schnittstellenapplikation wurde in der Skriptsprache Python umgesetzt und kann unmittelbar in das AIMSUN-Simulationsszenario eingebunden werden.

Um die Wirkungen einer gegebenen Fahrsituation aus dem Wirkmodell abzufragen, könnte grundsätzlich eine direkte Abfrage an das Modell realisiert werden. Die Fahrsituation würde dann als Evidenzen bezüglich der betroffenen Zustandsknoten im Bayesschen Netz vorgegeben und durch Inferenz die Verteilungen der Fahrverhaltensparameter abgeleitet. Dies hätte jedoch einen erheblichen Einfluss auf die Laufzeit der Verkehrsflusssimulation, da diese Abfrage für jeden Simulationsschritt und

jedes einen Anzeigequerschnitt passierende Fahrzeug durchgeführt werden müsste. Aus diesem Grund wird die Abbildung von Fahrsituationen auf Verhaltensverteilungen vorab mittels des Bayesschen Netzes generiert und in einer Datenbank abgelegt. Die Schnittstellen-Applikation greift dann auf diese Datenbank-Tabelle zu. Im Rahmen der Kalibrierungsphase wird sichergestellt, dass die Datenbank alle Fahrsituationen abdeckt, die im Rahmen der für dieses Vorhaben relevanten verkehrlichen Anwendungen vorkommen können

Die Interaktion zwischen Wirkmodell (Datenbank) und Verkehrsflusssimulation über die Schnittstellen-Applikation wird in Bild 3-17 und Bild 3-18 veranschaulicht.

Wie zuvor beschrieben, werden für jedes zu beeinflussende Fahrzeug individuelle Verhaltensparameter

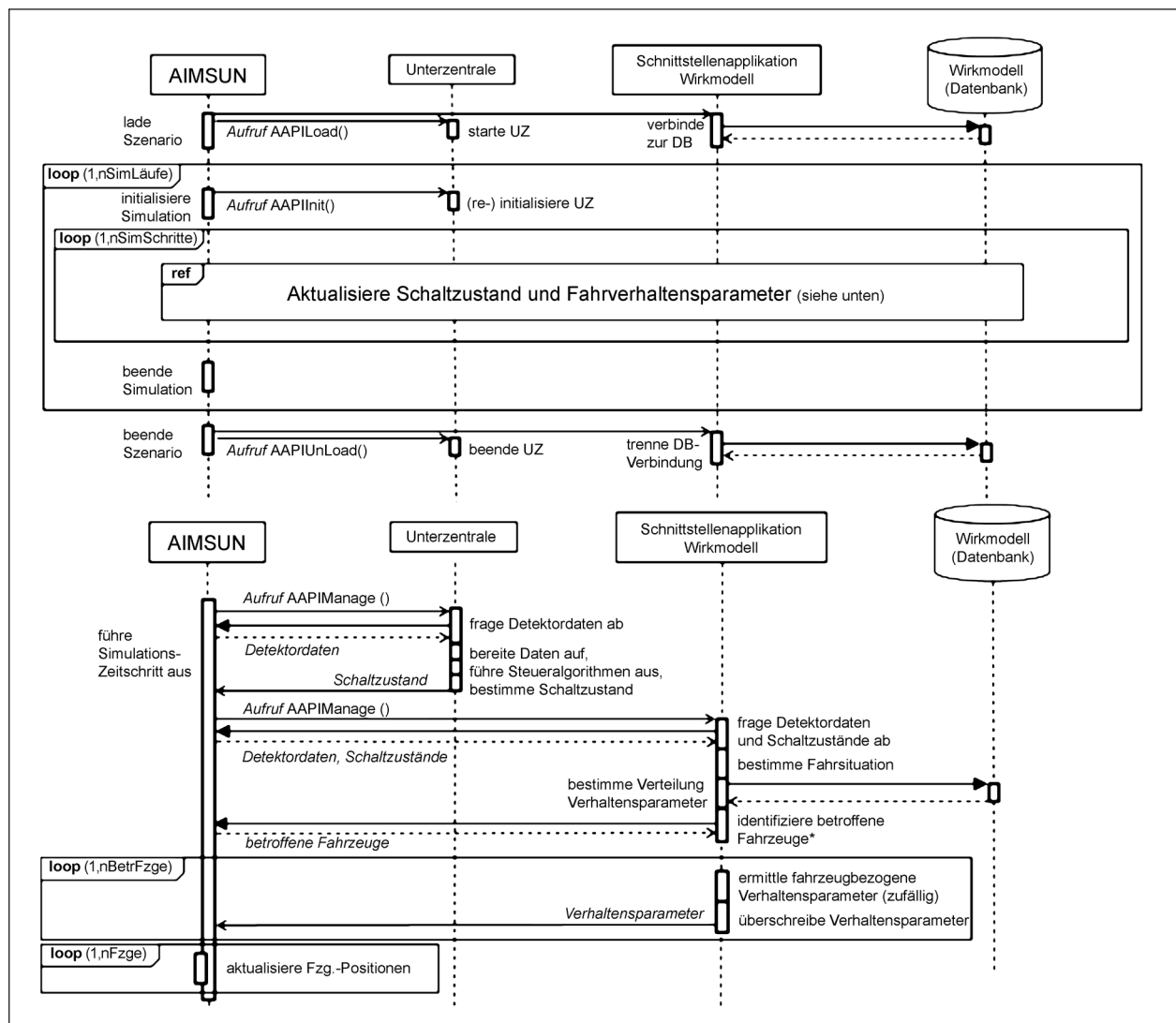


Bild 3-17: Interaktion zwischen Wirkmodell und der Verkehrsflusssimulation AIMSUN

ter aus einer Normalverteilung gezogen. Bei der Ermittlung der individuellen Wunschgeschwindigkeiten besteht jedoch das Problem, dass die Streuung des Verhaltens in vielen Situationen groß ist. Wird die Wunschgeschwindigkeit ohne Berücksichtigung des bisherigen Fahrverhaltens neu aus einer Normalverteilung gezogen, kann es vorkommen, dass ein bislang schneller Verkehrsteilnehmer plötzlich ein eher konservatives Verhalten zeigt und umkehrt. Gleichzeitig kann es vorkommen, dass trotz ähnlicher Fahrsituation erhebliche Änderungen im Geschwindigkeitsverhalten an den Beeinflussungsquerschnitten induziert werden, was nicht der Realität entspräche. Um diese Probleme zu vermeiden, wurde in der Schnittstellen-Anwendung eine Funktion realisiert, die zunächst bei Fahrzeugeintritt in die Simulation ein Geschwindigkeits-Abweichungsfaktor berechnet und diesen beim Ermitteln der Wunschgeschwindigkeit aus einer neuen Verteilung berücksichtigt. Der Geschwindigkeits-Abweichungsfaktor f_v berechnet sich wie folgt:

$$f_v = \frac{v_{\text{des,init}} - \overline{v_{\text{des}}}}{s_{v_{\text{des}}}}$$

Hierbei ist $v_{\text{des,init}}$ die initiale individuelle Wunschgeschwindigkeit, die beim Eintritt des Fahrzeugs in der Simulation generiert wird. Diese wird als normalverteilte Zufallsgröße mit Mittelwert $\overline{v_{\text{des}}}$ und Standardabweichung $s_{v_{\text{des}}}$ durch die Simulationssoftware bestimmt.

Erhält ein Fahrzeug beim Passieren eines Anzeigequerschnitts nun eine neue Wunschgeschwindigkeitsverteilung mit Mittelwert $\overline{v_{\text{des,neu}}}$ und Standardabweichung $s_{v_{\text{des,neu}}}$, zieht es daraus nicht erneut eine individuelle Wunschgeschwindigkeit, sondern berechnet diese anhand des Anpassungsfaktors wie folgt:

$$v_{\text{des,neu}} = \overline{v_{\text{des,neu}}} + f_v \cdot s_{v_{\text{des,neu}}}$$

3.5.4 Aufbau des Wirkmodells

Wie in Kapitel 3.5.3.1 dargestellt, bieten Bayessche Netze die Möglichkeit, sowohl diskrete Zustandsvariablen (z. B. Anzeigezustände, klassifizierte Verkehrszustände) als auch wertkontinuierliche Zustandsvariablen (z. B. Verkehrsstärken, Geschwindigkeiten) zu definieren. Es können auch beiderlei Zustandsvariablen (d. h. Knoten) in einem Netz eingesetzt werden, wenngleich dies eine erheblich aufwendigere Vorgehensweise vor allem beim späteren Erlernen der Modellparameter nach sich zieht. Soll das vermieden werden, könnten sämtliche

wertkontinuierlichen Variablen in Wertklassen eingeteilt (diskretisiert) werden [Scu15].

Im vorliegenden Fall sind tatsächlich sowohl diskrete als auch wertkontinuierliche Zustandsvariablen notwendig: Die Fahrverhaltensparameter sollen zwingend als Verteilungen kontinuierlicher Zufallsgrößen zur Verfügung stehen, aus denen dann für jedes individuelle Fahrzeug eine konkrete Ausprägung gewählt wird. Andernfalls lassen sich die in der Realität beobachtbaren Streuungen im Fahrverhalten nicht hinreichend genau abbilden. Auf eine Diskretisierung dieser Zustandsvariablen wird dementsprechend verzichtet. Andere Zustandsknoten, insbesondere die Anzeigezustände sowie der Streckentyp als Charakterisierung der baulichen Gegebenheiten, lassen sich nur als diskrete Zustandsklassen definieren.

Das Bayessche Netz kann jedoch so aufgebaut werden, dass diskrete Zustandsvariablen als Vorgänger-Knoten von wertkontinuierlichen Knoten vorkommen, aber nicht umgekehrt. In derartigen Fällen kann ein hybrider Modellansatz verfolgt werden (vgl. z. B. [Bay18]):

- Es wurde ein inneres Netz entworfen, das ausschließlich aus wertkontinuierlichen Zufallsvariablen (Knoten) besteht.
- Für jede im Zusammenhang dieser Untersuchung relevante Kombination von Zuständen der diskreten Zustandsknoten wird das innere Netz gesondert kalibriert.

Bild 3-18 veranschaulicht die grundsätzliche Modelltopologie sowie die Vorgehensweise der Kalibrierung. Die Verbindungen zwischen den Knoten des inneren Netzes sind als gerichtete Kanten von links nach rechts zu verstehen; auf die Darstellung als Pfeil wurde aus Gründen der Anschaulichkeit jedoch verzichtet. Die tatsächlich verwendete Menge an Knoten und Kanten wurde im Rahmen der Kalibrierungsphase festgelegt (vgl. Kapitel 4.3.2.4).

Die Modellparameter der inneren Bayesschen Netze, d. h. die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der wertkontinuierlichen Knoten, werden im Rahmen der Kalibrierungs- und Validierungsphase (AP 3, vgl. Kapitel 4) in zwei Phasen kalibriert:

- Bestimmung empirischer Zusammenhänge zwischen Fahrsituation und Fahrverhalten (orange-farbene Kanten in Bild 3-18)
- Bestimmung der Zusammenhänge zwischen empirisch erfasstem Fahrverhalten und Fahr-

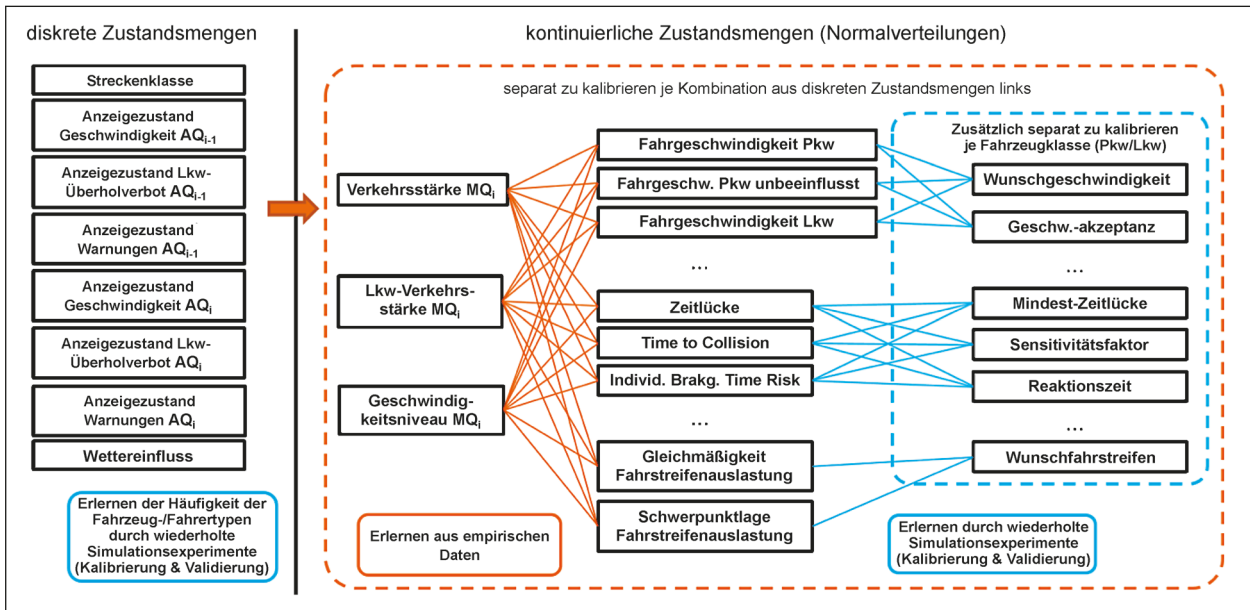


Bild 3-18: Aufbau des Wirkmodells und Vorgehensweise zur Kalibrierung

Zustandsvariable	mögliche Werte
Streckenklasse	<ul style="list-style-type: none"> • zweistreifig • dreistreifig
Anzeigezustand Geschwindigkeit	<ul style="list-style-type: none"> • 130 km/h • 120 km/h • 100 km/h • 80 km/h • 60 km/h • aus (unterdrückt, z. B. i. V. m. Stauwarnung) • nicht aktiv oder Aufhebung
Anzeigezustand Lkw-Überholverbot	<ul style="list-style-type: none"> • aktiv • nicht aktiv oder Aufhebung
Anzeigezustand Warnungen	<ul style="list-style-type: none"> • Staugefahr • Stau • Baustelle • allg. Gefahrenstelle • nicht aktiv
Wettereinfluss	<ul style="list-style-type: none"> • kein Einfluss • Einfluss vorhanden

Tab. 3-3: Wertemengen der diskreten Zustandsvariablen des Wirkmodells

verhaltensparametern der Verkehrssimulation durch wiederholte Simulationläufe (blaue Kanten in Bild 3-18)

Im Rahmen der Kalibrierung und Validierung wird auch überprüft, ob ein durch die Topologie des Netzes modellierter Zusammenhang zwischen den kontinuierlichen Zustandsknoten tatsächlich signifikant ist.

Die möglichen Werte der diskreten Zustandsvariablen sind in Tabelle 3-3 angegeben.

4 Aufbau des Simulationsmodells

Die bereitgestellten Verkehrsdaten, Umfelddaten und Schaltdaten für die Referenzstrecken auf der A57 und der A92 wurden in Datenbanken übernommen und aufbereitet.

Die Datenaufbereitung verfolgte dabei das Ziel, die Grundlage für die Kalibrierung und Validierung des Simulationsmodells zu bilden sowie die Erstellung und die Kalibrierung des Fahrverhaltensmodells für konventionelle Fahrzeuge zu unterstützen.

Die Kalibrierung und Validierung der Simulationsmodelle erfolgte gemäß der empfohlenen Vorgehensweise nach [FGSV06] mit der AIMSUN NEXT Version 8.4.1. Das auf Basis der Verkehrsdatenanalyse entwickelte Fahrverhaltensmodell wurde im Wirkmodell mit Fahrsituationen verknüpft und die empirischen Zusammenhänge wurden kalibriert. Im Anschluss wurde die mikroskopische Verkehrsflussssimulation an eine MARZ-konforme UZ angebunden mittels derer SBA Schaltungen für die Simulation ermittelt werden. Die Schaltungen werden in der Simulation umgesetzt und vom ebenfalls angebundenen Wirkmodell erkannt. Die damit verknüpften Verhaltensparameter werden wieder auf die in der Simulation abgebildeten Fahrerfahrzeugeinheiten angewendet. Abschließend erfolgte die Auswertung für das Szenario mit menschlichen Fahrern (ohne Automatisierung). Die Vorgehensweise ist in Bild 4-1 dargestellt.

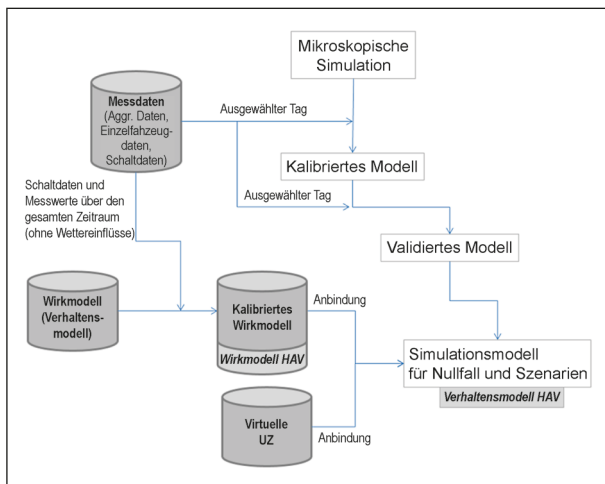


Bild 4-1: Vorgehen Erstellung Simulationsmodell

4.1 Datenerhebung und -aufbereitung der ausgewählten Streckenabschnitte

Eine erste Datenauswertung und -aufbereitung der beiden Referenzstrecken A92 und A57 hinsichtlich makroskopischer Charakteristika und eine Vorbereitung der Datenbasis für die in Kapitel 4.2.3 beschriebene Kalibrierung wurde bereits in Kapitel 3.2 vorgestellt. In diesem Kapitel wird beschrieben, wie darüber hinaus die vorhandene Datengrundlage für die Kalibrierung des situationsdifferenzierten Verhaltensmodells unter Berücksichtigung aktueller SBA-Zustände aufbereitet und erweitert wurde. Die Datenbankstruktur zur Datenablage sowie die Verfahren zur Datenaufnahme und -veredelung wurden im Rahmen eines parallel laufenden Promotionsvorhabens als Java-Anwendung entwickelt und innerhalb dieses Vorhabens genutzt. Das Datenmodell und die Verfahren sind in [Gri20] beschrieben. In den nachfolgenden Kapiteln werden die für dieses Vorhaben relevanten Verfahrensschritte wiedergegeben.

4.1.1 Datenaufnahme und Ablage

Von den jeweils zuständigen Straßenbetreibern (Autobahndirektion Südbayern bzw. Landesbetrieb Straßenbau Nordrhein-Westfalen) wurden Verkehrsdaten (aggregiert und Einzelfahrzeugdaten), Wetter- und Umfelddaten sowie Anzeigezustände der SBA zur Verfügung gestellt. Diese Daten wurden in eine MySQL-Datenbank aufgenommen. Um die Herstellung des räumlichen Bezugs der Daten zu erleichtern, wurden auch die zugehörigen Infrastrukturdaten (Messquerschnitte bzw. Detektoren,

Wetter- und Umfelddaten, Anzeigequerschnitte) mit Referenzierung auf das Streckennetz erfasst.

4.1.2 Aufbereiten aggregierter Verkehrsdaten

Für die beiden Referenzstrecken stehen fahrstreifenbezogene Verkehrsdaten in Ein-Minuten-Intervallen nach TLS zur Verfügung. Dies umfasst Verkehrsstärken und lokale Geschwindigkeiten (für alle Fahrzeuge sowie differenziert nach Pkw- und Lkw-ähnlichen Fahrzeugen) sowie die Standardabweichung der Kfz-Geschwindigkeiten und die mittlere Nettozeitlücke. Diese wurden gemäß des MARZ

- um zusätzliche Kenngrößen erweitert (u. a. lokale Verkehrsdichte und Bemessungsverkehrsstärke) sowie
- querschnittsbezogen aggregiert.

Für die Berechnung der Bemessungsverkehrsstärke wurde der im MARZ definierte Gewichtungparameter k_1 auf 1,6 und k_2 auf 0,01 gesetzt.

4.1.3 Berechnen empirischer Verhaltenskenngrößen aus Einzelfahrzeugdaten

Für einen Teil der A92 (sowie in sehr begrenztem Umfang auch für die A57) standen zudem Einzelfahrzeugdaten gemäß TLS (Typ 63) zur Verfügung. Diese beinhalten einen Datensatz je Fahrzeug, das einen Detektor passiert hat, u. a. mit individuellen Geschwindigkeiten, Zeitlücken und Fahrzeugeigenschaften (Fahrzeugklasse, Länge). Aus diesen Daten wurden folgende Kenngrößen berechnet:

- Bewertungsgrößen des Abstandsverhaltens und der Verkehrssicherheit (insbesondere Auffahrzeit, Individual/Platoon Braking Time Risks) gemäß Kapitel 3.3.4
- Geschwindigkeiten unbeeinflusster Fahrzeuge

Als unbeeinflusst gelten in diesem Zusammenhang Fahrzeuge, für die aufgrund einer relativ großen Zeitlücke zum vorausfahrenden Fahrzeug eine freie Geschwindigkeitswahl unterstellt werden kann. Die Geschwindigkeiten unbeeinflusster Fahrzeuge werden benötigt, um in der späteren Kalibrierung die Parameter der Wunschgeschwindigkeitsverteilungen festzulegen (vgl. Kapitel 4.3.3.3).

Als Schwellwert bzgl. der Nettozeitlücke zum vorausfahrenden Fahrzeug, oberhalb der von einer unbeeinflussten Geschwindigkeitswahl ausgegangen

werden kann, wird z. B. in [Gei15a] 2 s für Pkw bzw. 3 s für Lkw angesetzt. Zusätzlich wurde dort für Pkw auch die Überholmöglichkeit anhand von Zeitlücken zu Fahrzeugen auf dem linken angrenzenden Fahrstreifen einbezogen. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden die Grenz-Zeitlücken zum vorausfahrenden Fahrzeug auf dem gleichen Fahrstreifen etwas höher angesetzt (3 s für Pkw bzw. 4 s für Lkw), da bei kleineren Zeitlücken – insbesondere auch bei höheren Geschwindigkeiten – durchaus eine Beeinflussung vermutet wird. Auf eine Einbeziehung der Überholmöglichkeit wurde verzichtet, da dies eine Verschneidung der Einzelfahrzeugdaten benachbarter Fahrstreifen erfordert hätte, die für die vorhandene Datenmenge nur mit unverhältnismäßigem Aufwand durchführbar gewesen wäre. Wie in [Gei15a] wurden jedoch Fahrzeuge mit Geschwindigkeiten unter 70 km/h nicht als unbeeinflusste Geschwindigkeiten berücksichtigt. Die Geschwindigkeitsverteilungen unbeeinflusster Fahrzeuge werden separat für Pkw- und Lkw-ähnliche Fahrzeuge ermittelt.

Aufgrund des großen Datenumfangs wurden sämtliche einzelfahrzeugbezogenen Kenngrößen fahrstreifen- und anschließend querschnittsbezogen aggregiert (ebenfalls Ein-Minuten-Intervalle) und den bestehenden Verkehrsdaten zugeordnet.

4.1.4 Aufbereitung Wetter- und Umfelddaten

Die Wetter- und Umfelddaten liegen ebenso wie die aggregierten Verkehrsdaten in Ein-Minuten-Intervallen vor und umfassen u. a. Niederschlagsintensität, Niederschlagsart, Fahrbahnzustand, Wasserfilmdicke und Sichtweite. Aus diesen Größen wurden gemäß Vorgaben des MARZ (unter Verwendung der dort angegebenen Standard-Schwellenwerte) Nässe- und Sichtweitestufen ermittelt. Schließlich erfolgte eine Klassifizierung der Datensätze in eine der Klassen

- Wettereinfluss
- Kein Wettereinfluss sowie
- Unbekannt.

In diesem Vorhaben werden nur Daten berücksichtigt, denen der Zustand „kein Wettereinfluss“ zugeordnet wurde. Der Zustand „kein Wettereinfluss“ liegt unter folgenden Bedingungen vor:

- Es liegt Nässestufe 0 vor (kein Niederschlag/kein Wasserfilm) und

- Niederschlagsart entspricht keinem Niederschlag und
- Fahrbahnzustand entspricht trockener Fahrbahn und
- Es liegt Sichtweitestufe 0 oder 1 vor (d. h. Sichtweiten > 250 m).

4.1.5 Aufbereitung und Aggregation Anzeigezustände

Im Gegensatz zu den Verkehrs- sowie den Wetter- und Umfelddaten wurden die Anzeigezustände ereignisbasiert, d. h. bei einem Schaltzustandswechsel protokolliert. Die Zustände liegen einzeln je Wechselzeichengeber vor und wurden auf folgende vier Zustandsmengen je Anzeigequerschnitt aggregiert:

- Geschwindigkeitssignalisierung
- Fahrstreifensignalisierung
- Überholverbote
- Warnungen

4.1.6 Zuordnung der empirischen Daten zu Fahrsituationen

Sämtliche Verkehrsdatensätze, d. h. querschnittsbezogene und fahrstreifenbezogene aggregierte Daten sowie Einzelfahrzeugdaten, wurden in einer gesonderten Datenbanktabelle automatisiert mit der vorherrschenden Fahrsituation verknüpft. Dies ermöglicht im Rahmen der Kalibrierung des Verhaltensmodells (vgl. Kapitel 4.3.3) die gefilterte Ausgabe von Verkehrsdaten für eine definierte Fahrsituation, die charakterisiert ist durch

- den im zeitlichen Umfeld des Datensatzes vorherrschenden Verkehrszustand (Verkehrsbelastung, Lkw-Belastung, Geschwindigkeitsniveau),
- den stromaufwärts und lokal vorherrschenden Anzeigezustand (jeweils Zustandsmengen gemäß Kapitel 4.1.5) sowie
- den Wetterzustand (Zustandsmengen gemäß Kapitel 4.1.4).

Der Verkehrszustand wird als zentrierter gleitender Durchschnitt über die drei genannten Kenngrößen bestimmt. Dabei wird ein gleitendes Zeitfenster für Verkehrsstärken von 15-Minuten-Intervallen sowie

für Geschwindigkeiten von 5-Minuten-Intervallen verwendet.

Die Anzeigezustände, die ursprünglich ereignisbasiert und nicht minütlich abgelegt sind, werden jedem Minutenintervall zugeordnet, wobei auch die bisherige Dauer des aktuellen Anzeigezustands erfasst wird.

4.2 Erstellung, Kalibrierung und Validierung des Simulationsmodells in AIMSUN

4.2.1 Auswahl der Referenztage

Für die A57 wurde der 20.3.2017 zur Kalibrierung und der 13.2.2017 zur Validierung ausgewählt. Für die A92 wurde der 23.9.2014 zur Kalibrierung und der 13.03.2014 zur Validierung gewählt.

4.2.2 Erstellung der Quell-Ziel-Matrizen

Für beide Referenzstrecken wurden wie in Kapitel 3.2.4 beschrieben Quelle-Zielmatrizen für Pkw und Lkw über die lokalen Detektoren berechnet. Es wurden dabei 15-Minuten-Intervalle verwendet. Insgesamt wurden 98.000 Fz an der A57 und 70.000 Fz an der A92 über den Zeitraum von 24 Stunden eingespeist.

4.2.2.1 Besonderheiten A92

Auf der 20 km langen Strecke zwischen der AS Erding und dem Kreuz Neufahrn mit der Fahrtrichtung Süden liegen 20 fahrstreifenfeine Messquerschnitte und 11 Anzeigequerschnitte, wie in Bild 4-2 zu sehen ist. Die Quelle-Zielmatrix wurde anhand der Messquerschnitte berechnet. Folgenden Annahmen wurden dabei getroffen:

- Alle Fahrzeuge, die auf der Hauptfahrbahn am Anfang des Netzes in Erding in das Netz einfahren, können an den AS abfahren.
- Alle Fahrzeuge, die an den AS Freising-Ost, Freising-Mitte, Freising Süd und Eching Ost auffahren, fahren bis zum AK Neufahrn.
- Alle Fahrzeuge, die an der AS Erding und am AD Flughafen in das Netz einfahren, werden am AK Neufahrn zu gleichen Teilen auf die Hauptfahrbahn und die Parallelfahrbahn verteilt.

4.2.2.2 Besonderheiten A57

Die 23 km lange Strecke zwischen dem AK Kaarst und dem AK Moers hat 25 Messquerschnitte und 16 Anzeigequerschnitte auf der Hauptfahrbahn. Die Strecke enthält, wie in Bild 4-3 zu sehen ist, fünf Anschlussstellen und zwei Autobahnkreuze. Für die berechneten Quelle-Zielmatrizen wurden folgende Annahmen getroffen:

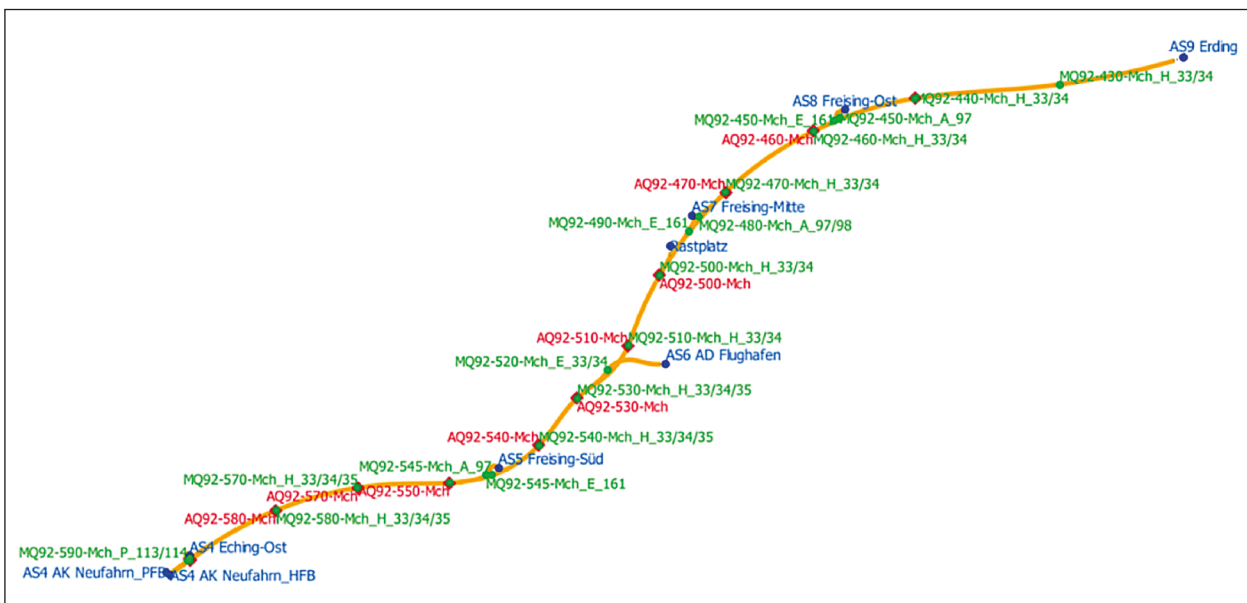


Bild 4-2: Simulationsnetz A92 mit Mess- und Anzeigequerschnitten

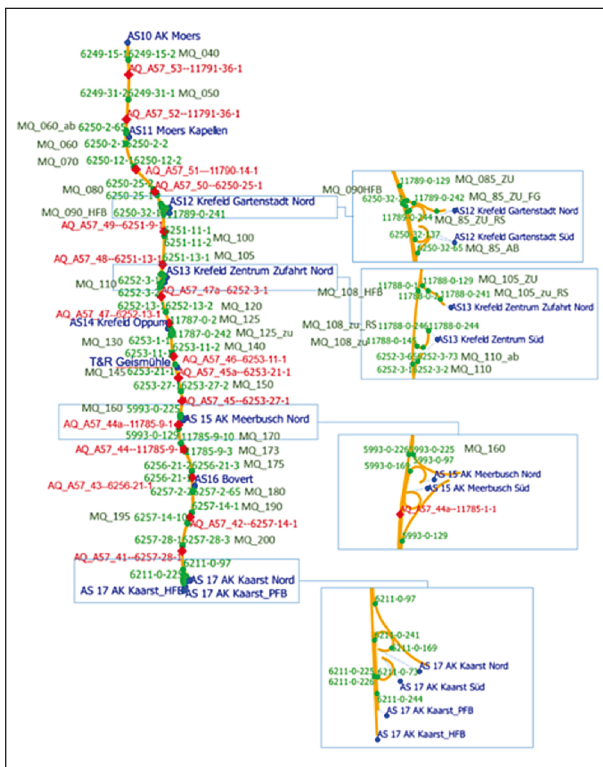


Bild 4-3: Simulationsnetz A57 mit Mess- und Anzeigequerschnitten

- Alle Fahrzeuge, die an den Anschlussstellen im Netz zufahren, fahren bis zum AK Moers.
- Aufgrund der Streckengeometrie wurde kein Strom für die Ausfahrt Meerbusch Nord modelliert. Er ist im Ziel Meerbusch Süd enthalten.
- Am AK Krefeld Gartenstadt fahren aufgrund der Streckengeometrie alle ausfahrenden Fahrzeuge über die Ausfahrt Gartenstadt Süd. Alle ein-fahrenden Fahrzeuge fahren über die Einfahrt Gartenstadt Nord.

4.2.3 Kalibrierung der Referenzstrecken in der Simulation

Für die Grundkalibrierung wurden die Parameter aus [Gei17] verwendet und entsprechend den lokalen Gegebenheiten angepasst. Da es eine Modellweiterentwicklung in AIMSUN gab, haben sich die Parametereinstellmöglichkeiten etwas geändert. Die Parameter in AIMSUN lassen sich in Fahrzeug- und Fahreigenschaften sowie Streckenparameter unterteilen. In den nächsten Unterkapiteln wird darauf näher eingegangen. Der Simulationsschritt und damit die Reaktionszeit wurden auf 0,75 s gesetzt. Für das Fahrzeugfolgemodell werden weiterhin 5 Fahrzeuge auf 250 m berücksichtigt. Der maxima-

le relative Geschwindigkeitsunterschied zwischen zwei Fahrstreifen beträgt 70 km/h.

4.2.3.1 Streckenparameter

Die zulässige Höchstgeschwindigkeit wurde auf beiden Strecken auf 150 km/h gesetzt. Auf der A57 wurde aufgrund der Grundversorgung von 100 km/h die Höchstgeschwindigkeit zwischen dem AK Meerbusch und der AS Krefeld Gartenstadt auf 120 km/h reduziert. Es wurde eine höhere Streckengeschwindigkeit gewählt, um auch die Fahrzeuge abbilden zu können, die in der Realität die zulässige Höchstgeschwindigkeit überschreiten. Für jedes Streckensegment können in AIMSUN zusätzlich zu den Einstellungen aus den Fahrzeugeigenschaften verschiedene Einstellungen zum Fahrstreifenwechselverhalten vorgenommen werden. Für die Kalibrierung wurden die Streckenparameter Cooperation und Aggressiveness verwendet. Die Aggressiveness erlaubt es, Fahrzeugen kleinere Lücken für einen Fahrstreifenwechsel zu benutzen, ohne dass das Folgefahrzeug bremsen muss. Die Aggressiveness stellt die Sensitivität des Folgefahrzeugs auf einen Bremsvorgang des vorherigen Fahrzeugs dar. Der Cooperation Prozentsatz gibt den Anteil an Fahrzeugen stromaufwärts an, die mit Fahrzeugen, die einen Fahrstreifenwechsel vornehmen müssen, kooperieren. Diese beiden Parameter wurden für die einzelnen Streckensegmente angepasst. Auf den Strecken ohne Ein- oder Ausfädelstreifen wurden eine Cooperation von 50 % und keine Aggressiveness eingestellt. In Ausfädelbereichen wurden meist dieselben Werte verwendet. Bei einem großen Anteil an ausfahrenden Fahrzeugen wird die Cooperation auf 80 % erhöht. Im Einfädelbereich werden sowohl die Cooperation als auch die Aggressiveness erhöht. Für die Cooperation werden Werte von 80 – 100 %, für die Aggressiveness Werte zwischen 0 und 40 % verwendet. Funktionen wie imprudent lane change wurden nicht verwendet. Bei Einfädelstreifen kann der gesamte Beschleunigungstreifen zum Einfädeln benutzt werden. Die Fahrzeuge können in einer beliebigen Reihenfolge einfädeln und nicht nur das jeweils erste Fahrzeug.

4.2.3.2 Fahrzeugeigenschaften

Es wurden drei Pkw- und zwei Lkw-Fahrzeugklassen erstellt. Diese dienen sowohl der Abbildung der Streuung der Geschwindigkeiten als auch der realistischen Modellierung der Fahrstreifenaufteilung. Auf der A92 unterscheiden sich die Pkw-Wunsch-

	Mean	Min	Max
Pkw	150	80	200
Pkw1	150	80	200
Pkw2	150	80	200
Lkw	100	83	102
Lkw1	110	75	115

Tab. 4-1: Wunschgeschwindigkeiten der Fahrzeugklassen A92

	Mean	Min	Max
Pkw	150	80	200
Pkw1	180	120	200
Pkw2	190	130	200
Lkw	85	80	102
Lkw1	110	95	120

Tab. 4-2: Wunschgeschwindigkeiten der Fahrzeugklassen A57

geschwindigkeiten zwischen den Fahrzeugklassen nicht, wie in Tabelle 4-1 zu sehen ist. Die Klassen dienen somit hier lediglich der Modellierung der Fahrstreifenaufteilung. Auf der A57 haben die einzelnen Klassen unterschiedliche Wunschgeschwindigkeiten, um den Geschwindigkeitsverlauf realistisch abzubilden. Diese sind in Tabelle 4-2 dargestellt. Die Wunschgeschwindigkeiten der verschiedenen Klassen sollen die Bandbreite der menschlichen Fahrer darstellen und haben daher ein sehr hohes Maximum. Ihnen steht die maximale Streckengeschwindigkeit, die je nach Gebiet ausgewählt werden kann, entgegen.

4.2.3.3 Fahrstreifenaufteilung

In AIMSUN werden die Fahrzeuge gleichmäßig auf die vorhandenen Fahrstreifen verteilt. Dadurch entsteht mit den Default Einstellungen eine Abweichung zur Realität insbesondere bei höheren Verkehrsstärken. Um eine realistische Fahrstreifenaufteilung modellieren zu können, wurden wie in Kapitel 4.2.3.2 beschrieben drei Pkw und zwei Lkw Klassen erstellt. Den Fahrzeugklassen werden verschiedene Fahrstreifen zugeordnet, die sie benutzen dürfen. Die Zuordnung der Fahrzeugklassen auf Fahrstreifen erfolgt für jeden Streckenabschnitt. Für zweistreifige Strecken wird die Aufteilung aus Tabelle 4-3 verwendet. Für dreistreifige Strecken wird die Aufteilung aus Tabelle 4-4 verwendet. Auf der A92 haben alle Pkw und alle Lkw Klassen jeweils die gleichen Eigenschaften, die Einteilung dient nur der Modellierung der Fahrstreifenauftei-

2. Fahrstreifen	1. Fahrstreifen
Pkw	Pkw
Pkw 1	Pkw 2
Pkw 2	Lkw
Lkw 1	Lkw 1

Tab. 4-3: Fahrzeugklassenzuordnung auf Fahrstreifen zweistreifiger Bereich

3. FS	2. FS	1. FS
Pkw	Pkw	Pkw
Pkw 2	Pkw 1	Lkw
	Pkw 2	Lkw 1
	Lkw 1	

Tab. 4-4: Fahrzeugklassenzuordnung auf Fahrstreifen dreistreifiger Bereich

lung. Auf der A57 gibt es zusätzlich verschiedene Wunschgeschwindigkeiten, wie in Kapitel 4.2.3.2 beschrieben. Alle anderen Einstellungen sind identisch.

Der prozentuale Anteil der einzelnen Fahrzeugklassen ist abhängig von der Zeit und variiert über den Tag. In den Nachtzeiten fahren zu 100 % die Klassen Pkw und Lkw. Zu den Verkehrsspitzen variiert der Anteil der Klasse Pkw zwischen 30 und 50 %. Der Anteil der Klasse Lkw liegt bei 90 %.

Die Quelle-Ziel-Matrizen sind für alle Fahrzeugklassen gleich, nur die Anteile variieren über den Tag. Es wurde darauf verzichtet, das Ein- und Ausfahren auf die Fahrzeugklassen, die auf dem rechten Fahrstreifen fahren, zu reduzieren. Dadurch würde in der Simulation der Verkehrsablauf ruhiger ablaufen, da Fahrstreifenwechselvorgänge von Fahrzeugen auf dem linken Fahrstreifen, die die Ausfahrt benutzen, unterbunden würden, da alle aus- und einfahrenden Fahrzeuge bereits den rechten Fahrstreifen nutzen. In der Realität ordnen sich die Fahrzeuge vor dem Ausfädelvorgang auf dem rechten Fahrstreifen ein, benutzen aber vorher alle verfügbaren Fahrstreifen, daher wurde in der Simulation auf eine Matrixanpassung verzichtet. Die Fahrstreifenzuweisung der Klassen wurde im Bereich der Anschlussstellen nicht angewandt, um alle Fahrstreifenwechsel, die durch das Ein- und Ausfahren nötig sind, zu ermöglichen.

In Bild 4-5 und Bild 4-4 ist die Fahrstreifenaufteilung im dreistreifigen Bereich mit und ohne Fahrzeugklassenzuordnung auf die Fahrstreifen zu sehen. In

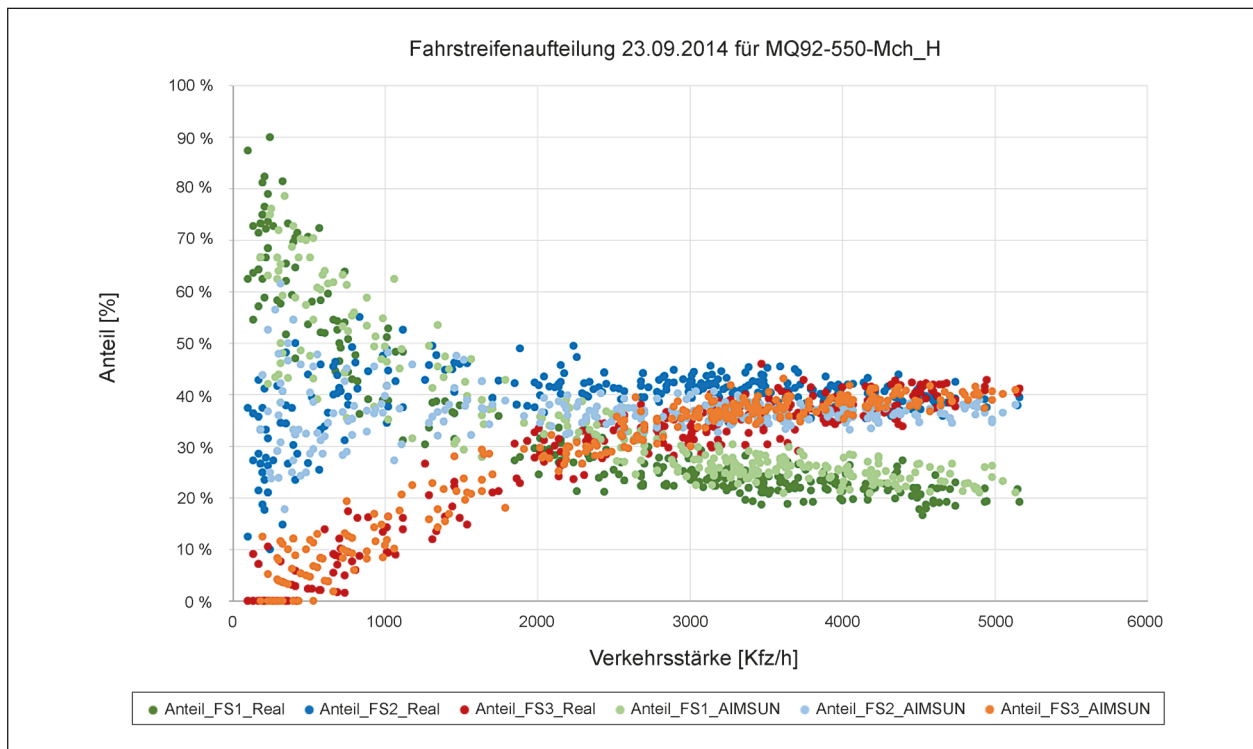


Bild 4-4: Fahrfreifenaufteilung mit Fahrzeugklassenzuordnung auf Fahrfreifren

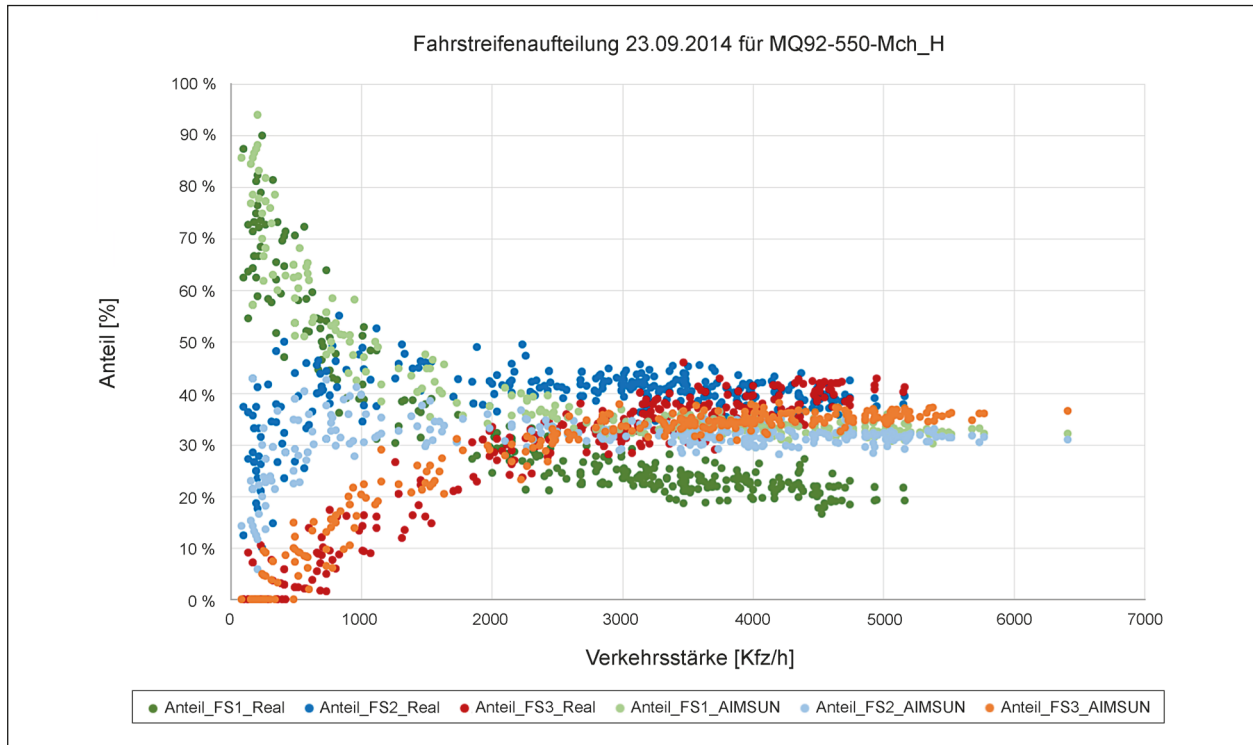


Bild 4-5: Fahrfreifenaufteilung ohne Fahrzeugklassenzuordnung auf Fahrfreifren

Bild 4-5 ist deutlich zu sehen, dass sich die Fahrzeuge gleichmäßig auf alle drei Fahrfreifren verteilen und die sich dadurch ergebende Abweichung zu

Realität. In Bild 4-4 wird die Realität durch die Zuordnung der Fahrzeugklassen auf die Fahrfreifren wesentlich besser abgebildet.

Es ist anzumerken, dass durch diese modellbedingten Vorgaben die Fahrstreifenwahl nicht mehr ohne weiteres dynamisch angepasst werden kann, etwa als Reaktion auf die Schaltzustände der SBA, sondern durch Modellparameter vorgegeben ist und die Anteile bei anderen Szenarien/Streckenabschnitten unter Umständen angepasst werden müssen.

4.2.3.4 Ergebnisse Kalibrierung A57

Für die Kalibrierung der A57 wurden 15 Messquerschnitte verwendet, die sich gleichmäßig auf die Untersuchungsstrecke verteilen. An diesen Querschnitten wurden die Simulationsdaten mit Realdaten je 5-Minuten-Intervall verglichen. Es wurden Ganglinienverläufe der Geschwindigkeit und der Verkehrsstärke, Fahrstreifenaufteilungen und QV-Diagramme betrachtet und visuell verglichen. In Bild 4-6 sind Beispiele für den Messquerschnitt 108, kurz vor der Einfahrt Krefeld Zentrum Nord zu sehen. Der Messquerschnitt liegt im zweistreifigen Bereich. Die Ganglinien der Verkehrsstärke und Geschwindigkeit liegen übereinander und auch der Zusammenbruch ist in der Simulation abgebildet. Dadurch stimmen die Punktwolken im QV-Diagramm überein. Die Fahrstreifenaufteilung ist ebenfalls gut abgebildet. Weitere Diagramme sind im Anhang 7 zu sehen.

Es wurden insgesamt 10 Simulationsläufe mit verschiedenen Zufallszahlen durchgeführt. Der Auswertzeitraum liegt zwischen 6:00 und 21:00 Uhr. Für die statistische Auswertung wurden 15-Minuten-Intervalle verwendet, da die Verkehrseinspeisung in die Simulation in 15-Minuten-Intervallen erfolgt. Es wurde ein Konfidenzniveau von 97,5 % für einen Fehler von 15 FZ/h und 5 km/h erreicht. Die einzelnen Fehler sind je Messquerschnitt und als Gesamtergebnis in Tabelle 4-5 dargestellt. Insgesamt wurde eine gute Übereinstimmung erreicht, an den einzelnen Detektoren liegt der Fehler meist auch unter 10 %. Als Fehlermaß wurde der Root

DET	190	180	175	145	140	130	120	110	108	105	100	90	80	70	50
RMSPE (Q)	0,087	0,101	0,110	0,084	0,073	0,067	0,061	0,085	0,085	0,077	0,075	0,118	0,116	0,092	0,105
RMSPE (V)	0,034	0,033	0,032	0,110	0,061	0,061	0,054	0,091	0,079	0,054	0,052	0,084	0,087	0,049	0,112
Gesamtergebnis															
RMSPE (Q)	0,0447														
RMSPE (V)	0,0373														

Tab. 4-5: Kalibrierungsergebnis A57

Mean Square Percent Error, wie in [FGSV06] beschrieben, verwendet.

4.2.3.5 Ergebnisse Kalibrierung A92

Für die Kalibrierung wurden die Messquerschnitte MQ 92-470, MQ 99-510, MQ 99-550 und MQ 99-580 verwendet. Diese liegen sowohl im zwei- als auch im dreistreifigen Bereich und verteilen sich über die Untersuchungsstrecke. Wie bei der Kalibrierung der A57 wurden 5-Minuten-Intervalle ausgewertet und mit der Realität verglichen.

Es wurden ebenfalls Ganglinien der Geschwindigkeit und der Verkehrsstärke, Fahrstreifenaufteilungen und QV-Diagramme verwendet. In Bild 4-7 ist das Kalibrierungsergebnis für den 2-streifigen Bereich auf der A92 zu sehen.

Für die statistische Berechnung des Ergebnisses wurden wie für die A57 15-Minuten-Intervalle verwendet, da die Verkehrsdateneinspeisung in die Simulation wiederum in 15-Minuten-Intervallen erfolgt. Der Auswertzeitraum wurde ebenfalls auf den Zeitraum von 6:00 – 21:00 Uhr begrenzt. Für die Geschwindigkeit und die Verkehrsstärke wurde ein Mittelwert aus 6 Simulationsläufen bei einem Konfidenzniveau von 95 % und einem Fehler von 15 FZ/h und 5 km/h berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4-6 dargestellt. Es ist eine gute Übereinstimmung zwischen der Realität und der Simulation erreicht worden.

DET	470	510	550	580
RMSPE (Q)	0,0748	0,1122	0,06	0,0579
RMSPE (V)	0,0857	0,0623	0,055	0,0504
Gesamtergebnis				
RMSPE (Q)	0,07924037			
RMSPE (V)	0,06480021			

Tab. 4-6: Kalibrierungsergebnis A92

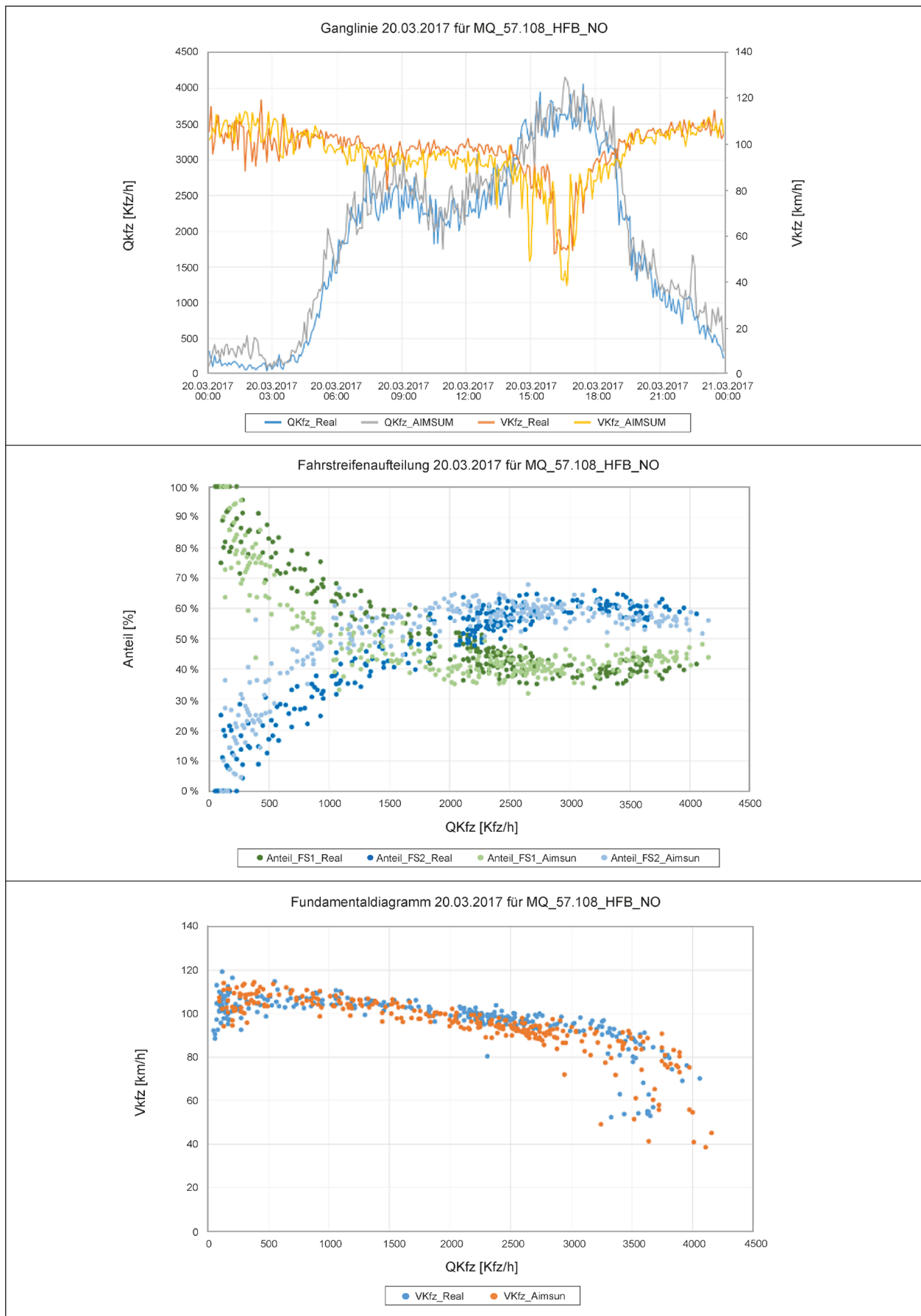


Bild 4-6: Kalibrierungsergebnis A57

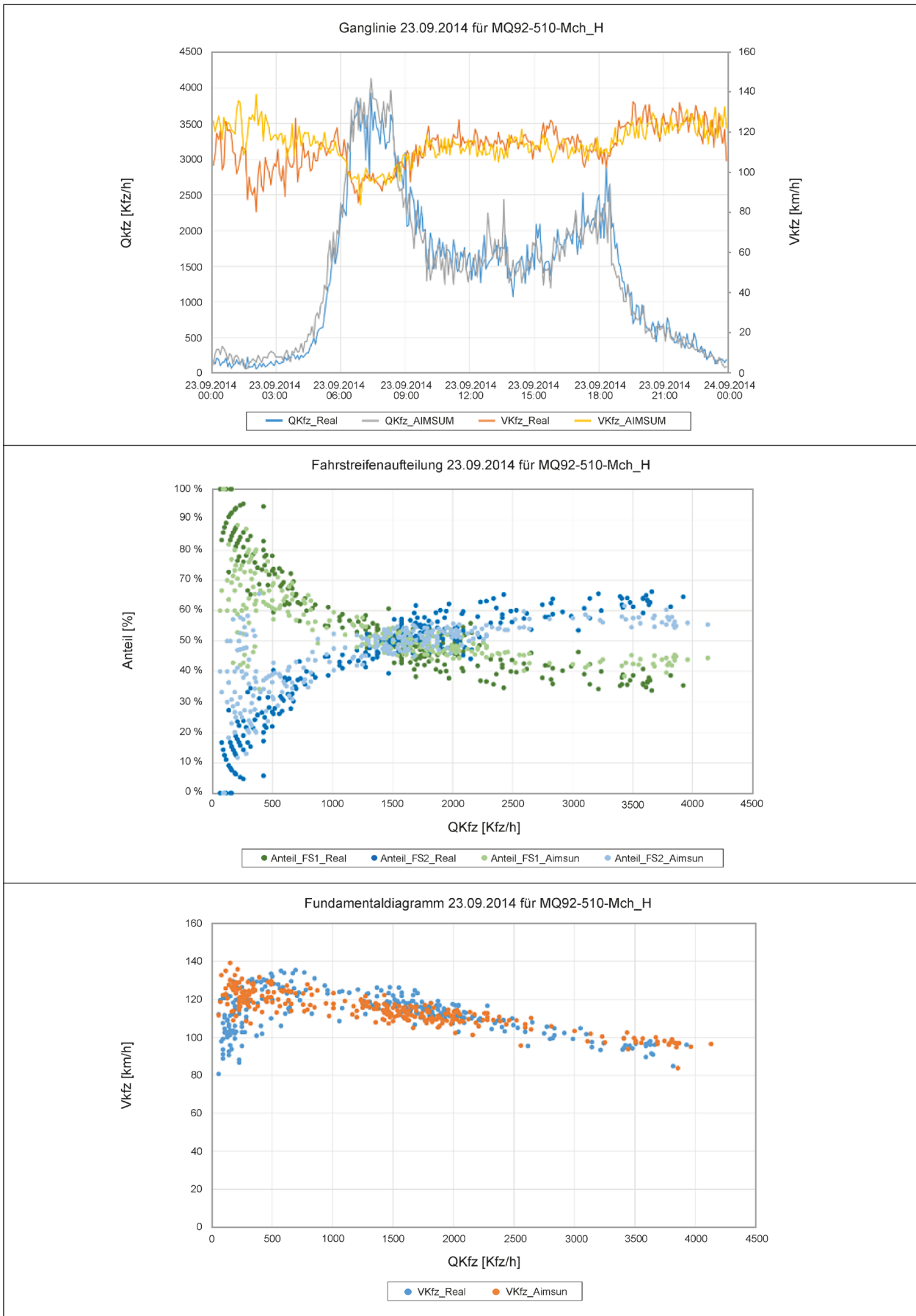


Bild 4-7: Kalibrierungsergebnis A92

Gesamtergebnis	
RMSPE (Q)	0,06382039
RMSPE (V)	0,091196849

Tab. 4-7: Validierungsergebnis A57

Gesamtergebnis	
RMSPE (Q)	0,18342447
RMSPE (V)	0,06914746

Tab. 4-8: Validierungsergebnis A92

4.2.4 Validierung der Referenzstrecke in der Simulation

4.2.4.1 Validierung A57

Die Validierung des Simulationsmodells der A57 fand mit Daten des 13.02.2017 statt. Der Mittelwert an den ausgewählten 15 Messquerschnitten, die auch für die Kalibrierung verwendet wurden, wurde aus 10 Simulationsläufen berechnet. Der Auswertzeitraum liegt ebenfalls zwischen 6:00 und 21 Uhr. Das Ergebnis ist in Tabelle 4-7 zu sehen. Insgesamt gibt es eine gute Übereinstimmung und die Simulation kann als valide betrachtet werden.

4.2.4.2 Validierung A92

Die Validierung des Simulationsmodells der A92 fand mit Daten des 13.03.2014 statt. Dazu wurde wieder ein Mittelwert der 4 Messquerschnitte über 6 Simulationsläufe gebildet. Der Auswertzeitraum liegt ebenfalls zwischen 6:00 und 21:00 Uhr. Das Gesamtergebnis ist in Tabelle 4-8 zu sehen. Für die Geschwindigkeit wurde eine gute Validierung erreicht. Für die Verkehrsstärke eine ordentliche Übereinstimmung. Da die Verkehrsstärke aber direkt in die Simulation eingespeist wird und nicht mit den zu validierenden Fahrverhaltensparametern in direktem Zusammenhang steht, kann trotzdem von einer validen Simulation ausgegangen werden.

4.3 Anpassung und Kalibrierung des Verhaltensmodells ohne automatisierte Fahrzeuge

Die wie in Kapitel 4.2.3 beschrieben kalibrierten Modelle der beiden Referenzstrecken bilden eine Grundlage für das Verhaltensmodell ohne automatisierte Fahrzeuge, das sowohl als Referenzfall (heute vorherrschendes Fahrzeug-/Fahrerkollektiv) als

auch für die menschlichen Verkehrsteilnehmer in Mischverkehrsszenarien (mit automatisierten und konventionellen Fahrzeugen) dienen soll. Die Modelle bilden jedoch die Reaktionen und Verhaltensanpassungen der Verkehrsteilnehmer auf die einzelnen Schaltzustände einer SBA noch nicht differenziert ab, sondern spiegeln zunächst nur ein Verhalten wider, in dem verschiedene im jeweiligen Verkehrskontext praktisch auftretende Schaltzustände einbezogen wurden. Um die Wirkungen der einzelnen SBA-Schaltungen differenziert abbilden zu können, wird das in Kapitel 3.5 vorgestellte hybride Bayessche Netz als Verhaltensmodell eingesetzt. Nachfolgend wird beschrieben, wie dieses Verhaltensmodell anhand empirischer Daten der beiden Referenzstrecken sowie simulativer Voruntersuchungen angepasst und kalibriert wurde. Das Verfahren zur Kalibrierung des Verhaltensmodells entstand ebenso wie das Modell selbst im Rahmen einer parallel laufenden Promotion [Gri20] und wurde im Rahmen dieses Vorhabens am Beispiel der Simulationssoftware AIMSUN angewendet.

4.3.1 Vorgehensweise und Arbeitsschritte

Die Anpassung und Kalibrierung des Verhaltensmodells für konventionelle Fahrzeuge umfasst folgende Schritte:

- Revision der Netztopologie, insbesondere Entfernen nicht signifikanter/nicht stabiler Zusammenhänge
- Kalibrierung anhand empirischer Zusammenhänge zwischen Fahrsituation und Fahrverhalten (orangefarbene Kanten in Bild 3-18)
- Bestimmung der Zusammenhänge zwischen empirisch erfasstem Fahrverhalten und Fahrverhaltensparametern der Verkehrssimulation durch wiederholte Simulationsläufe (blaue Kanten in Bild 3-18)

Das als Verhaltensmodell verwendete hybride Bayessche Netz verfügt, wie in Kapitel 3.5 beschrieben, über eine Menge wertdiskreter Zustandsknoten (Streckentopologie, Anzeigezustände der SBA) sowie über ein inneres Gaußsches Bayessches Netz mit ausschließlich wertkontinuierlichen Zustandsknoten. Die Revision der Netztopologie betrifft das innere Gaußsche Bayessche Netz und die darin abgebildeten Zusammenhänge. Die Kalibrierung des inneren Netzes erfolgte einzeln für relevante Zustandskombinationen der äußeren, wertdiskreten Knoten.

4.3.2 Revision der Netztopologie

Zu Beginn des Modellanpassungs- und Kalibrierungsprozesses wurde das innere Gaußsche Bayessche Netz so aufgestellt, dass es über eine vergleichsweise große Menge an Knoten und Kanten verfügte (vgl. Bild 4-8). In einem ersten Schritt erfolgte eine Bewertung der modellierten Zusammenhänge (Kanten) mit dem Ziel, solche aus dem initialen Modell zu entfernen, die nicht signifikant oder zu sensitiv gegenüber geringfügigen Änderungen der Eingabedaten sind (instabile Zusammenhänge). Auch wurden Knoten und Kanten identifiziert und entfernt, für die kein signifikanter Einfluss der SBA-Steuerung erkennbar ist oder bei denen die einem Gaußschen Bayesschen Netz zugrundeliegenden Modellannahmen nicht erfüllt sind (insbesondere die Forderung normalverteilter Residuen innerhalb der linearen Zusammenhänge zwischen den Gauß-Verteilungen).

Die Revision der Netztopologie des inneren Gaußschen Bayesschen Netzes umfasst folgende Schritte:

1. Voruntersuchung zu Knoten, die das empirische Fahrverhalten abbilden (mittlere Schicht des Netzes in Bild 4-8)
2. Untersuchung zu Kanten, die Zusammenhänge zwischen Fahrsituation und empirisch beobachtetem Fahrverhalten abbilden (Regressionsanalyse)
3. Untersuchung zu Zusammenhängen zwischen empirisch beobachtetem Verhalten und ausgewählten Verhaltensparametern der Verkehrsflusssimulation

4.3.2.1 Voruntersuchung zu Knoten der Schicht empirisches Fahrverhalten

Im Rahmen des ersten Schrittes wurde das innere Gaußsche Bayessche Netz zunächst für vier ausgewählte Zustände der äußeren (wertdiskreten) Knoten kalibriert (Vorgehen gemäß Kapitel 4.3.3.2) und die im Ergebnis vorliegenden Parameter der abhängigen Verteilungen untersucht. Die abhängigen Verteilungen sind Normalverteilungen, deren Mittelwert linear vom Wert der Elternknoten abhängt. Die Streuung der Normalverteilung ist eine feste Eigenschaft des Knotens und nicht von den Elternknoten im Gauß-Netz abhängig; sie kann jedoch zwischen den Zuständen des äußeren wertdiskreten Netzes variieren. Konkret wurde für die Knoten in der Schicht empirisches Fahrverhalten untersucht,

- ob es Elternknoten gibt, die nur einen sehr schwachen Einfluss haben sowie
- ob die abhängige Normalverteilung durch eine sehr starke Streuung (Varianz) gekennzeichnet ist.

Auf dieser Grundlage wurden noch keine Anpassungen an der Netztopologie vorgenommen, die Ergebnisse flossen jedoch in den nachfolgenden Schritt ein.

4.3.2.2 Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Fahrsituation und -verhalten

Im zweiten Schritt wurde eine Regressionsanalyse für 14 beispielhaft ausgewählte Zustandskombinationen der wertdiskreten äußeren Knoten (nachfol-

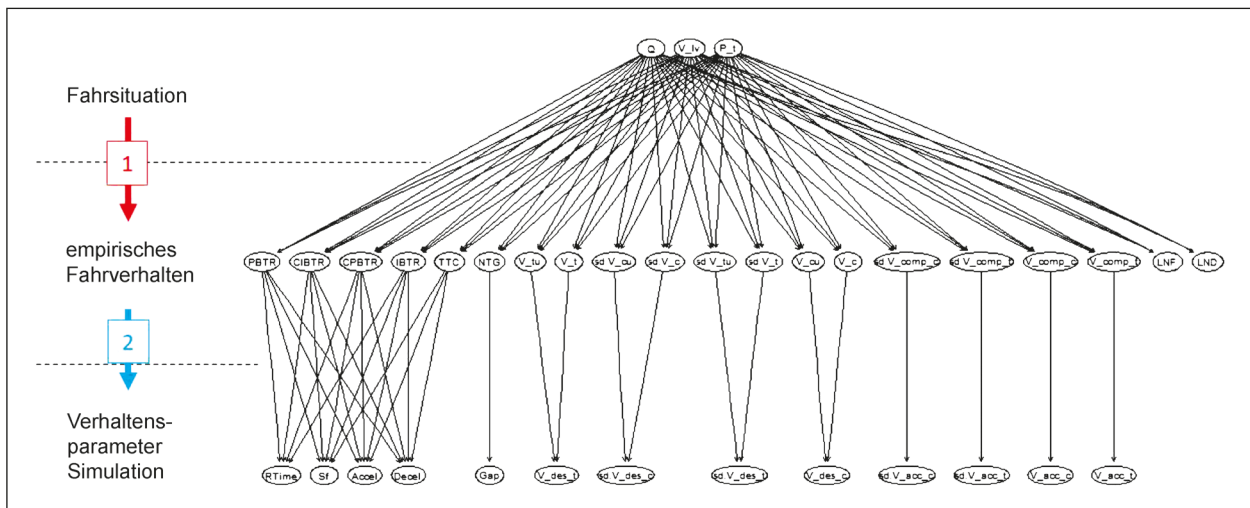


Bild 4-8: Initiales Gaußsches Bayessches Netz als Ausgangspunkt der Revision der Netztopologie

gend als Szenarien bezeichnet) durchgeführt. Diese umfassen folgende sieben Anzeigezustände, jeweils für zwei- und für dreistreifige Querschnitte:

- Passiv (keine Geschwindigkeitsbeschränkungen oder Warnungen)
- Geschwindigkeitsbeschränkung 130 km/h (stromaufwärts u. lokal), keine Warnungen
- Geschwindigkeitsbeschränkung 100 km/h (stromaufwärts u. lokal), keine Warnungen
- Geschwindigkeitsbeschränkung 80 km/h (stromaufwärts u. lokal), keine Warnungen
- Geschwindigkeitstrichter 100 km/h stromaufwärts u. 80 km/h lokal, keine Warnungen
- Geschwindigkeitsbeschränkung 80 km/h stromaufwärts/100 km/h lokal, keine Warnungen
- Stautrichter: 100 km/h stromaufwärts u. 60 km/h lokal i. V. m. Stauwarnung

Ziel war es, die einzelnen Zusammenhänge zwischen Verkehrssituation (Verkehrsfluss, Lkw-Anteil, Geschwindigkeitsniveau) und den empirischen Verhaltenskenngroßen systematisch zu untersuchen. Hierzu wurden in einem automatisierten Prozess je Szenario ca. 1.000 Datenpunkte aus der empirischen Datenbasis der A92 (gesamtes Jahr 2014) zum betreffenden Szenario zufällig ausgewählt. Hierbei handelt es sich um auf Minutenintervalle und über den gesamten Querschnitt aggregierte Daten, die z. T. jedoch auch aus Einzelfahrzeugdaten berechnet wurden. Insbesondere wurden auch

gemittelte Kenngrößen bzgl. des Abstandsverhaltens wie z. B. Individual und Platoon Braking Time Risks einbezogen.

Für jedes Szenario und für jede Kante zwischen den Schichten Fahr-situation und empirisches Fahrverhalten wurden auf dieser Grundlage die Parameter der Regressionsgeraden, Kenngrößen der Residuenverteilung um die Regressionsgerade sowie der Korrelationskoeffizient bestimmt. Zusätzlich wurde jeweils ein Plot der Regressionsgerade mit den zugehörigen Datenpunkten erzeugt, die der visuellen Überprüfung der Zusammenhänge diente. Über eine Weboberfläche konnte zwischen den Szenarien und Kanten gewechselt und die jeweiligen Parameter, Kenngrößen und Plots dargestellt werden (beispielhafte Darstellung in Bild 4-9).

Mit der Untersuchung sollten folgende Fragen zu beantwortet werden:

- Sind die Verkehrszustands- und Verhaltenskenngroßen miteinander korreliert bzw. besteht ein zumindest näherungsweise linearer Zusammenhang zwischen den jeweils paarweise betrachteten Größen?
- Ist der Zusammenhang plausibel?
- Variiert der Zusammenhang stark zwischen den Szenarien? Ändert sich z. B. die Steigung der Regressionsgeraden sehr stark oder wechselt sie gar ihr Vorzeichen?
- Sind die Residuen zumindest näherungsweise normalverteilt um die Regressionsgerade?

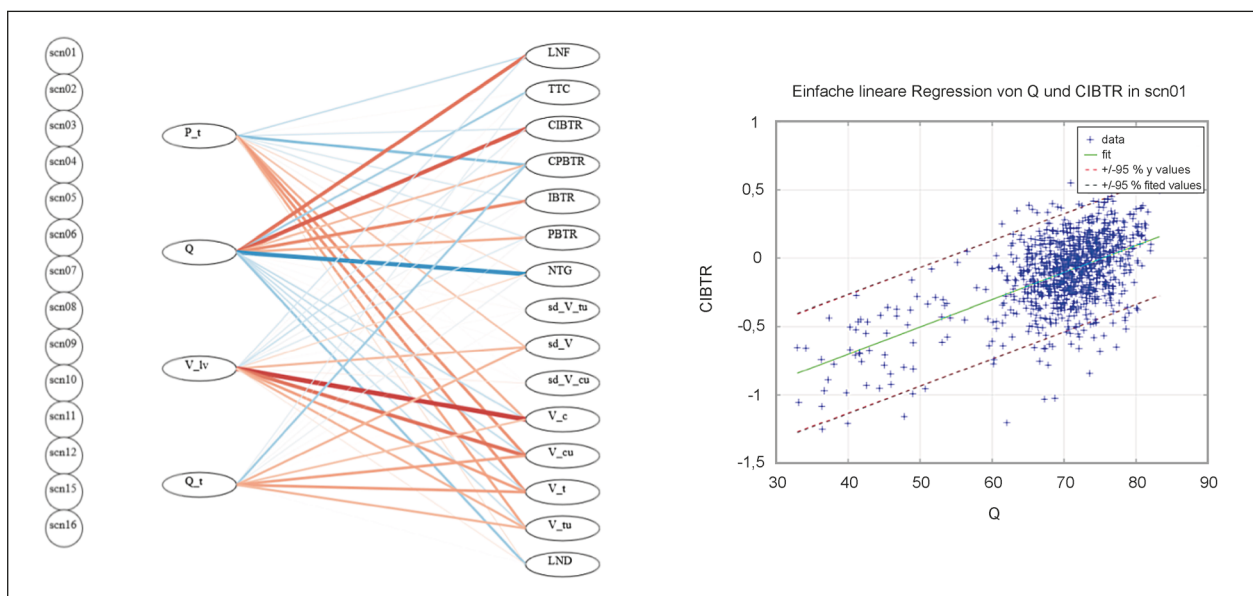


Bild 4-9: Weboberfläche zur Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Fahr-situation und empirischen Verhalten

Als Ergebnis dieser Untersuchung wurden einige Knoten aus dem Gaußschen Bayesschen Netz entfernt, für die die Anforderung normalverteilter Residuen nicht erfüllt war¹. Dies betrifft die Kenngrößen Auffahrzeit (Time to Collision, TTC) sowie das Individual Braking Time Risk (IBTR), das Platoon Braking Time Risk (PBTR) und das Compensated Platoon Braking Time Risk (CPBTR). Diese Kenngrößen sind auf Werte ≥ 0 beschränkt; diese Beschränkung führt u. a. zu einer erheblichen Schiefe der Residuenverteilung. Dagegen zeigte sich, dass die mittlere Nettozeitlücke trotz ebenfalls bestehender unterer Schranke des Wertebereichs geeignet ist. Ebenfalls gut geeignet ist auch das Compensated Individual Braking Time Risk, da hier auch negative Werte zulässig sind. Die Kenngrößen, die nicht mehr im Gaußschen Bayesschen Netz berücksichtigt werden, können trotzdem als Kenngrößen für die Bewertung einbezogen werden; sie sind lediglich nicht geeignet, um den Zusammenhang zwischen Fahrsituation und Verhaltensparametern der Verkehrsflusssimulation im Rahmen des Wirkmodells abzubilden.

Ursprünglich wurde die vorherrschende Verkehrssituation als Teil der Fahrsituation durch die Kenngrößen Verkehrsstärke, Lkw-Anteil und mittlere (geglättete) Geschwindigkeit beschrieben. Es zeigte sich, dass der Lkw-Anteil grundsätzlich keinen signifikanten Einfluss auf die Verhaltenskenngößen hat oder der Einfluss konträr zur Erwartung liegt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass ein hoher Lkw-Anteil sowohl bei niedriger Gesamtverkehrsstärke auftritt als auch eine hohe Lkw-Belastung charakterisieren kann. Aus diesem Grunde wurde der Lkw-Anteil durch die Lkw-Verkehrsstärke ersetzt.

Weiterhin wurden einige Kanten aus dem Gaußschen Bayesschen Netz entfernt, für die kein signifikanter oder kein über verschiedene Szenarien stabiler Zusammenhang erkannt werden konnte.

Die aus diesem Schritt resultierenden Anpassungen der Netztopologie sind gemeinsam mit Anpas-

sungen im Zuge des nachfolgenden dritten Schrittes in Bild 4-11 dargestellt. Diagramme und Kenngrößen zu beispielhaft ausgewählten Zusammenhängen finden sich in Anhang 3.

4.3.2.3 Untersuchung der Zusammenhänge zwischen empirischem Verhalten und Verhaltensparametern der Simulation

Im dritten Schritt der Revision der Netztopologie wurde untersucht, ob ein Zusammenhang zwischen bestimmten Parametern des Fahrzeugfolgmodells zu den empirisch erfassbaren Verhaltenskenngößen besteht. Im Fokus stand hierbei insbesondere das Zeitlücken- und Abstandsverhalten, da das Geschwindigkeitsverhalten direkt aus Geschwindigkeiten beeinflusster und unbeeinflusster Fahrzeuge abgeleitet werden kann.

Es wurde ein auch für die Kalibrierung gemäß Kapitel 4.2.3 verwendetes Simulationsszenario der A92 genutzt, in dem folgende Parameter einzeln (*ceteris paribus*) um den jeweiligen Wert aus der Kalibrierung (fett dargestellt) variiert wurden:

- Max. Wunschbeschleunigung (Pkw):
2,6/2,8/3,0/3,2/3,4 m/s²
- Normale Wunschverzögerung (Pkw):
4,5/-4,25/-4,0/-3,75/-3,5 m/s²
- Mindest-Zeitlücke (Pkw):
0,8/1,1/1,4/1,7 s
- Mindest-Zeitlücke (Lkw, nur 2-streifig):
0,5/0,8/1,1/1,4 s
- Sensitivity Factor (gleichzeitig f. Pkw/Lkw):
0,7/0,8/0,9/1,0/1,1/1,2

Mit einer frühen Implementierung der später erweiterten Datenausgabefunktionalität wurden aus der Simulation die mittleren Nettozeitlücken sowie das Compensated Individual Braking Time Risk (CIBTR) lokal an ausgewählten Messquerschnitten berechnet und die resultierenden einzelfahrzeugbezogenen Kenngrößen in eine CSV-Datei ausgegeben. Dies beschränkte sich auf Zeiträume, in denen die Verkehrsstärke zwischen 15 und 20 Kfz je Minute und Fahrstreifen lag, um einen vergleichbaren verkehrlichen Kontext sicherzustellen.

Die Untersuchung zur Variation der minimalen Zeitlücke wurde zuerst mit dem Standardwert für den Sensitivity Factor von 1,0 durchgeführt. Da sich zeigte, dass mit einem geringeren Sensitivity Factor ein hinsichtlich der Kenngröße CIBTR realistische-

¹ Tatsächlich wurde die Hypothese normalverteilter Residuen nicht direkt überprüft, sondern es wurden solche Zusammenhänge identifiziert und aussortiert, für die offensichtliche Abweichungen von einer Normalverteilung bestanden (z. B. extreme Schiefe oder Einfluss durch Wertebereichsgrenzen). Die Annahme eines linearen Zusammenhangs im Gaußschen Bayesschen Netz würde in diesen Fällen zu unsinnigen oder nicht realistischen Ergebnissen führen.

res Abstandsverhalten erreichen lässt und dadurch auch der Zusammenhang zwischen empirischen Kenngrößen und Mindestzeitlücke beeinflusst wird, wurde die Untersuchung (Variation über die zuvor angegebenen Parameter der Mindestzeitlücke für Pkw) i. V. m. einem Sensitivity Factor von 0,8 wiederholt. In der weiteren Auswertung und auch in der Kalibrierung wurden nur die Zusammenhänge zwischen empirischen Kenngrößen und der Pkw-Mindest-Zeitlücke für Sensitivity Factor 0,8 berücksichtigt.

Im Ergebnis zeigte sich, dass die Parameter Wunschbeschleunigung und -verzögerung keinen signifikanten Einfluss auf die beiden betrachteten Kenngrößen mittlere Nettozeitlücke und CIBTR haben. Außerdem haben alle untersuchten Simulati-

onsparameter keinen signifikanten Einfluss auf die gemessenen Nettozeitlücken – entgegen der Erwartung wirkt sich auch die in der Simulation vorgegebene Mindestzeitlücke kaum auf die im Verkehrsablauf resultierende mittlere Zeitlücke aus. Dagegen ist ein deutlicher Einfluss des Sensitivitätsfaktors auf die Kenngröße CIBTR festzustellen, der näherungsweise linear ist. Einen schwächeren, aber noch als signifikant eingeschätzten Einfluss auf die Kenngröße CIBTR hat die Mindest-Nettozeitlücke.

In Bild 4-10 sind die vorgenannten Zusammenhänge am Beispiel eines dreistreifigen Querschnitts sowie der Simulationsparameter Wunschbeschleunigung, Mindest-Zeitlücke und Sensitivity Factor dargestellt. Detailliertere Ergebnisse finden sich in Anhang 4.

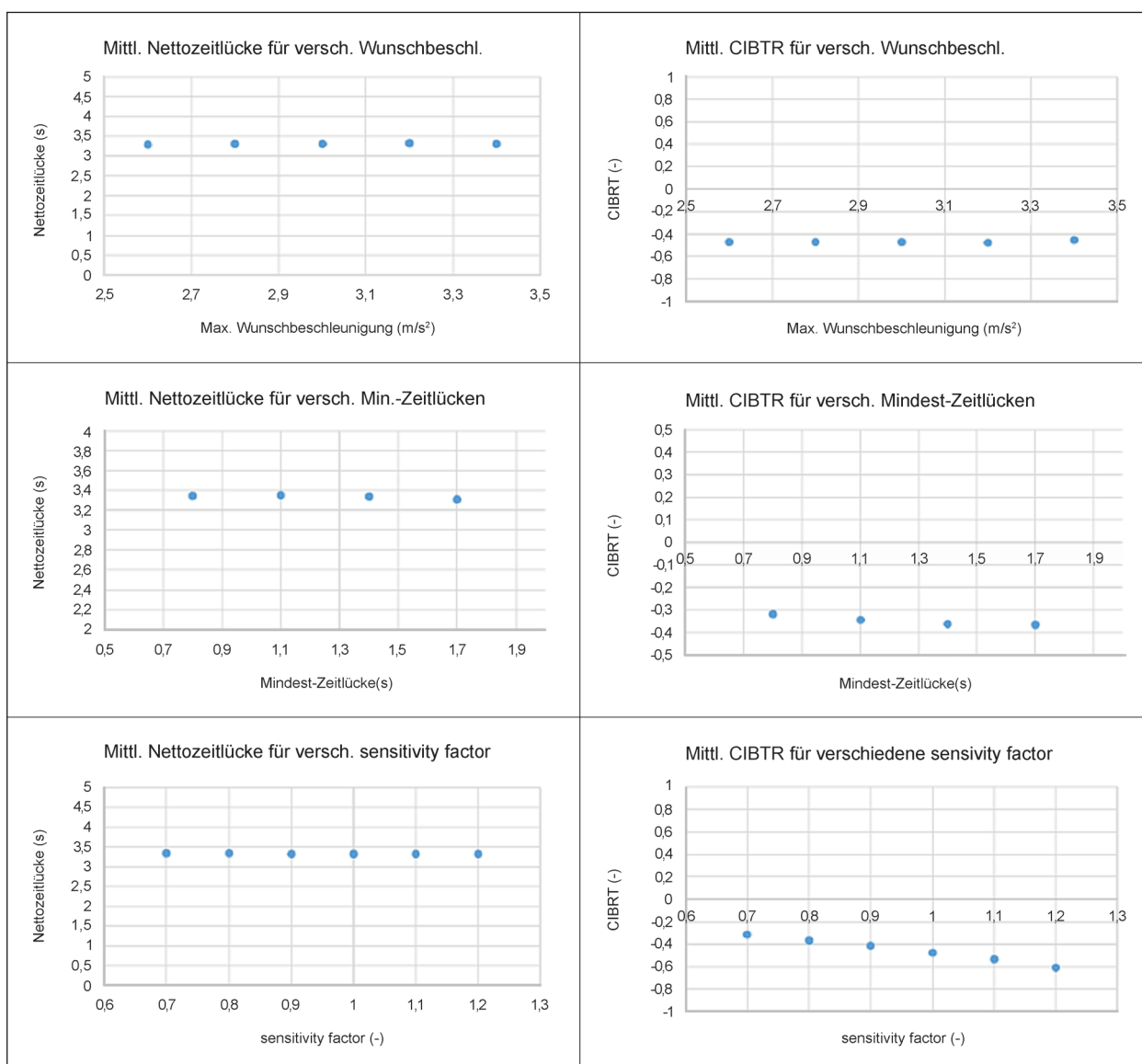


Bild 4-10: Zusammenhänge Simulationsparameter/empirisches Verhalten (Auswahl, 3-streifiger Querschnitt)

Als Konsequenz aus diesen Ergebnissen wurden Knoten aus der Schicht Verhaltensparameter Simulation entfernt, die sich auf nicht signifikante Simulationsparameter wie z. B. Wunschbeschleunigung und -verzögerung beziehen. Die finale Netztopologie mit Anpassungen aus diesem und dem vorangegangenen Revisionsschritt ist in Bild 4-11 dargestellt. Die erkannten Zusammenhänge zwischen Simulationsparameter und empirischen Kenngrößen wurden im Zuge der Kalibrierung genutzt, um den für das Verhaltensmodell benötigten umgekehrten Zusammenhang zu bestimmen und als funktionale Abhängigkeit im Gaußschen Bayesschen Netz zu versorgen (vgl. Kapitel 4.3.3.3).

4.3.2.4 Resultierende Netztopologie

Bild 4-11 zeigt die als Ergebnis der zuvor beschriebenen Untersuchungen entstandene Topologie des Gaußschen Bayesschen Netzes.

Die Bezeichnungen der Knoten haben die in Tabelle 4-9 beschriebene Bedeutung.

Wie in Kapitel 3.5.4 beschrieben repräsentieren diese Knoten des Gaußschen Bayesschen Netzes jeweils normalverteilte Zufallsgrößen.

Da die Nettozeitlücke (NTG) nicht signifikant durch die betrachteten Simulationsparameter beeinflusst wird, gibt es keine Verbindung von diesem Knoten in die Schicht der Simulationsparameter. Da die Fahrstreifenwahl nicht dynamisch beeinflussbar ist, haben auch die Knoten zur Bewertung der Fahrstreifenauslastung (LNF und LND) keine Verbindungen in die Schicht der Simulationsparameter. Diese drei Knoten wurden lediglich zur Untersuchung von Zusammenhängen innerhalb der empirischen Datenbasis im Modell belassen.

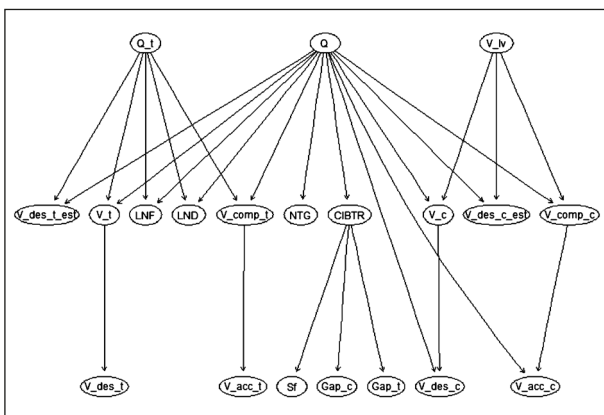


Bild 4-11: Finale Topologie des Gaußschen BN

Für die Geschwindigkeitsbeeinflussung stehen die Parameter Wunschgeschwindigkeit und Geschwindigkeitsakzeptanz zur Verfügung. Um wechselseitige Störeinflüsse durch die gleichzeitige Anpassung beider Parameter zu vermeiden und da auf eine Abbildung der angezeigten zulässigen Höchstgeschwindigkeiten als tatsächliche Höchstgeschwindigkeit des beeinflussten Streckenabschnitts verzichtet wurde (vgl. Kapitel 4.4.1), wird im Rahmen dieses Vorhabens auf die Beeinflussung der Geschwindigkeitsakzeptanz verzichtet. Beim Passieren eines Anzeigequerschnitts in der Simulation wird einem Fahrzeug lediglich eine neue Wunschgeschwindigkeit (sowie Mindest-Zeitlücke und Sensitivity Factor) zugewiesen. Die Geschwindigkeitsakzeptanz wurde dennoch im Modell belassen.

Bezeichnung	Bedeutung
Q	Kfz-Verkehrsstärke (Fahrsituation)
Q_t	Lkw-Verkehrsstärke (Fahrsituation)
V_lv	Geschwindigkeitsniveau (Fahrsituation); mittlere geglättete Kfz-Geschwindigkeit
V_c	Geschwindigkeit Pkw
V_comp_c	Befolgungsgrad zulässige Höchstgeschwindigkeit Pkw
V_des_c_est	Geschätzte Wunschgeschwindigkeit Pkw (vgl. Kapitel 4.3.3.3)
V_t	Geschwindigkeit Lkw
V_comp_t	Befolgungsgrad zulässige Höchstgeschwindigkeit Lkw
V_des_t_est	Geschätzte Wunschgeschwindigkeit Lkw (vgl. Kapitel 4.3.3.3)
NTG	Nettozeitlücke
CIBTR	Compensated Individual Braking Time Risk (vgl. Kapitel 3.3.4)
LNF	Schwerpunktlage Fahrstreifenauslastung (vgl. Kapitel 3.3.5)
LND	Gleichmäßigkeit Fahrstreifenauslastung (vgl. Kapitel 3.3.5)
V_des_c	Wunschgeschwindigkeit Pkw (nur als Rückfallebene bei fehlenden Einzelfzg.-Daten)
V_acc_c	Geschwindigkeitsakzeptanz Pkw
V_des_t	Wunschgeschwindigkeit Lkw (nur als Rückfallebene bei fehlenden Einzelfzg.-Daten)
V_acc_t	Geschwindigkeitsakzeptanz Lkw
Sf	Sensitivity Factor
Gap_c	Min. Zeitlücke Pkw (Sim.-Parameter)
Gap_t	Min. Zeitlücke Lkw (Sim.-Parameter)

Tabelle 4-9: Knoten des finalen Gaußschen BN

4.3.3 Kalibrierung anhand empirischer Zusammenhänge Fahrsituation und -verhalten

Das in Bild 4-11 gezeigte Gaußsche Bayessche Netz wurde anhand der empirischen Datenbasis bzw. der zuvor identifizierten Zusammenhänge kalibriert. Die Kalibrierung erfolgte separat für die beiden betrachteten Strecken (A92 und A57) sowie für alle als relevant identifizierten Zustandskombinationen der äußeren Knoten des hybriden Bayesschen Netzes (vgl. Kapitel 3.5.4). Hierzu wurden folgende Schritte durchgeführt:

1. Identifikation relevanter Zustandskombinationen der wertdiskreten (äußeren) Knoten des hybriden Bayesschen Netzes
2. Automatisiertes Erlernen der Zusammenhänge zwischen Fahrsituation und empirischem Fahrverhalten
3. Festlegung und Versorgung der funktionalen Zusammenhänge zwischen empirischen Verhaltenskenngrößen und den Verhaltensparametern der Verkehrsflusssimulation
4. Versorgung der Verhaltensparameter in einer Datenbank und Plausibilisierung

Diese Schritte werden nachfolgend erläutert.

4.3.3.1 Identifikation relevanter Zustandskombinationen der wertdiskreten Knoten

Es wurden insgesamt 450 relevante Kombinationen aus lokaler Streckentopologie (zwei- oder dreistreifiger Querschnitt), zul. Höchstgeschwindigkeit (lokal bzw. stromaufwärts; passiv, 130 km/h, 120 km/h, 100 km/h, 80 km/h, 60 km/h oder Geschwindigkeitsbeschränkung unterdrückt) sowie Anzeige von Warnungen (passiv, allg. Gefahrenwarnung, Baustelle, Unfall, Stau) identifiziert. Dabei wurden nur solche Kombinationen zugelassen, die folgende Bedingungen erfüllen:

- Plausibilität des Anzeigezustands innerhalb des jeweiligen Anzeigequerschnitts (lokal bzw. stromaufwärts)
- Plausibilität der Anzeigezustände zwischen lokalem und stromaufwärtigem Messquerschnitt

Bzgl. der Fahrstreifensignalisierung (Fahrstreifen-sperrungen) wurde keine Differenzierung vorgenommen; es wurden nur Zustände betrachtet, in de-

nen keine Fahrstreifen-sperrungen vorlagen (Zustand stets passiv). Auch bzgl. der Anzeige von Lkw-Überholverböten wurde auf eine Differenzierung zwischen den beiden relevanten Zuständen „passiv“ und „Lkw-Überholverbot aktiv“ verzichtet. In der Simulation wird ein Lkw-Überholverbot direkt als Nutzungsverbot des bzw. der linken Fahrstreifen modelliert; auf eine Modellierung einer weitergehenden Verhaltensanpassung wurde verzichtet.

Aufhebungen von Geschwindigkeitsbeschränkungen werden dem Zustand „passiv“ zugeordnet.

4.3.3.2 Zusammenhänge Fahrsituation und empirisches Verhalten

Das in Bild 4-11 gezeigte Gaußsche Bayessche Netz wurde für jede der beiden Strecken und für jede der im vorangegangenen Schritt definierten 450 Zustandskombinationen der äußeren wertdiskreten Knoten auf Grundlage der vorhandenen empirischen Datenbasis beider Strecken automatisch kalibriert. Hierbei wurden die Parameter der Randverteilungen sowie der abhängigen Verteilungen mittels Maximum Likelihood Estimation (MLE) so angepasst, dass die (linearen) Zusammenhänge im Modell den in der Realität beobachteten Zusammenhängen bestmöglich entsprechen. Die Mittelwerte der lokalen Verteilungen, d. h. der einzelnen Knoten des Netzes, werden als Gaußsches lineares Regressionsmodell ausgedrückt, wobei ein additiver Einfluss der Elternknoten besteht. Parameter hierbei sind die Nullstelle der Regressionsfunktion sowie die Faktoren, die den Einfluss der Elternknoten beschreiben (d. h. Steigung der Regressionsgeraden) [Scu15]. Auch die Standardabweichungen sowie die Randverteilungen (Verteilungen der Knoten ohne Elternknoten) werden in diesem Zusammenhang festgelegt.

Für das automatisierte Kalibrieren der Modellparameter wurde die Statistikumgebung R in Verbindung mit dem Paket bnLearn verwendet.

Für die Kalibrierung wurde die wie in Kapitel 4.1 beschrieben aufbereitete Datengrundlage verwendet, wobei die Menge der vorhandenen Daten nach vorherrschender Fahrsituation gefiltert wurden.

Da für die A57 Einzelfahrzeugdaten nur in sehr geringem Umfang, ausschließlich im zweistreifigen Bereich und dazu überwiegend innerhalb der Sommerferien verfügbar waren, wurde entschieden, das empirisch beobachtete Abstandsverhalten der A92

auch für die A57 zu übernehmen. Unterschiede zwischen den Modellen für die beiden Strecken bestehen jedoch weiterhin hinsichtlich des Geschwindigkeitsverhaltens.

4.3.3.3 Zusammenhänge empirisches Verhalten und Simulationsparameter: Geschwindigkeit

Das Geschwindigkeitsverhalten ist durch die Simulationsparameter Wunschgeschwindigkeit und Geschwindigkeitsakzeptanz determiniert. Wie in Kapitel 4.4.1 beschrieben, wird in diesem Vorhaben lediglich auf eine Beeinflussung der Wunschgeschwindigkeitsverteilung zurückgegriffen. Für die Abschätzung der Wunschgeschwindigkeitsverteilung aus gemessenen Geschwindigkeiten unbeeinflusster Fahrzeuge (vgl. Kapitel 4.1.3) existieren verschiedene Schätzmethode (vgl. z. B. [Gei15a]). Da eine solche Schätzung jedoch für eine sehr große Zahl an Szenarien durchgeführt werden müsste, wird auf ein vereinfachtes Verfahren zurückgegriffen:

- Es wird angenommen, dass durch Vorausfahrende unbeeinflusste Fahrzeuge mit ihrer Wunschgeschwindigkeit fahren.
- Es wird angenommen, dass die mittlere Wunschgeschwindigkeit der beeinflussten Fahrzeuge um einen bestimmten Wert (hier: 15 km/h für Pkw, 5 km/h für Lkw) über der mittleren Fahrgeschwindigkeit unbeeinflusster Fahrzeuge liegt.

Zusammen mit der Anzahl beeinflusster und unbeeinflusster Fahrzeuge kann die mittlere Wunschgeschwindigkeit v_{des} dann wie folgt geschätzt werden (jeweils für Pkw und Lkw):

$$v_{des} = \frac{n_{beeinfl} v_{beeinfl} + n_{unbeeinfl} v_{unbeeinfl}}{n_{beeinfl} + n_{unbeeinfl}}$$

Der resultierende Wert wurde als Knoten auf der Ebene der empirischen Verhaltenskenngrößen modelliert ($V_{des_c_est}$ für Pkw bzw. $V_{des_t_est}$ für Lkw), da es sich hierbei um eine Abschätzung auf Grundlage der empirischen Daten handelt. Sofern verfügbar, wird die durch diesen Knoten definierte Wunschgeschwindigkeitsverteilung unmittelbar in die Simulation übernommen.

Die zuvor beschriebene Abschätzung der Wunschgeschwindigkeit erfordert Einzelfahrzeugdaten, da die Menge der unbeeinflussten Fahrzeuge anhand

ihrer jeweiligen Zeitlücke zum Vorausfahrenden ermittelt wird. Liegen keine Einzelfahrzeugdaten vor (z. B. auf der A57 oder für Szenarien mit niedrigem Geschwindigkeitsniveau), wird die Wunschgeschwindigkeit ersatzweise in Abhängigkeit von der mittleren Geschwindigkeit im Minutenintervall und für Pkw auch in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke bestimmt. Die auf diese Weise bestimmte Wunschgeschwindigkeitsverteilung ist in den Knoten V_{des_c} für Pkw sowie V_{des_t} für Lkw definiert. Der Zusammenhang zu den Einflussgrößen aus der Schicht der empirischen Verhaltenskenngrößen ist für Pkw bzw. für Lkw:

$$v_{des,Pkw} = 0,2q_{Kfz} + v_{Pkw}$$

$$v_{des,Lkw} = 5 \text{ km/h} + 0,95v_{Lkw}$$

Es sei angemerkt, dass v_{Pkw} bzw. v_{Lkw} nicht dem Geschwindigkeitsniveau als Bestandteil der Fahrsituation entspricht, sondern der einer Fahrsituation zugeordneten (mittleren empirischen) Reaktion. Die abweichende Einheit der Kfz-Verkehrsstärke (Kfz/min) im Additionsterm sei vernachlässigt.

Für die Wunschgeschwindigkeit der Pkw lässt sich auf diese Weise nachbilden, dass bei geringen Verkehrsstärken viele Fahrzeuge unbehindert durch andere Verkehrsteilnehmer und damit bereits mit ihrer Wunschgeschwindigkeit fahren; bei höheren Geschwindigkeiten liegt die Wunschgeschwindigkeit in zunehmendem Maße über der mittleren in der betreffenden Situation gefahrenen Geschwindigkeit. In der Realität ist dieser Zusammenhang nicht notwendigerweise linear; für dieses Vorhaben wird dies jedoch vereinfachend angenommen.

Für Lkw wird kein Einfluss der Verkehrsstärke auf die Wunschgeschwindigkeit unterstellt. Die lineare Funktion wurde so gewählt, dass sie bei niedrigeren Lkw-Geschwindigkeiten etwas über der in der jeweiligen Situation empirischen Geschwindigkeit liegt, bei 100 km/h jedoch genau der empirischen Geschwindigkeit entspricht.

Sehr niedrige oder sehr hohe Mittelwerte der Wunschgeschwindigkeiten werden durch Anwendung folgender Wertebereichsgrenzen vermieden:

$$70 \text{ km/h} \leq v_{des,Pkw} \leq 150 \text{ km/h}$$

$$70 \text{ km/h} \leq v_{des,Lkw} \leq 110 \text{ km/h}$$

Außerdem gilt, dass für eine bestimmte Fahrsituation die Wunschgeschwindigkeit der Pkw mindestens der der Lkw entsprechen muss. Die Einhaltung dieser Bedingungen wird im Rahmen der Versorgung

Anzeigezustand (hier: nur zul. Höchstgeschw., jeweils lokal/stromabwärts identisch)	Verkehrsstärke (Kfz/min)	Parameter Wunschgeschwindigkeitsverteilung			
		Mittelwert (km/h)	Std.-Abw. (km/h)	Minimum (km/h)	Maximum (km/h)
100 km/h	50..55 Kfz/min	112,46	11,85	88,76	136,15
100 km/h	35..40 Kfz/min	112,05	11,85	88,36	135,74
80 km/h	50..55 Kfz/min	104,29	9,79	84,71	123,88
80 km/h	35..40 Kfz/min	103,67	9,79	84,08	123,25

Tab. 4-10: Beispiele für Wunschgeschwindigkeitsverteilungen

der Verhaltensparameter in der Datenbank berücksichtigt (vgl. Kapitel 4.3.3.5).

Tabelle 4-10 zeigt die Parameter der Wunschgeschwindigkeitsverteilungen am Beispiel von vier ausgewählten Fahrsituationen für die A92.

Es sei darauf hingewiesen, dass sich diese Wunschgeschwindigkeiten nur bei von Vorausfahrenden weitgehend unbeeinflussten Fahrzeugen einstellen können, sodass die tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeiten mit wachsender Verkehrsdichte zunehmend unterhalb der Wunschgeschwindigkeiten bleiben. Die Fahrzeuge mit niedrigeren (ggf. unterdurchschnittlichen) Wunschgeschwindigkeiten dominieren dann das insgesamt erreichte Geschwindigkeitsniveau. Auf den ersten Blick mag die Verteilung daher auf eine nicht ausreichende Befolgung vor allem der Schaltungen mit 80 km/h hindeuten. Diese Unterstellung wäre jedoch nicht zulässig, da der Wunschgeschwindigkeitsverteilung wie oben beschrieben die Annahme zugrundeliegt, dass von Vorausfahrenden beeinflusste Fahrzeuge eine um einen bestimmten Betrag über ihrer Fahrgeschwindigkeit liegende Wunschgeschwindigkeit haben. Ob dies tatsächlich der Fall ist, kann nicht nachgewiesen werden und ist für die Simulation auch unerheblich; entscheidend ist, dass die gefahrenen Geschwindigkeiten (und die Streuung derselben) zwischen Simulation und Realität situationspezifisch übereinstimmen.

4.3.3.4 Zusammenhänge empirisches Verhalten und Simulationsparameter: Abstandswahl

Das Abstandsverhalten wird durch die Simulationsparameter minimale Zeitlücke (jeweils separat für Pkw und Lkw) sowie den Sensitivity Factor beeinflusst. In der Phase der Modellrevision wurden annähernd lineare Zusammenhänge zwischen Simulationsparametern und der empirischen Kenngröße

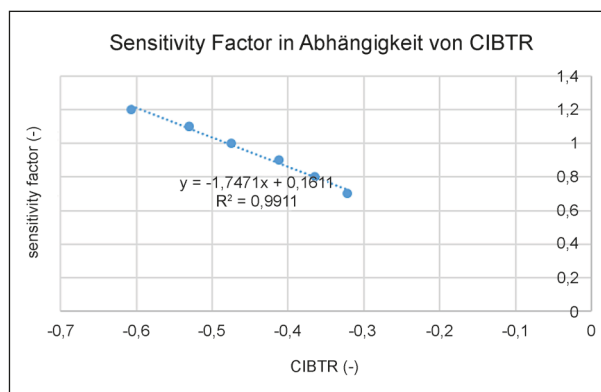


Bild 4-12: Zusammenhang Abstandsverhalten/Simulationsparameter: Beispiel Sensitivity Factor/CIBTR

Compensated Individual Braking Time Risk (CIBTR) identifiziert. Für diese wurden nun die jeweils umgekehrten Zusammenhänge (Simulationsparameter in Abhängigkeit von der empirischen Kenngröße) durch lineare Regression (Sensitivity Factor) bzw. durch geeignete händische Festlegung bestimmt. Dies erfolgte separat für zwei- und für dreistreifige Querschnitte. Diese Zusammenhänge wurden unmittelbar als funktionale Abhängigkeit im Gaußschen Bayesschen Netz versorgt. Bild 4-12 zeigt beispielhaft den Zusammenhang Sensitivity Factor in Abhängigkeit vom CIBTR. Alle funktionalen Zusammenhänge können Anhang 5 entnommen werden.

4.3.3.5 Versorgung der Verhaltensparameter in einer Datenbank/Plausibilisierung

Um die einer Fahrsituation zugehörigen Verhaltensparameter während der Simulation schnell abfragen zu können, wurde entschieden, diese in einer Datenbank abzulegen und somit keine direkte Schnittstelle zwischen der Verkehrsflusssimulation und dem Gaußschen Bayesschen Netz herzustellen. Hierbei wurde für jede der 450 Zustandskombinationen der äußeren wertdiskreten Knoten (nachfolgend: Szenarien) wie folgt vorgegangen:

- Auswahl des dem Szenario entsprechenden inneren Gaußschen Bayesschen Netzes
- Diskretisierung der wertkontinuierlichen, die Fahrsituation beschreibenden Knoten Kfz-Verkehrsstärke, Lkw-Verkehrsstärke und Geschwindigkeitsniveau
- Je relevanter Kombination der so diskretisierten drei Kenngrößen: Setzen dieser Werte als Evidenzen im Gaußschen Bayesschen Netz
- Abfrage mit diesen Evidenzen resultierenden Simulationsparametern (Inferenz)
- Ablage der Zuordnung Fahrsituation zu Simulationsparametern in der Datenbank

Wurden für eines der 450 Szenarien nicht genügend Datensätze gefunden (d. h. < 180 Minutenintervalle), wurden sukzessive Anforderungen an die Situation fallengelassen, sodass in diesem Falle das Verhalten für ein möglichst ähnliches Szenario abgefragt wurde. Dies wurde in einer Protokolldatei nachvollziehbar dokumentiert.

In einem nachgelagerten Prozess wurde sichergestellt, dass die Simulationsparameter bestimmte Grenzen nicht über- bzw. unterschreiten, um unplausibles Verhalten in der Verkehrssimulation zu vermeiden. Auch wurde überprüft, ob die Wunschgeschwindigkeit der Pkw mindestens der der Lkw entspricht. Bei Bedarf wurden die Parameter dahingehend angepasst, dass diese Kriterien erfüllt sind.

4.3.4 Untersuchungen zu mikroskopischen Kenngrößen

Zusätzlich zur zuvor beschriebenen Kalibrierung wurde bewertet, inwieweit die in der Simulation aufgezeichneten Verteilungen der Zeit- bzw. Weglücken und der darauf basierenden Kenngrößen

- Auffahrzeit (Time to Collision, TTC)
- Compensated Individual Braking Time Risk (CIBTR)
- Compensated Platoon Braking Time Risk (CPBTR) und
- Platoon Braking Time Risk (PBTR)

den in den empirischen Daten beobachteten Verteilungen entsprechen. Es wurde erwartet, dass es Abweichungen zwischen Simulation und Realität

geben kann, u. a. da das verwendete Fahrzeugfolgemedell nach GIPPS [Gip81] als kollisionsfreies Modell entgegen der Realität riskante Zeitlücken vermeidet. Gleichzeitig wird jedoch vermutet, dass dieser Umstand insbesondere durch die Anpassung des Sensitivity Factor auf Werte < 1 ein auf mikroskopischer Ebene zumindest annähernd realitäts-treues Verhalten nachbilden lässt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind für die Interpretation der Simulationsergebnisse wichtig.

Da das Fahrverhalten durch das Verhaltensmodell in Abhängigkeit von der jeweiligen Fahrsituation gesetzt wird, muss auch die Validierung spezifisch für eine bestimmte Fahrsituation erfolgen. Aufgrund der sehr hohen Zahl an Fahrsituationen beschränkt sich diese Untersuchung auf ein Szenario und zwar eine Geschwindigkeitsbeschränkung von 100 km/h (sowohl lokal als auch stromaufwärts) ohne Warnungen oder weitere Anzeigehalte. Die Untersuchung erfolgt jeweils für zwei- und dreistreifige Querschnitte. Für die Untersuchung wurde das auch im Rahmen der Kalibrierung genutzte Simulationsszenario der A92 genutzt, wobei die Anzeigezustände zu Beginn jedes Simulationslaufs über die API gesetzt und bis zum Ende des Laufs aktiv gehalten wurden. Abweichungen der Kenngrößen zwischen Simulation und empirischen Daten wurden anhand von Verkehrsstärkeklassen durchgeführt, da sonst die vorherrschenden Verkehrsverhältnisse u. U. nicht vergleichbar wären. Untersucht wurden dabei Verkehrsstärken zwischen 30 Kfz/min und 80 Kfz/min, jeweils unterteilt in Klassen der Breite 5 Kfz/min.

Die wesentlichen Ergebnisse dieser Untersuchung sind:

- Die mittleren Nettozeitlücken werden nahe an der Realität nachgebildet (ob auch Anteile niedriger Nettozeitlücken realistisch abgebildet werden, wurde nicht direkt untersucht, dies fließt aber in andere Kenngrößen wie CIBTR ein).
- TTC aus der Simulation liegen deutlich über denen in der Empirie. Dies kann auf die geringere Wertauflösung der Geschwindigkeiten in den empirischen Daten zurückzuführen sein, so dass extrem geringe Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Fahrzeugen nicht auftreten. In der Simulation können diese jedoch durchaus auftreten. Bei der Auswertung der TTC in der Simulation, einschließlich deren Aggregation, sollten daher

nur Werte bis zu einer bestimmten Obergrenze (z. B. 200 s) berücksichtigt werden.

- Die Kenngrößen CIBTR, IBTR, CPBTR und PBTR in der Simulation liegen systematisch unterhalb der empirisch erfassten Werte, d. h. in der Realität wird deutlich riskanter gefahren als in der Simulation. Dies kann zumindest teilweise auf die Kollisionsfreiheit des in AIMSUN verwendeten Fahrzeugfolgemodells zurückzuführen sein.
- Die mittleren CIBTR und IBTR ändern sich jedoch davon abgesehen konsistent in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke. Die Kenngrößen erscheinen geeignet, um zumindest relative Änderungen zwischen zwei Szenarien indikativ bewerten zu können.
- Dies trifft auf die Kenngröße PBTR nur eingeschränkt zu: Bei Verkehrsstärken > 65 Kfz/min nimmt die Abweichung zwischen Simulation und empirischen Daten überproportional zu. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die Unterschiede in den IBTR sich akkumulieren können.

Darüber hinaus fand eine Bewertung statt, ob die in der Simulation aufgezeichneten Kenngrößen beeinflusst werden von

- der Simulationsschrittweite (0,15 s vs. 0,75 s) sowie von
- der Art der Aufzeichnung (lokal an einem Messquerschnitt vs. momentan in einem Streckenabschnitt).

Die Untersuchung des Einflusses der Simulationsschrittweite ist erforderlich, da für die automatisierten Fahrzeuge eine Reaktionszeit von 0,15 s angesetzt werden soll, was auch eine entsprechende Anpassung der Simulationsschrittweite erfordert. Im Gegensatz zur vorangegangenen Untersuchung findet dabei kein Abgleich mit empirischen Daten statt, sondern nur zwischen Simulationsausgaben unterschiedlicher Szenarien. Auch hier wurde das Szenario A92 verwendet, jedoch ohne Beeinflussung durch eine SBA-Schaltung.

Diese Untersuchung hat folgendes ergeben:

- Die Simulationsschrittweite hat keinen signifikanten Einfluss auf die Datenaufzeichnung.
- Bei abschnittsbezogener Erfassung treten

- keine extrem geringen Zeitlücken ($< 0,2$ s),
- weniger geringe Zeitlücken ($< 0,75$ s) und gleichzeitig
- weniger höhere Zeitlücken (> 2 s) auf.

Die mittleren Nettozeitlücken liegen dadurch bei abschnittsbezogener Erfassung im Mittel um ca. 3 % niedriger als bei lokaler Erfassung.

Während es kaum Unterschiede bei CIBTR und PBTR zwischen lokaler und abschnittsbezogener Erfassung gibt, akkumulieren sich im betrachteten Szenario die Risiken bei lokaler Erfassung sehr stark, sodass sie sich nicht mehr abbauen können. Bei abschnittsbasierter Erfassung tritt dies nicht auf. Insgesamt wird empfohlen, die abschnittsbezogen berechneten Sicherheitskenngrößen den lokal berechneten vorzuziehen, da bei der lokalen Berechnung Ungenauigkeiten bei der Erfassung der Zeitstempel (Diskretisierung durch Simulationsschrittweite) vorliegen können.

Es tritt in allen untersuchten Varianten ein hoher Anteil sehr großer TTC auf. Wie bereits in der Untersuchung zum Abgleich mit empirischen Daten wird empfohlen, bei der Auswertung TTC über einem bestimmten Schwellenwert (z. B. 200 s) aus der Bewertung und Aggregation auszuschließen.

4.4 Integration der MARZ99-konformen Standard-UZ

4.4.1 Modellierung von SBA-Maßnahmen in AIMSUN

SBA-Anzeigen und ihre Wirkungen können in AIMSUN über Policies und Actions umgesetzt werden. Sie sind unter dem Punkt Traffic Management in AIMSUN angeordnet. In einer Policy werden jeweils mehrere Actions zusammengefasst. Über eine Action können verschiedene i. d. R. zeitlich begrenzte Änderungen, wie z. B. Geschwindigkeitsänderungen auf der Strecke, Streckensperrungen, Störungen etc. modelliert werden. Eine Action betrifft jeweils eine Section im Modell. In einer Policy können mehrere Sections zusammengefasst werden, falls mehrere von einer zeitlich begrenzten Änderung betroffen sind. Policies und damit die zugehörigen Actions, können entweder zu einer bestimmten Zeit oder durch externe Trigger aktiviert werden. In den Simulationen der Untersuchungsstrecken werden die Policies über die API von der externen Unter-

zentrale aus aktiviert. Hierfür wurde für jeden Anzeigequerschnitt und für jedes potenzielle Schaltbild eine Policy mit den zugehörigen Actions vorversorgt. Für eine angezeigte Geschwindigkeitsbegrenzung wurden die Actions „Speed Change“ erstellt und vorversorgt. Die in der Simulation modellierten Beschränkungen sind 120 km/h, 130 km/h, 100 km/h, 80 km/h, 60 km/h mit Stauwarnung. Eine Policy kann aber auch ohne eine konkrete Action bestehen (z. B. durch eine SBA angezeigte Warnung, die keinen direkten Einfluss auf Streckenparameter haben).

Die Aktivierung einer Policy wird durch die Schnittstellenapplikation zum Verhaltensmodell erkannt, sodass sie als Grundlage für die Erkennung der Fahrsituation dienen kann. Somit können auch Policies ohne zugeordnete Action einen Einfluss auf das Fahrverhalten haben.

Zunächst wurden die Geschwindigkeitsbeschränkungen so versorgt, dass die zulässige Höchstgeschwindigkeit im Rahmen der Speed Change Action auf die betroffenen Streckenabschnitte übertragen wurde. Über die Geschwindigkeitsakzeptanz kann dabei eine realistische Geschwindigkeitsverteilung mit Geschwindigkeiten auch oberhalb der zulässigen Höchstgeschwindigkeit erreicht werden. Jedoch wurde aus folgenden Gründen auf die direkte Anwendung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit verzichtet:

- Ändert sich die zulässige Höchstgeschwindigkeit und wird daraufhin die maximale Geschwindigkeit der stromabwärtigen Streckenabschnitte mitgeführt, betrifft dies auch Fahrzeuge, die diesen Anzeigezustand gar nicht wahrgenommen haben.
- Die Wunschgeschwindigkeit und die Geschwindigkeitsakzeptanz beeinflussen beide die Geschwindigkeitswahl, wobei das Minimum aus eigener Wunschgeschwindigkeit und um die Geschwindigkeitsakzeptanz beaufschlagte zulässige Höchstgeschwindigkeit dominiert. Die in der Simulation erreichten Geschwindigkeiten könnten daher unter den empirisch erreichten liegen.

Um diesem Problem zu begegnen, wurde entschieden, die zulässigen Höchstgeschwindigkeiten der Streckenabschnitte nicht anzupassen (d. h. diese auf einem hohen Niveau gemäß der Grundkalibrierung zu belassen), sodass die Geschwindigkeitsbeeinflussung an den Anzeigequerschnitten lediglich

durch die Schnittstellenanwendung zum Wirkmodell realisiert wird. Die entsprechenden Policies für die Geschwindigkeitsbeschränkungen werden dabei durch die Unterzentrale in der Simulation aktiviert. Sie führen wie beschrieben nicht direkt zu einer Anpassung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit des Streckenabschnitts, jedoch wird die Aktivierung der Policies durch die Schnittstellenanwendung zum Wirkmodell erfasst und bei der Auswahl der Wunschgeschwindigkeit berücksichtigt.

4.4.2 Anbindung an AIMSUN

Über die API-Schnittstelle von AIMSUN wurde eine MARZ-konforme Unterzentrale angebunden. Es werden jede Minute die folgenden Werte an den Detektoren in der Simulation erfasst und an die Unterzentrale übermittelt:

- Verkehrsstärken Q_{Lkw} , Q_{Kfz} , Q_{PKW} (Berechnet aus $QLkw$ und $QKfz$)
- Geschwindigkeiten v_{PKW} , v_{Lkw} , v_{Kfz} (Berechnet aus v_{PKW} und v_{Lkw})
- Belegungsgrad
- Nettozeitlücke

Die Unterzentrale wurde mit den Steuerparametern der realen Unterzentrale modelliert und basiert auf einer MARZ-konformen Logik. Mit den erfassten Daten aus der Verkehrssimulation werden für jede Minute die Schaltzustände je AQ auf der Untersuchungsstrecke ermittelt. Der Zustand wird nach der Berechnung jede Minute an die Simulation zurück übergeben. Die Simulation wird während der Berechnungs- und Übertragungszeit von ca. 2-3 s angehalten. Bei einem Schaltbildwechsel werden die entsprechenden Policies, die die Actions zusammenfassen, aktiviert oder deaktiviert. Eine schematische Darstellung ist in Bild 4-13 zu sehen.

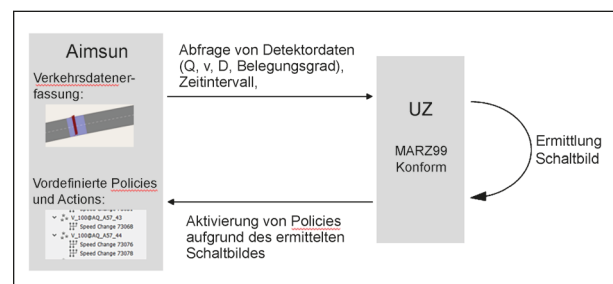


Bild 4-13: Datenflüsse Anbindung Unterzentrale

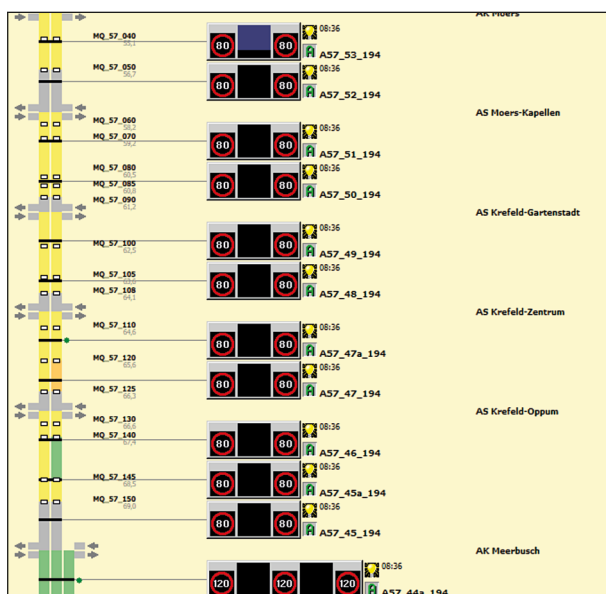


Bild 4-14: GUI A57

4.4.3 Grafische Darstellung

Die aktivierten Actions werden über den AIMSUN Log in Textform ausgegeben. Zur besseren Überprüfung der Visualisierung der Schaltbilder und der Verkehrslage wurde zusätzlich eine GUI erstellt, die das aktuelle Schaltbild während der Simulation darstellt. Die Schaltbilder wurden visuell mit den Schaltbildern aus der Datenaufbereitung verglichen und entsprachen der Realität. In Bild 4-14 ist ein Beispielbild der GUI zu sehen.

5 Durchführung der Simulation für menschliche Fahrer

5.1 Berechnung und Aufzeichnung der Kenngrößen zur Bewertung

Für die Auswertung der Simulationsstudien müssen die in Kapitel 3.3 definierten Bewertungsgrößen aus der Verkehrsflusssimulation (hier: AIMSUN) generiert werden. Einige der Kenngrößen müssen aus Einzelfahrzeugdaten (Zeitlücken, Einzelgeschwindigkeiten, Geschwindigkeitsdifferenzen) berechnet werden. Neben querschnittsbezogenen Kenngrößen (erfasst über in der Simulation versorgte Messquerschnitte) sollen auch abschnittsbezogene Kenngrößen ermittelt werden. Die erhobenen Kenngrößen müssen in effizienter Weise für spätere Auswertungen bereitgestellt werden können. Dazu müssen die Datensätze in einen zeitlichen, räumli-

chen und situativen Kontext gestellt werden können.

Hierzu kommen grundsätzlich folgende Möglichkeiten in Betracht:

- Nutzung der in AIMSUN eingebetteten Funktionen zur Datenaufzeichnung (Datenbank mit vorgegebenem Aufbau)
- Nutzung einer eigenen Datenaufzeichnung (z. B. Datenbank mit bedarfsgerechtem Aufbau und Möglichkeiten der Voragggregation)

Aus Gründen der Performanz sowie auch um störende Einflüsse der Netztopologie auszuschließen (z. B. Anschlussstellen), ist es sinnvoll, die streckenbezogenen Daten nicht durchgehend, sondern nur für bestimmte Streckenabschnitte aufzuzeichnen. Die hierbei zu verwendenden Streckenabschnitte (Kante, Fahrstreifen, Position von/bis) müssen per Konfiguration festgelegt werden können.

Aufgrund von erheblichen Einschränkungen der AIMSUN-eigenen Datenausgabe wurden innerhalb der Wirkmodell-Schnittstellenanwendung Funktionen zur Datenausgabe in eine MySQL-Datenbank mit eigenem Aufbau umgesetzt. Diese nutzen die AIMSUN API, um die relevanten dynamischen Fahrzeugeigenschaften während der Simulation zu erfassen, daraus weitere Kenngrößen zu berechnen, diese zu aggregieren und auszugeben.

Es können sowohl streckenbezogene momentane als auch querschnittsbezogene lokale Daten generiert werden. Für beide dieser Kategorien können Einzelfahrzeugdaten, fahrstreifenbezogen aggregierte Daten und über alle Fahrstreifen aggregierte Daten erfasst werden. Die Generierung der Einzelfahrzeugdaten kann per Konfiguration deaktiviert werden, diese werden dann zwar berechnet, aber nur die darauf aufbauenden aggregierten Daten werden in die Datenbank geschrieben.

Allen Datensätzen werden Informationen zur wahrgenommenen Fahrsituation (Fahrstreifenanordnung und Anzeigezustände) zugeordnet. Hat bei aggregierten Daten das Kollektiv mehrere Zustände wahrgenommen, werden sämtliche der gültigen Zustände als Liste angegeben.

Nachfolgend wird beschrieben, wie die querschnitts- bzw. abschnittsbezogenen Verkehrskenngrößen berechnet werden.

5.1.1 Berechnung querschnittsbezogener Kenngrößen

Jedes Fahrzeug, das einen für die querschnittsbezogene Datenaufzeichnung vorgesehenen Messquerschnitt passiert, wird mit Zeitstempel, Position und weiteren Eigenschaften wie Fahrzeugklasse und Geschwindigkeit erfasst und zunächst gesammelt. Der Zeitstempel (zunächst ein ganzzahliges Vielfaches der Simulationsschrittweite) wird korrigiert, in dem die Wegdifferenz zwischen aktueller Position und Anfangsposition des Messquerschnitts und daraus wiederum der Zeitpunkt des Einfahrens in den Detektor errechnet wird.

Nach Erreichen eines konfigurierbaren Aggregationsintervalls (hier: 60 Sekunden) werden je Messquerschnitt und Fahrstreifen die Fahrzeuge zeitlich aufsteigend sortiert. Für aufeinanderfolgende Fahrzeuge werden dann – einzelfahrzeugbezogen – zunächst Zeitlücken sowie anschließend Weglücken, Geschwindigkeitsdifferenzen und die darauf aufbauenden Kenngrößen berechnet. In einem weiteren Schritt werden diese über das Zeitintervall aggregiert. Die Berechnung der Zeitlücken mithilfe der Zeitstempel ist notwendig, da die Zeit- und Weglücken einzelner Fahrzeuge nicht direkt über die API abgefragt werden können.

Bei größeren Simulationsschrittweiten unterliegen die Zeitlücken trotz der Korrektur einer gewissen Ungenauigkeit durch die Zeitdiskretisierung der Simulation. Daher werden bestimmte Kenngrößen, insbesondere die Individual bzw. Platoon Braking Time Risks, nur mittels der abschnittsbasiert aufgezeichneten Daten ausgewertet. Für eine Bewertung, ob es einen systematischen Unterschied zwischen querschnitts- und abschnittsbezogen ermittelten Bewertungsgrößen des Abstandsverhaltens gibt, wird auf Kapitel 4.3.4 verwiesen.

Neben den auf Einzelfahrzeugdaten basierenden Kenngrößen werden je Messquerschnitt auch konventionelle aggregierte Verkehrskenngrößen aufgezeichnet, insbesondere die Verkehrsstärke (gesamt, differenziert nach Pkw- und Lkw-ähnlichen Fahrzeugen, Bemessungsverkehrsstärke), die Kenngrößen zur Fahrstreifenaufteilung sowie die mittlere lokale Geschwindigkeit (gesamt und differenziert nach Pkw- und Lkw-ähnlichen Fahrzeugen).

5.1.2 Berechnung abschnittsbezogener Kenngrößen

In festgelegten Zeitintervallen (hier: alle 30 Sekunden) werden alle Fahrzeuge erfasst, die sich momentan innerhalb eines definierten Streckenabschnittes befinden. Je Abschnitt und Fahrstreifen werden die Fahrzeuge anhand ihrer Position innerhalb der betroffenen Netzkante (gemessen ab Anfang der Kante) sortiert. Anschließend wird vom Ende der Kante stromaufwärts über die Fahrzeuge iteriert, um zunächst Weglücken sowie anschließend Zeitlücken und die darauf aufbauenden Kenngrößen zu berechnen. Im Gegensatz zur Zeitstempeldifferenz bei querschnittsbezogener Erfassung weist die Erfassung der Weglücken unabhängig von der Simulationsschrittweite eine hohe Genauigkeit auf, da die Fahrzeugposition innerhalb einer Kante keinem signifikanten Diskretisierungsfehler unterliegt. In einem weiteren Schritt werden diese räumlichen Einzelfahrzeugdaten über den Streckenabschnitt aggregiert. Hierbei werden auch die Verkehrsdichte, die Bemessungsverkehrsdichte, die Kenngrößen zur Fahrstreifenaufteilung bezüglich der Dichte sowie die mittlere momentane Geschwindigkeit im Abschnitt ermittelt.

5.2 Simulierte Szenarien

Da im Rahmen der Kalibrierung die Fahrstreifenwahl beeinflusst wurde, um die Fahrstreifenaufteilung entsprechend der Realität zu gestalten, kann die Fahrstreifenaufteilung nicht mehr für die Auswertung herangezogen werden.

In der Simulationsumgebung wird nicht zwischen einer Geschwindigkeitsbegrenzung von 80 km/h und einer Geschwindigkeitsbegrenzung von 80 km/h in einer Baustelle differenziert, daher wurde auf das Baustellenszenario verzichtet. Die geringere Fahrstreifenbreite hat keinen Einfluss auf das Fahrverhalten in der Simulation und kann somit auch nicht abgebildet werden. Das Lkw-Überholverbot kann in der Simulation durch Spursperren umgesetzt werden. Allerdings kommt es dadurch zu unrealistischen Fahrverhalten, da die Lkw stehenbleiben wenn sie keinen Fahrstreifenwechsel vollziehen können und den Fahrstreifen nicht mehr benutzen dürfen.

Aufgrund der Simulationsrandbedingungen wurden die folgenden Szenarien für beide Strecken simuliert:

- Geschwindigkeitsbegrenzung auf 130 km/h (A92) bzw. 120 km/h (A57)
- Geschwindigkeitsbegrenzung auf 100 km/h
- Geschwindigkeitsbegrenzung auf 80 km/h
- Geschwindigkeitsbegrenzung auf 60 km/h (Stauabsicherung)

5.3 Auswertung der Simulationsergebnisse der Szenarien menschliche Fahrer

Zur Auswertung der in Kapitel 3.3 beschriebenen Bewertungsgrößen wurden die Untersuchungsstrecken mit Anbindung der Unterzentrale und des Wirkmodells simuliert. Es wurden alle Szenarien nur mit menschlichen Fahrern, mit 100 % HAF Fahrern und mit verschiedenen Mischszenarien von 10 %, 50 % und 90 % simuliert. Die Größen wurden wie in Kapitel 5.1.1 und 5.1.2 beschrieben erfasst. In diesem Kapitel wird nur auf die Szenarien mit 100 % menschlichen Fahrern eingegangen. Für die A92 wurde ein Auswertungszeitraum von 6:00 Uhr bis 12:00 Uhr und für die A57 der Zeitraum von 14:00 bis 20:00 Uhr für einen Tag gewählt.

In diesem Zeitraum können alle Verkehrsgeschehen, die im vorherigen Kapitel beschrieben sind, abgebildet werden. Für die A57 sind die Bilder im Anhang 8 zu finden. Unter Berücksichtigung des Projektziels, Anpassungen an der Steuerung von SBA in Abhängigkeit vom Anteil an hochautomatisierten Fahrzeugen zu finden, wurden die in Kapitel 3.3 beschriebenen Größen analysiert. SBA dienen zum einem der Gefahrenwarnung und zum anderen der Harmonisierung. Zur Beurteilung des Harmonisierungszeitpunkts und um einen Gesamtüberblick über das Verkehrsgeschehen zu bekommen, wurden für die beiden Untersuchungsstrecken Fundamentaldiagramme einzelner Querschnitte erstellt. In Bild 5-1 ist ein Diagramm für den dreistreifen Abschnitt am MQ 550 auf der A92 zu sehen. Es werden Q und V für die Schaltzustände 130 km/h, 100 km/h, 80 km/h sowie passiv dargestellt. In Kapitel 7.2 werden ähnliche Diagramme mit HAF erstellt und verglichen.

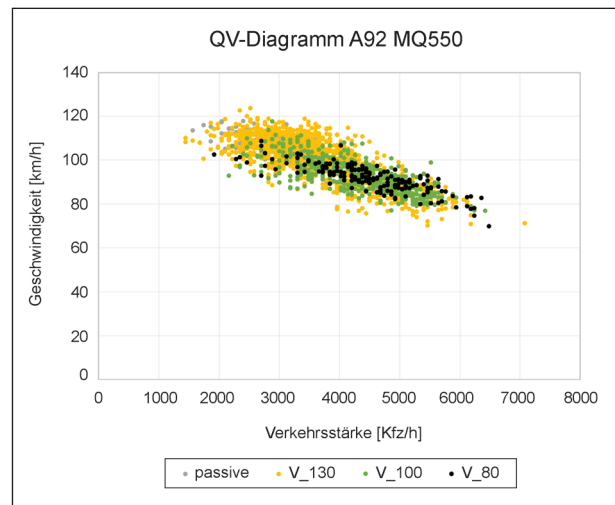


Bild 5-1: QV-Diagramm mit Schaltzustand; Basis Ein-Minuten-Intervalle; A92 MQ 550; menschliche Fahrer

Es wird erwartet, dass sich die Geschwindigkeit und/oder die Verkehrsstärke für die einzelnen Schaltzustände verschieben je nach Anteil an HAF.

Für detailliertere Analysen werden folgende Punkte betrachtet:

- Bewertung des Verkehrsflusses/Störungen
- Geschwindigkeitsverhalten
- Bewertung des Abstandsverhaltens

Mithilfe von Pivot Tabellen wurden Diagramme zur Beschreibung der Bewertungsgrößen erstellt. Da es noch keinen Vergleich zu anderen Ausstattungs-raten gibt, stellen diese lediglich den aktuellen Zustand dar. Ob ein Einfluss des Anteils an automatisierten Fahrzeugen auf diese Größen besteht, wird in Kapitel 7 untersucht.

5.3.1 Bewertung des Verkehrsflusses/Störungen

5.3.1.1 Schwankung der Verkehrsstärke

Die zeitliche Schwankung der Verkehrsstärke wird als Abweichung zum gleitenden Mittelwert dargestellt. Der gleitende Mittelwert wird zentriert aus 5 Ein-Minuten-Intervallen ohne Gewichtung berechnet. Die Messwerte werden an Messquerschnitten erfasst und sind lokal. In Bild 5-2 ist zu sehen, dass die Abweichungen vom gleitenden Mittelwert für alle Schaltzustände ähnlich sind und die Einspeisung den größten Einfluss hat.

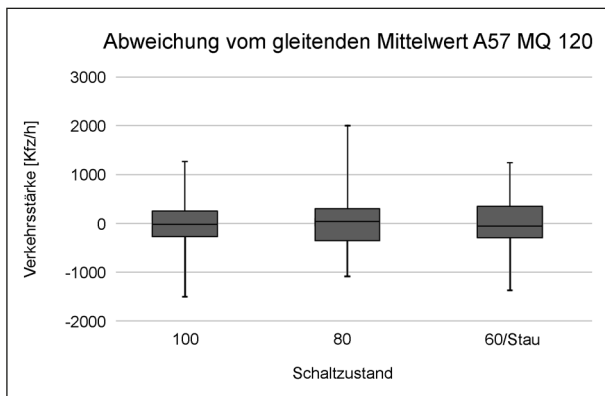


Bild 5-2: Schwankungen der Verkehrsstärke; Basis Ein-Minuten-Intervalle; A57 MQ 120 im zweistreifigen Bereich, menschliche Fahrer

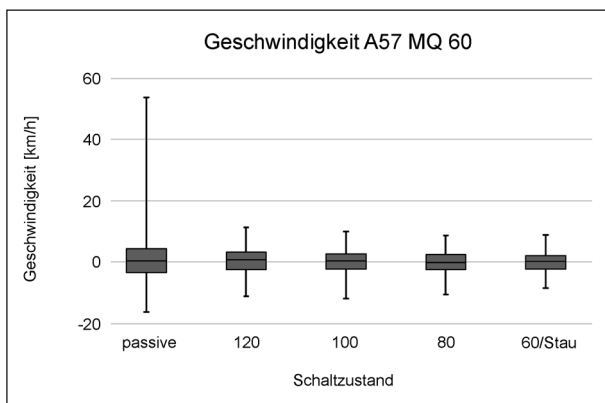


Bild 5-3: Abweichung der Geschwindigkeit von gleitenden 5 min Mittelwert; A57 MQ 60; menschliche Fahrer

5.3.1.2 Schwankung der lokalen mittleren Geschwindigkeit

Die zeitliche Schwankung der Geschwindigkeit wird ebenfalls als Abweichung zum gleitenden Mittelwert dargestellt. Der gleitende 5-Minuten-Mittelwert wird zentriert aus Minutenintervallen ohne Gewichtung berechnet. Die Messwerte werden minütlich an Messquerschnitten erfasst und sind lokal. Es wird nicht zwischen Pkw und Lkw unterschieden. In Bild 5-3 ist zu sehen, dass die Schwankungen für alle aktiven Schaltzustände ähnlich groß sind. Bei passiven Schaltungen steigt das Minimum und Maximum an, da die Fahrzeuge mit ihrer Wunschgeschwindigkeit, die auch sehr hoch sein kann, fahren können.

5.3.1.3 Anzahl der Geschwindigkeitseinbrüche

Die Geschwindigkeitseinbrüche werden an den Messquerschnitten ermittelt. Für einen Geschwindigkeitseinbruch müssen verschiedene Randbedin-

gungen vorliegen. Ein Einbruch ist, im Kontext dieses Berichts, wie folgt definiert:

- Abfall des gleitenden Mittelwerts um mehr als 15 km/h in einem Zeitfenster von 5 min
- Verkehrsstärke mindestens 10 Kfz/min (vor Zusammenbruch)
- Geschwindigkeit nach Zusammenbruch kleiner als 75 km/h

Auf der A57 gab es sowohl am MQ 120 und am MQ 60 mehrere Zusammenbrüche. Sie fanden meist bei einer Geschwindigkeitsbeschränkung von 80 km/h statt. In der Simulation werden die realen Zusammenbrüche am Besten im Bereich der Grundversorgung am MQ 120 abgebildet. Die Ursache der Zusammenbrüche liegt in den Ein- und Ausfädelvorgängen an den Anschlussstellen. Auf der A92 gab es im Simulationszeitraum keine Einbrüche, deren Ursache im untersuchten Abschnitt lag.

5.3.1.4 Mittlere Reisezeit

Die mittlere Reisezeit wird aus Einzelfahrzeugdaten berechnet und über den gesamten Simulationszeitraum gemittelt. Da einzelne Streckenabschnitte z. B. zwischen 2 Anschlussstellen in diesem Netz häufig relativ kurz sind, wird die Reisezeit auf dem gesamten Streckenzug betrachtet. Sie wird zwischen Detektor 190 und Detektor 50 auf der A57 erfasst und beträgt im Durchschnitt 835 s. Auf der A92 wird die Reisezeit zwischen Detektor MQ 460 und MQ 570 erfasst und beträgt im Mittel 380 s.

5.3.2 Bewertung des Geschwindigkeitsverhalten

Für die Bewertung des Geschwindigkeitsverhaltens werden alle Simulationsläufe eines Szenarios je Section und Messquerschnitt zusammengefasst. Der Schaltzustand am betrachteten Querschnitt ist während des Erfassungsintervalls konstant. An der A92 wurde der zweistreifige MQ 500 und der dreistreifige MQ 550 gewählt, da diese Querschnitte auf Sections ohne Zu- und Abfluss und streckenbezogene Änderungen, wie z. B. Fahrstreifenreduktion, liegen und somit auch abschnittsbezogene Daten zur Auswertung vorhanden sind. Auf der A57 wurden mehrere Querschnitte betrachtet. Es wird im zweistreifigen Querschnitt auf den MQ 60 (ohne Grundversorgung) und den MQ 120 (mit Grundversorgung von 100 km/h) eingegangen.

5.3.2.1 Geschwindigkeitsniveau

Das Geschwindigkeitsniveau aller Fahrzeuge wird sowohl lokal, querschnittsbezogen, als auch momentan, abschnittsbezogen, ermittelt. Der SBA Schaltzustand wird dabei berücksichtigt. Mit dieser Auswertung werden die Daten der schaltungsauslösenden Situation und die Daten des aus der Schaltung resultierenden Geschwindigkeitsniveaus zusammen betrachtet. Eine detailliertere Betrachtung ist aufgrund der zur Verfügung stehenden Simulationsausgaben nicht möglich. Der Schaltgrund bzw. der Schaltzustand des vorherigen Aqs kann aufgrund der gespeicherten Simulationsausgaben nicht mit berücksichtigt werden. In Bild 5-5 ist das lokale Geschwindigkeitsniveau für einen zweistreifigen Querschnitt auf der A92 zu sehen. Die entsprechende momentane Geschwindigkeit für diesen Querschnitt ist in Bild 5-4 dargestellt. Bis auf das kleinere Minimum der lokalen Geschwindigkeit bei einem Schaltzustand von 80 km/h ist der Unter-

schied zwischen der momentanen und lokalen Geschwindigkeit gering. Dies gilt auch für die A57, daher wird in den weiteren Auswertungen hauptsächlich auf das lokale Geschwindigkeitsniveau eingegangen. Auf der A92 ist das Grundniveau der Geschwindigkeit etwas höher als auf der A57, was besonders deutlich bei einer Beschränkung von 80 km/h ist. Für eine Beschränkung von 100 km/h ist das Niveau auf der A57 ebenfalls geringer, wie in Bild 5-6, in der MQ 60 dargestellt wird, zu sehen ist. Etwas deutlicher ist der Unterschied am MQ 120, dargestellt in Bild 5-7, an dem eine Grundversorgung von 100 km/h vorliegt. Das Geschwindigkeitsniveau bei der Beschränkung von 100 km/h ist höher als an Querschnitten ohne Grundversorgung. Bei Beschränkung von 80 km/h ist das Geschwindigkeitsniveau ähnlich wie bei Querschnitten ohne Grundversorgung. Das Geschwindigkeitsniveau während einer Stauschaltung ist ähnlich bei allen Querschnitten, an denen eine Stauschaltung anlag.

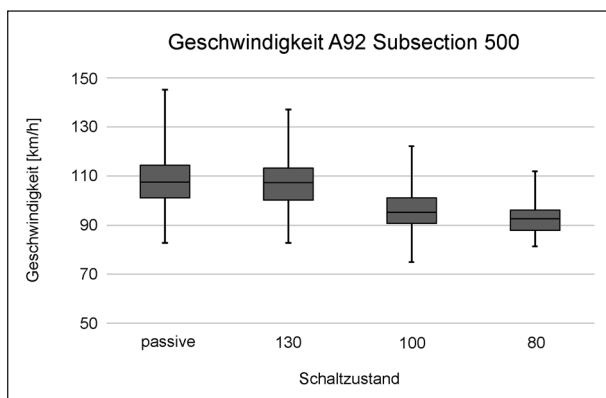


Bild 5-4: Momentane Geschwindigkeit zweistreifiger Bereich; Basis Ein-Minuten-Intervalle; A92 Subsec 500, menschliche Fahrer

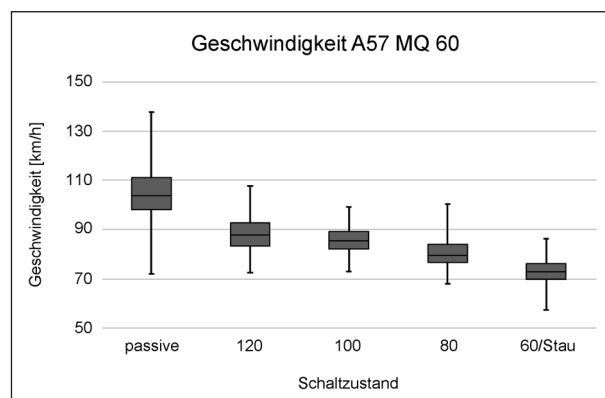


Bild 5-6: Lokale Geschwindigkeit zweistreifiger Bereich; Basis Ein-Minuten-Intervalle; A57 MQ 60, menschliche Fahrer

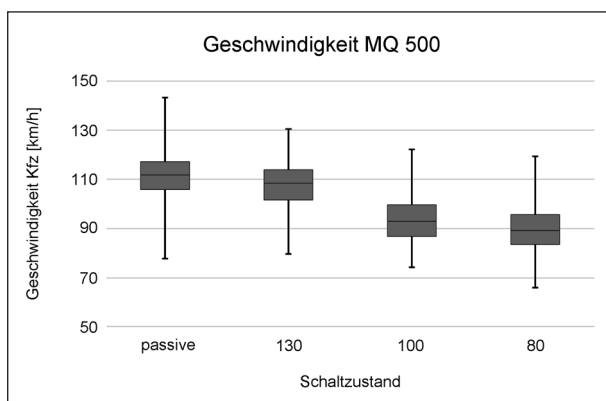


Bild 5-5: Lokale Geschwindigkeit zweistreifiger Bereich; Basis Ein-Minuten-Intervalle; A92 MQ 500, menschliche Fahrer

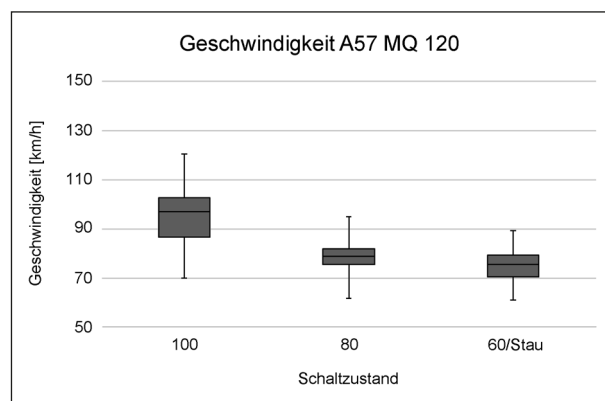


Bild 5-7: Lokale Geschwindigkeit A57 zweistreifiger Bereich mit Grundversorgung von 100 km/h, A57 MQ 120; menschliche Fahrer

5.3.2.2 Standardabweichung Geschwindigkeit

Die Standardabweichungen für die Geschwindigkeit werden sowohl lokal am Querschnitt als auch momentan, abschnittsbezogen ermittelt. Auf der A92 wird die Standardabweichung der Geschwindigkeit, sowohl für den zweistreifigen als auch den dreistreifigen Bereich, mit zunehmender Dichte (streckenbezogen) und zunehmender Verkehrsstärke (querschnittsbezogen) kleiner, wie in Bild 5-9 zu sehen ist. Wenn man einen Dichtebereich betrachtet, ist ebenfalls zu sehen, dass je geringer die erlaubte Geschwindigkeit ist, die Standardabweichung abnimmt. Auf der A57 ist der Abfall mit zunehmender Verkehrsstärke und Dichte nicht so deutlich ausgeprägt wie auf der A92. Die Standardabweichung in einem Dichtebereich oder einer Verkehrsstärkeklasse nimmt ebenfalls mit niedrigeren Geschwindigkeitsbegrenzungen ab. Ein Beispiel ist in Bild 5-8 dargestellt. Die Standardabweichung ist für eine Beschränkung von 100 km/h größer im Be-

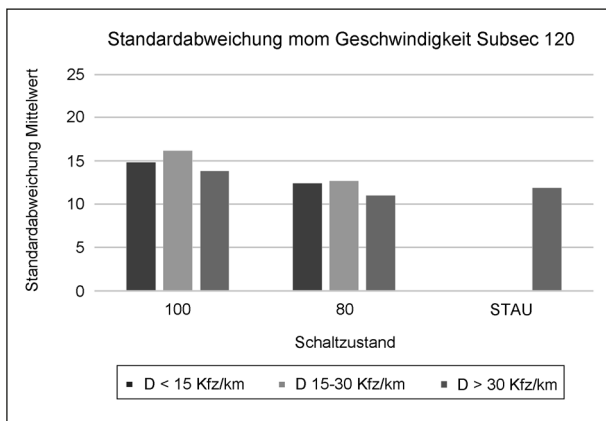


Bild 5-8: Standardabweichung momentane Geschwindigkeit zweistreifiger Bereich mit Grundversorgung von 100 km/h; Basis Ein-Minuten-Intervalle; A57 Subsec 120; menschliche Fahrer

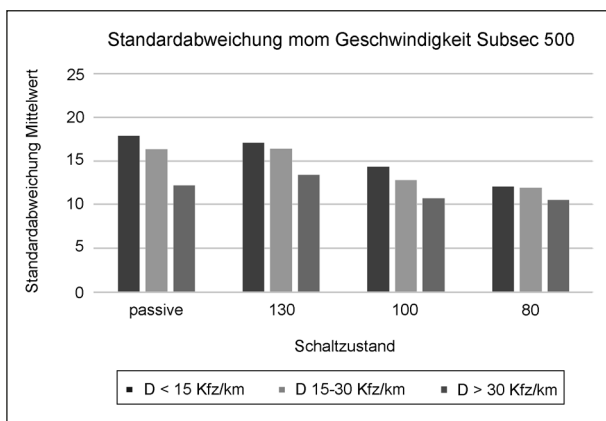


Bild 5-9: Standardabweichung momentane Geschwindigkeit zweistreifiger Bereich; Basis Ein-Minuten-Intervalle; A92 Subsec 500, menschliche Fahrer

reich der Grundversorgung als an den anderen zweistreifigen Querschnitten an der A57 ohne Grundversorgung.

5.3.2.3 Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen Fahrstreifen

Es werden die Kfz-Geschwindigkeitsdifferenzen (FS2 – FS1 und FS3 – FS2) der Fahrstreifen am Messquerschnitt je Minutenintervall berechnet. Bei einer positiven Differenz ist die Geschwindigkeit auf dem linken Fahrstreifen größer. Die Daten wurden in drei Klassen nach der Verkehrsstärke eingeteilt. In der Klasse Q1 < 2.000 Kfz/h (zweistreifiger Bereich) gibt es häufig kein Fahrzeug auf dem Nachbarstreifen. Dadurch ist das Maximum und Minimum sehr groß. Die Differenzen werden mit zunehmender Verkehrsstärke geringer. Sie nehmen ebenfalls mit einer stärkeren Geschwindigkeitsbeschränkung ab. In Bild 5-11 ist MQ 120 auf der A57 dargestellt. Auf der A57 sind die Differenzen größtenteils positiv. Auf der A92 werden sie in der Klasse Q3 >

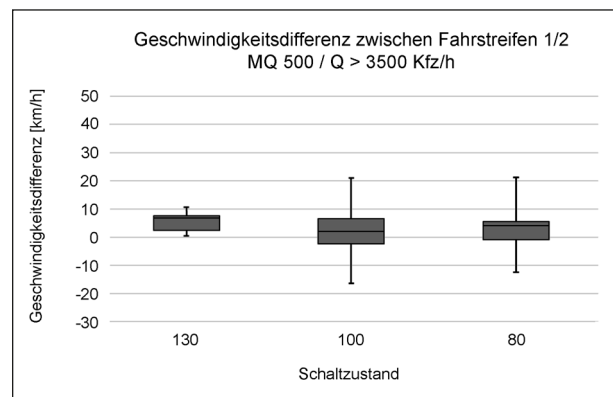


Bild 5-10: Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Fahrstreifen im zweistreifigen Bereich; Basis Ein-Minuten-Intervalle; A92 MQ 500; menschliche Fahrer

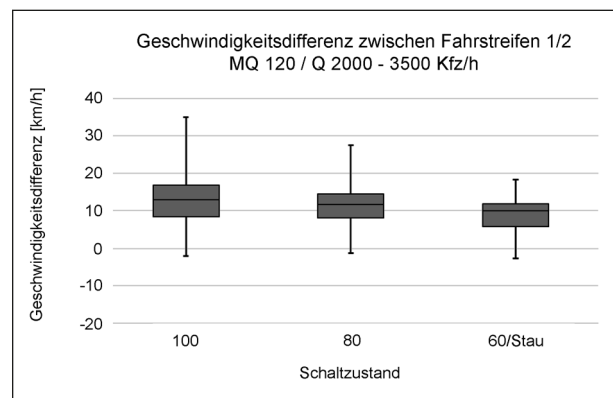


Bild 5-11: Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Fahrstreifen; Basis Ein-Minuten-Intervalle; A57 MQ 120; menschliche Fahrer

3.500 Kfz/h (zweistreifiger Bereich) auch negativ wie in Bild 5-10 dargestellt. Die Maxima und Minima werden mit zunehmender Verkehrsstärke kleiner. Im dreistreifigen Bereich auf der A92 sind die Differenzen zwischen dem ersten und zweiten und dem zweiten und dritten Fahrstreifen bis zu einer Verkehrsstärke von ca. 4.500 Kfz/h ähnlich. In der Klasse Q3 > 4.500 Kfz/h ist die Differenz zwischen dem zweiten und dritten Fahrstreifen deutlich größer als zwischen dem ersten und zweiten Fahrstreifen.

5.3.2.4 Geschwindigkeitsdifferenzen aufeinanderfolgender Fahrzeuge

Die Geschwindigkeitsdifferenzen aufeinanderfolgender Fahrzeuge werden querschnitts- und abschnittsbezogen getrennt nach Pkw und Lkw ermittelt. Sie sind negativ wenn das vorrausfahrende Fahrzeug schneller ist. Pkw haben, wie in Bild 5-13 zu sehen ist, eine geringe Geschwindigkeitsdifferenz zum Vorderfahrzeug. Sie ist im positiven und negativen Bereich ähnlich ausgeprägt. Aufgrund des höheren Lkw-Anteils auf FS 1 ist die Geschwindigkeitsdifferenz auf diesen Fahrstreifen etwas größer als auf dem linken Fahrstreifen. Die minimalen und maximalen Differenzen werden mit zunehmender Beschränkung auf allen Abschnitten kleiner.

5.3.3 Bewertung des Abstandverhaltens

5.3.3.1 Mittlere Nettozeitlücke

Die mittleren Nettozeitlücken werden abschnittsbezogen und fahrstreifenfein ermittelt. Sie sind größtenteils über eine Sekunde. In Bild 5-12 ist die Zeitlückenverteilung in der Subsection 60/70 im zwei-

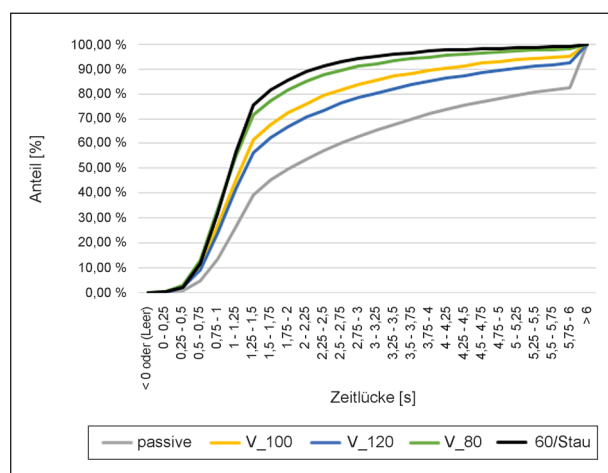


Bild 5-12: Zeitlückenverteilung; Einzelfahrzeugdaten; A57 Subsection 60/70; menschliche Fahrer

streifigen Querschnitt auf der A57 abgebildet, da dort auch der passive und 120 km/h Schaltzustand vorkommt. Im passiven Schaltzustand ist der Anteil an großen Zeitlücken am größten. Die Zeitlücken werden mit stärkerer Geschwindigkeitsbegrenzung kleiner, was auch auf die zunehmende Verkehrsstärke zurückzuführen ist. Es fällt auf, dass die Zeitlückenverteilung für eine Beschränkung von 80 km/h und 60/Stau sehr ähnlich sind. Dies ist an allen Querschnitten zu sehen. Auf der A92 ist die Zeitlückenverteilung für die Beschränkungen von 100 km/h und 80 km/h ähnlich. Es ist kein deutlicher Unterschied in der Zeitlückenverteilung zwischen einer Beschränkung auf 100 km/h und der Grundversorgung zu sehen.

5.3.3.2 Mittlere (Compensated) Individual BrakingTime Risk (CIBTR)

Die mittlere Compensated Individual Braking Time Risk wird aus Einzelfahrzeugen je Abschnitt fahrstreifenfein berechnet. Wie in Kapitel 4.3.4 beschrieben ist die Ausprägung des CIBTR in der Simulation niedriger als in der Realität. Dadurch können zwar Unterschiede zwischen den einzelnen Szenarien untersucht werden aber, die absoluten Werte sind nicht auf die Realität übertragbar. Der Anteil an positiven (unsicheren) CIBTR ist auf dem zweiten und dritten Fahrstreifen größer als auf dem rechten. Der Anteil steigt ebenfalls bei einer stärkeren Geschwindigkeitsbeschränkung an. In Bild 5-14 ist die CIBTR für einen zweistreifigen Bereich auf der A92 dargestellt. Auf der A57 ist der negative Bereich auf den linken Fahrstreifen etwas größer, was auf größere Zeitlücken und damit sicherere Abstände schließen lässt.

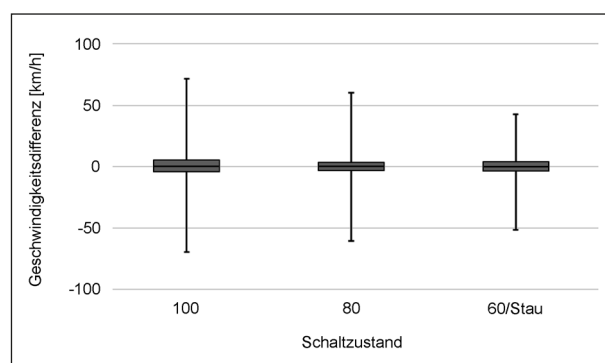


Bild 5-13: Geschwindigkeitsdifferenz zum Vorderfahrzeug Pkw; Einzelfahrzeugdaten; A57 Subsec 120; menschliche Fahrer

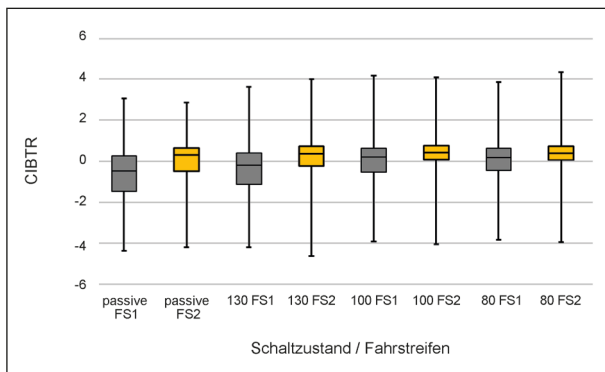


Bild 5-14: CIBTR; Einzelfahrzeugdaten A92 Subsec 500, menschliche Fahrer

6 Ermittlung des optimalen Fahrzeugsteuerungsverhaltens für automatisierte Fahrzeuge

In Kapitel 6.1 werden die Anforderungen an automatisiertes Fahren aus der Sicht der Betreiber beschrieben. In Kapitel 6.2 werden die theoretischen Anforderungen an die Ausprägung der Fahrzeugsteuerung sowie verschiedene Durchdringungen dargestellt. In Kapitel 6.3 wird die Modellierung automatisierten Fahrverhaltens einschließlich der hierzu definierten Rahmenbedingungen und der Umsetzung in der gewählten Simulationsumgebung AIMSUN beschrieben. Auf dieser Grundlage wurden Simulationsstudien mit automatisierten Fahrzeugen in unterschiedlichen Durchdringungsszenarien durchgeführt. Die Ergebnisse der Simulationsstudien werden ebenfalls in diesem Kapitel wiedergegeben und bilden die Grundlage für eine detailliertere Diskussion in Kapitel 8.

6.1 Erhebung Anforderungen Betreiber an automatisierte Fahrzeugsteuerung

Ein wesentliches Ziel dieses Vorhabens bestand darin, ein Fahrverhaltensmodell für automatisierte Fahrzeuge zu formulieren, mit dem ein aus Sicht von Straßenbetreibern bzw. Betreibern von Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA) wünschenswertes Fahrverhalten entsteht. Dies schließt insbesondere ein, dass automatisierte Fahrzeuge durch ihr individuelles Verhalten zu einer Verbesserung der

Verkehrssicherheit, einer Erhöhung der Leistungsfähigkeit und einer Verstärkung des Verkehrsflusses beitragen sollten – die bereits heute beobachtbaren gewünschten Wirkungen von SBA sollen somit unterstützt, zusätzliche negative Wirkeinflüsse dagegen vermieden werden.

6.1.1 Anforderungen aus Betreibersicht

In einem ersten Schritt wurden Anforderungen an die automatisierte Fahrzeugsteuerung aus der Perspektive der Betreiber von SBA aufgestellt. Diese wurden zunächst durch das Konsortium erstellt und auf Grundlage von Diskussionen im Betreuerkreis überarbeitet. Tabelle 6-1 zeigt acht grundlegende Anforderungen, die an eine automatisierte Fahrzeugsteuerung gestellt werden.

6.1.2 Anforderungen und Annahmen aus technischer und ergonomischer Sicht

Neben Anforderungen der Straßenbetreiber wurden auch technische Grenzen für das automatisierte Fahren sowie Aspekte des Fahrkomforts und der Nutzerakzeptanz berücksichtigt, um sicherzustellen, dass die auf dieser Grundlage zu formulierenden Verhaltensmodelle grundsätzlich realisierbar sind.

6.1.2.1 Automatisierungsstufe

Es sei festgelegt, dass die im Rahmen dieses Vorhabens modellhaft abgebildeten automatisierten Fahrzeuge mindestens der Automatisierungsstufe 4 gemäß [SAE18] bzw. [VDA18] entsprechen (vgl. Kapitel 2.3.1). Das bedeutet u. a., dass der oder die Fahrzeugführende den Fahrprozess nicht dauerhaft überwachen, sondern allenfalls nach Aufforderung die Fahraufgabe wieder übernehmen können muss. Diese Festlegung erlaubt es, Zeit- und Weglücken auch unterhalb der ansonsten aufgrund der menschlichen Reaktionsfähigkeit zu fordernden Grenzen zu wählen. Es sei weiterhin festgelegt, dass ein automatisiertes Fahrzeug durchgehend mit aktivierter automatisierter Fahrfunktion durch den betrachteten Streckenabschnitt fährt. Übergaben bzw. Übernahmen der Fahraufgabe zwischen Mensch und automatisierter Fahrzeugsteuerung finden nicht statt. Das gilt auch für Einfahr- oder Ausfahrssituationen.

Nr.	Anforderung
A1	Zuverlässige Erkennung verkehrsrechtlicher Vorgaben und Anordnungen: Sämtliche verkehrsrechtlichen Vorgaben und Anordnungen müssen fahrzeugseitig zuverlässig wahrgenommen werden. Auch die dynamischen Zustände von Wechselverkehrszeichen müssen zuverlässig erkannt werden können.
A2	Berücksichtigung und Einhaltung verkehrsrechtlicher Vorgaben und Anordnungen: Grundsätzlich sind sämtliche verkehrsrechtlichen Vorgaben und Anordnungen im automatisierten Fahrprozess zu berücksichtigen und einzuhalten. Aus der Tatsache, dass bei Regelübertretungen durch menschliche Verkehrsteilnehmende eine gewisse (v. a. auch durch Messungenauigkeit begründete) Toleranz gewährt wird, kann keine Duldung von Regelübertretungen durch eine automatisierte Fahrzeugsteuerung abgeleitet werden.
A3	Sichere Geschwindigkeits- und Abstandswahl: Im Rahmen des durch A2 gegebenen Handlungsspielraums muss das Fahrverhalten so gewählt werden, dass stets ein sicheres Anhalten möglich ist.
A4	Vermeidung einer Behinderung des Verkehrs: Im Rahmen des durch A2 und A3 gegebenen Handlungsspielraums muss das Fahrverhalten so gewählt werden, dass andere Verkehrsteilnehmer nicht mehr als nach den Umständen unvermeidbar behindert oder belästigt werden (vgl. §1, Abs. 2 StVO).
A5	Vermeidung von subj. Gefährdung/Bedrängen: Andere Verkehrsteilnehmer dürfen sich durch das Fahrverhalten automatisierter Fahrzeuge nicht bedrängt und zu abrupten Manövern veranlasst fühlen (z. B. durch geringen Abstand).
A6	Vorhersehbarkeit und Nachvollziehbarkeit: Das Fahrverhalten sollte für andere Verkehrsteilnehmer (insbesondere menschliche Fahrer) vorhersehbar und nachvollziehbar sein.
A7	Vorausschauende, harmonische Fahrweise: Das Fahrverhalten automatisierter Fahrzeuge sollte insgesamt möglichst homogen sein, d. h. es sollte eine vorausschauende Fahrweise angestrebt werden, die durch möglichst wenige Fahrstreifenwechsel oder stärkere Brems- und Beschleunigungsmanöver gekennzeichnet ist. Das Fahrverhalten sollte somit zu einer Harmonisierung des Verkehrsflusses und zu einer Dämpfung von Stauwellen beitragen.
A8	Kooperation: Das automatisierte Fahrverhalten sollte Kooperation zwischen Verkehrsteilnehmern in solchen Situationen ermöglichen, in denen dies auch im heutigen Verkehrsgeschehen praktiziert und erwartet wird (insbesondere Fahrstreifenwechsel).

Tab. 6-1: Anforderungen an eine automatisierte Fahrzeugsteuerung aus Betreibersicht

6.1.2.2 Umgebungswahrnehmung

Die Sensorreichweite eines automatisierten Fahrzeugs nach vorn bildet eine Obergrenze für die maximal als sicher anzusetzende Fahrgeschwindigkeit. Mit aktuell am Markt verfügbaren Sensortechnologien lassen sich typischerweise Sensorreichweiten von 250 m erreichen; eine erhebliche Erhöhung dieser Reichweite durch Verbesserungen der Sensortechnologien wird nicht angenommen, zumal dann die Streckengeometrie (Kurven) einen einschränkenden Faktor bildet. Eine Reichweiten-erhöhung durch Fahrzeugvernetzung (V2X, hier insbesondere Cooperative Awareness Messages) kann ebenfalls nicht berücksichtigt werden, da in vielen Szenarien keine 100%ige Ausstattung des Fahrzeugkollektivs unterstellt wird und da im Rahmen des sicheren Anhaltens auch auf Objekte und Hindernisse reagiert werden muss, die keine Fahrzeuge sind oder deren Funktion gestört ist.

6.1.2.3 Fahrzeugkonnektivität

Auch wenn eine erweiterte Vorausschau z. B. durch V2X-Informationen nicht für eine erhöhte Fahrgeschwindigkeit genutzt werden kann, bietet Fahrzeugvernetzung verschiedene Möglichkeiten für ein vorausschauendes Fahren. Für automatisierte Fahrzeuge sei unterstellt, dass diese grundsätzlich über die Möglichkeit verfügen, Informationen über andere Verkehrsteilnehmer, den vorausliegenden Streckenabschnitt sowie den Zustand der SBA zu empfangen. Wie dies technisch realisiert ist, wird hier nicht eingehender betrachtet, jedoch wird unterstellt, dass dadurch Folgendes ermöglicht wird:

- Eine zuverlässige und frühzeitige Wahrnehmung der Anzeigezustände einer SBA
- Eine erweiterte Erfassung der Verkehrsbedingungen und dadurch eine frühzeitige Anpassung an stromabwärtige Verhältnisse (z. B. Stauende)

- Eine Kommunikation eigener Fahrabsichten sowie eine kooperative Abstimmung von Fahrmanövern, z. B. bei Fahrstreifenwechseln

Es wird unterstellt, dass bei zu erwartenden bzw. angezeigten Fahrabsichten anderer Fahrzeuge, etwa beim Fahrstreifenwechsel in Verflechtungsbereichen, eine Kooperation sowohl zwischen automatisierten Fahrzeugen untereinander als auch mit menschlichen Verkehrsteilnehmern in ähnlicher Weise wie zwischen menschlichen Verkehrsteilnehmern gelingt.

Es wird jedoch davon ausgegangen, dass kein kommunikationsgestütztes Platooning stattfindet, d. h. jedes automatisierte Fahrzeug muss autark und ausschließlich auf Grundlage seiner Wahrnehmung des Vorausfahrenden eine sichere Weg- und Zeitlücke bestimmen.

6.1.2.4 Fahrzeugaktorik

Als Begrenzung für Beschleunigung und Verzögerung automatisierter Fahrzeuge werden die Feststellungen und Schlussfolgerungen aus Kapitel 2.3 herangezogen. Es muss sowohl der Fahrkomfort für die Fahrzeuginsassen als auch die Vorhersehbarkeit des Fahrverhaltens für andere Verkehrsteilnehmer (Anforderung A6) gewährleistet sein. Daher unterliegen Beschleunigung und Verzögerung praktischen Grenzen deutlich unterhalb der technischen Möglichkeiten. Zusätzlich trägt eine moderate Wunschbeschleunigung und -verzögerung zu einer harmonischen Fahrweise bei (Anforderung A7). Bei der Umsetzung in der in diesem Vorhaben verwendeten Simulationsumgebung muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Parameter der Simulationsmodelle nicht immer mit den korrespondierenden physikalischen Eigenschaften eines realen Fahrzeugs übereinstimmen.

6.1.3 Festlegungen zu Randbedingungen für die automatisierte Fahrzeugsteuerung

Aus den in den vorangegangenen Kapiteln aufgestellten Anforderungen und Annahmen wurden konkrete Randbedingungen abgeleitet und mit dem Betreuerkreis abgestimmt, die in einer automatisierten Fahrzeugsteuerung unbedingt eingehalten werden sollen (nachfolgend bezeichnet mit „müssen“ bzw. „dürfen nicht“). Außerdem wurden weitere Merkmale einer automatisierten Fahrzeugsteuerung aufge-

stellt und abgestimmt, die als aus Betreibersicht wünschenswert angesehen werden (nachfolgend bezeichnet mit „sollten“ bzw. „sollten nicht“).

6.1.3.1 Fahrstreifenwahl

Für die Fahrstreifenwahl gelten folgende Randbedingungen:

- 1.) Automatisierte Fahrzeuge müssen das Rechtsfahrgebot einhalten (Anforderung A2).
- 2.) Bei freiem Fahrstreifenwechsel (Überholen) sollte die verkehrliche Verträglichkeit (z. B. Geschwindigkeitsniveau und Dichte auf Zielfahrstreifen) berücksichtigt werden.
- 3.) Fahrstreifenwechsel bei Fahrstreifenreduktion sollten in Abhängigkeit von der Verkehrsdichte entweder frühzeitig (geringe Dichte) oder nach dem Reißverschlussprinzip (hohe Dichte) durchgeführt werden.
- 4.) Notwendige Fahrstreifenwechsel zum Folgen der Fahrtroute (insbesondere vor Anschlussstellen) sollten frühzeitig eingeleitet werden, es sei denn, sie stehen in Konflikt zum Rechtsfahrgebot.

Es ist zu beachten, dass die genannten Merkmale des Fahrstreifenwahlverhaltens für alle Fahrzeuge einzuhalten sind und es keine Unterschiede zwischen HAF und menschlichen Fahrern gibt.

6.1.3.2 Wunschgeschwindigkeit

Für die Wahl der Wunschgeschwindigkeit automatisierter Fahrzeuge gelten folgende Randbedingungen:

- 1.) Automatisierte Fahrzeuge dürfen nicht schneller als 130 km/h fahren.

Aufgrund der Annahmen zur Sensorreichweite (vgl. Kapitel 6.1.2) könnte mit höheren Geschwindigkeiten die Anforderung sicheren Anhaltens (Anforderung A3) u. U. nicht mehr gewährleistet werden.

- 2.) Fahrzeugspezifische zulässige Höchstgeschwindigkeiten müssen uneingeschränkt eingehalten werden.

Das betrifft insbesondere Lkw und Lkw-ähnliche Fahrzeuge, deren Geschwindigkeit oft auf 80 km/h,

teils auch auf 100 km/h (Busse, Pkw mit Anhänger) begrenzt ist. Dass derartige rechtliche Rahmenbedingungen für automatisierte Fahrzeuge in Zukunft angepasst werden könnten, ist zwar grundsätzlich denkbar, wird in dieser Untersuchung jedoch nicht einbezogen. Vielmehr könnte ein solcher Handlungsbedarf als Ergebnis der Untersuchungen erkannt werden.

- 3.) Automatisierte Fahrzeuge müssen zulässige Höchstgeschwindigkeiten eines Streckenabschnittes unbedingt einhalten.

Verkehrsrechtliche Anordnungen gelten gleichermaßen für automatisierte und konventionelle Fahrzeuge (Anforderung A2). Eine Orientierung der Wunschgeschwindigkeit am aktuellen bzw. erwarteten Geschwindigkeitsniveau (s. u.), welche zu einer Angleichung der Fahrgeschwindigkeiten und somit zu einem harmonischeren Verkehrsfluss führen soll, darf nur unter Einhaltung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit erfolgen. Ansonsten wären u. a. Adaptionseffekte anderer Verkehrsteilnehmer zu befürchten.

Eine sich im Streckenverlauf ändernde zulässige Höchstgeschwindigkeit muss unmittelbar ab Beginn ihrer Gültigkeit eingehalten werden, d. h. ab dem Standort des (Wechsel-)Verkehrszeichens, das diese anordnet. Eine im menschlichen Fahrverhalten beobachtbare Adaption erst stromabwärts des Gültigkeitsbeginns ist nicht zulässig. Es wird davon ausgegangen, dass automatisierte Fahrzeuge auch bei Wechselverkehrszeichen bereits rechtzeitig im Vorfeld über den Anzeigezustand informiert sind (vgl. Kapitel 6.1.2.3). Ob dies allein durch sensorische Wahrnehmung der Wechselzeichengeber oder unterstützt durch Infrastruktur-zu-Fahrzeug-Kommunikation erfolgt, sei offengelassen.

Lediglich im Falle zeitlicher Zustandswechsel von Wechselverkehrszeichen auf eine niedrigere zulässige Höchstgeschwindigkeit wird eine gewisse Toleranz zur Adaption für solche Fahrzeuge eingeräumt, die sich nicht mehr oder nur mit starker Verzögerung an diese neue Geschwindigkeitsbeschränkung anpassen können. Die gegenwärtig vorherrschende Systemarchitektur von SBA sieht keine zeitliche Vorausschau auf Schaltzustandswechsel vor (wie z. B. bei Lichtsignalanlagen mittels Signal Phase und Timing-Nachrichten möglich), sodass Informationen zum Zustandswechsel nicht vorab zur Verfügung stehen.

- 4.) Automatisierte Fahrzeuge sollten sich mit mäßiger Verzögerung bzw. Beschleunigung an neue zulässige Höchstgeschwindigkeiten im Streckenverlauf anpassen.

Hierdurch wird zu einem harmonischeren Verkehrsfluss beigetragen. Bei Anpassung auf eine niedrigere zulässige Höchstgeschwindigkeit setzt dies voraus, dass automatisierte Fahrzeuge frühzeitig im Vorfeld über den Anzeigezustand informiert sind, insbesondere bei größeren Sprüngen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit, die bis zu 40 km/h betragen können.

6.1.3.3 Fahrzeugfolge und Abstand

Nachfolgend werden Rahmenbedingungen für die Abstandswahl und die Reaktion auf Vorausfahrende benannt.

- 1.) Es muss ein zulässiger und als sicher geltender Abstand eingehalten werden.

Gemäß Anforderung A3 muss ein Abstand gewählt werden, der auch bei einer plötzlichen starken Verzögerung des Vorausfahrenden eine ebensolche Verzögerung (ggf. bis zum Halt) noch ermöglicht, ohne dass es zur Kollision kommt. Da die StVO im Allgemeinen keinen konkreten Mindestabstand vorschreibt, kann der einzuhaltende Abstand unter Berücksichtigung dieser Anforderung frei gewählt werden. Da der einzuhaltende Abstand ein Sicherheitsabstand ist, darf er im Falle einer starken Verzögerung des Vorausfahrenden kurzzeitig unterschritten werden, soll dann jedoch rasch wieder eingehalten werden. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass kein kommunikationsgestütztes Platooning stattfindet, d. h. jedes automatisierte Fahrzeug muss autark und ausschließlich auf Grundlage seiner Wahrnehmung des Vorausfahrenden eine sichere Weg- und Zeitlücke bestimmen.

Für Lkw mit einer zulässigen Gesamtmasse über 3,5 t sowie für Kraftomnibusse gilt gemäß § 4 Abs. 3 der StVO, dass diese einen Mindestabstand von 50 m einhalten müssen, sofern ihre Geschwindigkeit mehr als 50 km/h beträgt. Diese Forderung trägt jedoch vor allem der menschlichen Reaktionsfähigkeit, der Verzögerungseigenschaften und der Folgen im Falle eines Auffahrunfalls für diese Fahrzeugklasse Rechnung. Es kann angenommen werden, dass diese Forderung für automatisierte Lkw und Kraftomnibusse abweichend festgelegt wird. Außerdem ist anzumerken, dass diese Anforderung

nicht ohne weiteres in der mikroskopischen Verkehrssimulation umsetzbar ist.

- 2.) Es sollte ein Abstand eingehalten werden, der einen ausreichenden Spielraum zur Kompensation von Störeinflüssen bietet.

Hierdurch wird ein Beitrag zur Dämpfung von Stauwellen geleistet sowie Kooperation z. B. an Einfahrten erleichtert.

- 3.) Auf Verzögerungen und Beschleunigungen des Vorausfahrenden sollte möglichst gedämpft reagiert werden.

Hierzu muss ein Abstand mit ausreichendem Spielraum verfügbar sein (s. o.), der kurzzeitig unterschritten wird. Der Wunschabstand muss also nicht abrupt, sondern allmählich wieder erreicht werden. Die Unterschreitung des Abstands darf den zulässigen sowie den als sicher geltenden Abstand dabei nicht unterschreiten (vgl. Ziffer 1).

Während Anfahrvorgänge bei Beschleunigung des Vorausfahrenden bei dichtem Verkehr allgemein mit mäßiger Beschleunigung stattfinden sollten, wäre bei Anfahrvorgängen aus der stromabwärtigen Front eines Staubereichs (Staubabfluss) eine stärkere Beschleunigung wünschenswert. Diese Unterscheidung kann nicht allein durch die Fahrzeugsensoren erfolgen, da z. B. eine weitere stromabwärts liegende Stauwelle außerhalb der Sensorreichweite liegt. Wie entsprechende Funktionen zur Situationsbewertung sowie Informationsbereitstellung gestaltet sein könnten, wird an dieser Stelle nicht eingehender betrachtet.

- 4.) Automatisierte Fahrzeuge sollten sich kooperativ verhalten und auf kooperatives Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer reagieren können.

Bei zu erwartenden bzw. angezeigten Fahrabsichten anderer Fahrzeuge, etwa beim Fahrstreifenwechsel in Verflechtungsbereichen, sollte eine Kooperation sowohl zwischen automatisierten Fahrzeugen untereinander als auch mit menschlichen Verkehrsteilnehmern in ähnlicher Weise wie zwischen menschlichen Verkehrsteilnehmern gelingen. Welche Funktionen auf Fahrzeugseite (z. B. Umgebungswahrnehmung und Abschätzung der Fahrabsichten, Verbreitung von Fahrabsichten z. B. via V2X) dazu notwendig sind und welche Anforderungen an diese zu stellen sind, wird in diesem Vorhaben nicht näher betrachtet.

6.2 Festlegung Unterszenarien Fahrzeugsteuerung und Durchdringung

Zusätzlich zu den verkehrlichen Szenarien (vgl. Kapitel 3) wurden noch Szenarienvarianten bezüglich der automatisierten Fahrzeuge vorgeschlagen und abgestimmt. Variiert werden einerseits bestimmte Eigenschaften der automatisierten Fahrzeugsteuerung sowie andererseits die Durchdringung automatisierter Fahrzeuge, d. h. der Anteil automatisierter Fahrzeuge im gesamten Fahrzeugkollektiv.

6.2.1 Ausprägungen der Fahrzeugsteuerung

Um die Wirkungen und Einflüsse automatisierten Fahrens differenzierter bewerten zu können, wurde entschieden, neben dem geforderten Modell einer aus Betreibersicht wünschenswerten Fahrzeugsteuerung zwei weitere Ausprägungen automatisierten Fahrens zu definieren und als weitere Referenzfälle in der Simulation abzubilden:

- Eine konservative Fahrzeugsteuerung bildet eine im Vergleich zum wünschenswerten Modell sehr defensive und dadurch auch eher reaktive Fahrweise ab. Es werden z. B. größere Weg- und Zeitlücken zu Vorausfahrenden eingehalten. Die Einhaltung der Mindestzeitlücken ist jedoch sehr strikt, sodass Verzögerungen der Vorausfahrenden unmittelbar nachvollzogen werden, ggf. auch mit stärkeren Verzögerungen.
- Eine progressive Fahrzeugsteuerung bildet im Gegensatz dazu eine Fahrweise an der Grenze der für automatisierte Fahrzeuge unterstellten technischen und praktischen Machbarkeit unter Beachtung aller zwingenden Anforderungen ab. Diese Fahrweise ist insbesondere durch eine Toleranz relativ kurzer Weg- und Zeitlücken gekennzeichnet, die grundsätzlich eine positive Wirkung hinsichtlich Kapazität und Leistungsfähigkeit bieten könnte. Hierdurch besteht bei Verzögerung der Vorausfahrenden wenig Handlungsspielraum, sodass auch hier ggf. mit starken Verzögerungen reagiert werden muss.

Das aus Betreibersicht wünschenswerte Modell der Fahrzeugsteuerung bildet demgegenüber eine vorausschauende Fahrweise unter Berücksichtigung von Umgebungsbedingungen ab. Diese ist insbesondere auch durch ein Abstandsverhalten mit ausreichendem Spielraum zur Kompensation von Störeinflüssen (z. B. Stauwellen) gekennzeichnet, der

im Gegensatz zur konservativen Fahrzeugsteuerung im Bedarfsfall auch ausgenutzt werden kann. Alle drei Ausprägungen automatisierten Fahrens sind in Kapitel 6.3 detaillierter hinsichtlich ihrer Verhaltensausprägungen beschrieben.

Es wurde festgelegt, dass in einem Simulationsszenario nur jeweils automatisierte Fahrzeuge einer dieser drei Ausprägungen eingesetzt werden. Eine Mischung mehrerer Ausprägungen im gleichen Simulationsszenario würde die Zuordnung und Bewertung von Wirkungen automatisierten Fahrens erschweren. Die drei Ausprägungen werden daher in separaten Simulationsszenarien abgebildet.

6.2.2 Varianten der Durchdringung automatisierter Fahrzeuge

Neben den beiden Extremfällen eines Verkehrs ohne automatisierte Fahrzeuge (Referenzfall mit 0 % Durchdringung, siehe Kapitel 5.3) und eines rein aus automatisierten Fahrzeugen bestehenden Kollektivs (100 % Durchdringung) wurden drei weitere Durchdringungsstufen als Mischverkehrsszenarien mit sowohl automatisierten als auch konventionellen Fahrzeugen ausgewählt und mit Auftraggeber und Betreuerkreis abgestimmt. In den Mischverkehrsszenarien wird für die konventionellen Fahrzeuge das in Kapitel 3.5 beschriebene Verhaltensmodell angewendet.

Als Grundlage für die Festlegung der Durchdringungsraten für diese drei Mischverkehrsszenarien könnten bestimmte Zeithorizonte festgelegt werden, indem eine z. B. für die Jahre 2030 oder 2040

erwartete Durchdringung gewählt wird. Auf diese Herangehensweise wurde jedoch verzichtet. Zwar wurden Produktankündigungen, Markt- und andere Studien zu automatisiertem Fahren ausgewertet, jedoch konnten hieraus keine belastbaren Schlussfolgerungen abgeleitet werden. Bereits Abschätzungen zu Zeitpunkten der Markteinführung automatisierter Fahrfunktionen divergieren stark zwischen einzelnen Studien (vgl. z. B. [enBW15]) und erwiesen sich zudem im Nachhinein oft als zu optimistisch. Erst recht gibt es kaum belastbare Aussagen zur Entwicklung der Durchdringung nach der Markteinführung. Daher begründet sich die Festlegung der Durchdringungen auf eine nähere, mittelfristige und fernere Zukunft, ohne dass diese mit konkreten Jahresangaben untersetzt sind.

Tabelle 6-2 zeigt und beschreibt die für dieses Vorhaben ausgewählten Durchdringungsszenarien.

Es wurde festgelegt, dass die gewählte Durchdringungsrate sich auf das gesamte Fahrzeugkollektiv bezieht. Das bedeutet, dass

- auch automatisierte Lkw und Lkw-ähnliche Fahrzeuge mit der gegebenen Durchdringungsrate auftreten
- automatisierte Fahrzeuge auf allen Quelle-Ziel-Beziehungen auftreten, also auch Ein- und Ausfahrtvorgänge automatisiert stattfinden.

0 %	Heute vorherrschendes Fahrzeugkollektiv ohne automatisierte Fahrzeuge (Referenzfall, vgl. Kapitel 5.3). Dass auch heute bereits erste Fahrzeuge die Automatisierung bestimmter Fahraufgaben unterstützen (z. B. Adaptive Cruise Control, Staupilot, Notbremsassistentz) wird vernachlässigt.
10 %	In der näheren Zukunft wird sich ein geringer Anteil automatisierter Fahrzeuge den Verkehrsraum mit konventionellen Fahrzeugen teilen. Durch Unterschiede im Fahrverhalten könnten die automatisierten Fahrzeuge bereits einen signifikanten Einfluss auf den Verkehrsablauf haben.
50 %	In der mittelfristigen Zukunft werden sich die Durchdringungen automatisierter und konventioneller Fahrzeuge annähern.
90 %	In einer entfernteren Zukunft werden automatisierte Fahrzeuge den überwiegenden Anteil am Fahrzeugkollektiv bilden. Ein gewisser Anteil konventioneller Fahrzeuge wird jedoch weiterhin vorhanden sein (z. B. Sportwagen, Oldtimer). Diese könnten einen signifikanten Einfluss auf den Verkehrsablauf haben.
100 %	In einer sehr weit entfernten Zukunft könnten ausschließlich automatisierte Fahrzeuge den Verkehrsraum nutzen. Dies setzt voraus, dass die Benutzung bestimmter Teile des Verkehrsraums auf automatisierte Fahrzeuge beschränkt wird. Dieses Szenario dient hier lediglich als weiterer Referenzfall aus theoretischer Sicht, insbesondere um Unterschiede zwischen den Ausprägungen automatisierter Fahrzeugsteuerungen bewerten zu können.

Tab. 6-2: Durchdringungsszenarien automatisierter Fahrzeuge

6.3 Fahrverhaltensmodelle für automatisiertes Fahren

In diesem Kapitel werden aufbauend auf den in Kapitel 6.1 definierten Randbedingungen die Fahrverhaltensmodelle für automatisierte Fahrzeuge beschrieben. Dies umfasst das geforderte aus Sicht von Straßen- bzw. SBA-Betreibern wünschenswerte Fahrverhaltensmodell sowie die beiden in Kapitel 6.2 genannten Vergleichsmodelle (progressiv und konservativ). Im Vordergrund steht dabei die Führungsebene der Fahrzeugsteuerung (auch Bahnführungsebene) gemäß des Drei-Ebenen-Modells nach DONGES, welche die Führungsgrößen für die darunter liegende Ebene der Fahrzeugstabilisierung liefert (z. B. Sollgeschwindigkeit, -fahrstreifen bis hin zur Trajektorienplanung) [Win15]. Bezogen auf die in der Verkehrsflusssimulation häufiger verwendeten, aus verhaltenspsychologischer Sicht definierten Fahrentscheidungssebenen u. a. nach [FGSV06] (vgl. Kapitel 2.2.1) betrifft dies vor allem die taktische Ebene (Wunschgeschwindigkeit, Wunschfahrstreifen, generelle Kooperationsbereitschaft), hat aber auch Einfluss auf Randbedingungen der operationalen Ebene (z. B. Grenzen für die Zeitlückenwahl im Fahrzeugfolgeverhalten). Die Umsetzung der Fahrverhaltensmodelle in der Simulationsumgebung AIMSUN umfasst einerseits die Festlegung von Parametern der in AIMSUN implementierten Fahrverhaltensmodelle (operationale Ebene) und andererseits eine dynamische Anpassung der Wunschgeschwindigkeit (taktische Ebene), die in Verbindung mit der Schnittstelle zum Wirkmodell für menschliche Verkehrsteilnehmer außerhalb von AIMSUN realisiert wurde und zur Laufzeit mit der Simulation interagiert.

6.3.1 Erzeugung Fahrzeugtypen für automatisierte Fahrzeuge in AIMSUN

Wie in Kapitel 4.2.3.3 dargestellt, existieren in den Simulationsszenarien ohne automatisierte Fahrzeuge drei Fahrzeugtypen für Pkw-ähnliche sowie zwei für Lkw-ähnliche Fahrzeuge, die sich insbesondere hinsichtlich ihrer Fahrstreifennutzung unterscheiden. Für jeden dieser Fahrzeugtypen wurde ein entsprechender automatisierter Fahrzeugtyp angelegt. Diese neuen Fahrzeugtypen wurden mit den Fahrverhaltensparametern für automatisierte Fahrzeuge gemäß Kapitel 6.3.2 versorgt.

Bei den Lkw-ähnlichen Fahrzeugen gelten unterschiedliche zulässige Höchstgeschwindigkeiten (Lkw: 80 km/h, Busse und Pkw mit Anhänger: 100

km/h). Es wurde geprüft, ob diese beiden Fahrzeugklassen sich den bestehenden beiden Lkw-Typen in der Simulation zuordnen lassen.

Für die A57 war eine eindeutige Zuordnung zu den im Nullfall verwendeten Klassen Lkw und Lkw1 möglich:

- Lkw: Max. 80 km/h, darf nur Hauptfahrstreifen nutzen
- Lkw1: Max. 100 km/h, darf Hauptfahrstreifen und 1. Überholfahrstreifen nutzen

Für die A92 zeigte sich, dass mit dieser Zuordnung der Anteil an Lkw-ähnlichen Fahrzeugen überschätzt wurde. Aus diesem Grund wurde eine dritte Lkw-Klasse Lkw2 eingefügt. Die Lkw teilen sich daher wie folgt auf:

- Lkw: Max. 80 km/h, darf nur Hauptfahrstreifen nutzen
- Lkw1: Max. 80 km/h, darf Hauptfahrstreifen und 1. Überholfahrstreifen nutzen
- Lkw2: Max. 100 km/h, darf Hauptfahrstreifen und 1. Überholfahrstreifen nutzen

Nach dem Anlegen der Fahrzeugtypen musste für diese jeweils eine Verkehrsnachfrage definiert werden. Hierzu wurden die Quelle-Ziel-Matrizen für die ursprünglichen Szenarien ohne automatisierte Fahrzeuge dupliziert. Je Fahrzeugtyp und je 15-Minuten-Intervall des Simulationszeitraums wurden anschließend die Verkehrsmengenanteile so angepasst, dass die festgelegten Durchdringungsraten automatisierter Fahrzeuge im gleichen Verhältnis über alle Fahrzeugtypen erreicht wurden. Dies war mit hohem manuellem Aufwand verbunden und potenziell fehleranfällig. Um die Fehlerfreiheit der Verkehrsnachfrageversorgung zu gewährleisten, wurde die erwartete Anzahl der Fahrten im Simulationszeitraum je Fahrzeugtyp sowie über alle Fahrzeugtypen errechnet und mit der durch die neue Versorgung erreichten Anzahl abgeglichen.

6.3.2 Festlegung Parameter der AIMSUN-Fahrverhaltensmodelle

Die Festlegung der Parameter der AIMSUN-Fahrverhaltensmodelle erfolgte in mehreren Schritten. Grundlagen für die Parameterwahl bildeten:

- Die zuvor definierten generellen Anforderungen sowie aus Betreibersicht wünschenswerten Ei-

genschaften einer automatisierten Fahrzeugsteuerung,

- Grenzen aus Sicht von Fahrdynamik, Fahrkomfort und Nutzerakzeptanz sowie
- Vorab-Untersuchungen zu Einflüssen bestimmter Parameter auf das individuelle Fahrverhalten und daraus resultierende Simulationsergebnisse (s. Anhang 4 und Anhang 5).

Die Vorab-Untersuchungen wurden am Beispiel erster Simulationsläufe mit 100 % Durchdringung und den drei Ausprägungen automatisierten Fahrens (konservativ, progressiv und aus Betreibersicht wünschenswert) durchgeführt.

Nachfolgend werden die gewählten Parameter für alle drei Ausprägungen genannt und begründet. Eine Gesamtübersicht über die Parametrierung der automatisierten Fahrzeuge bietet Anhang 6.

6.3.2.1 Reaktionszeit

Die Reaktionszeit für alle automatisierten Fahrzeuge wurde auf 0,15 s festgelegt (konventionelle Fahrzeuge: 0,75 s). Diese Festlegung trägt dem im Vergleich zum Menschen deutlich niedrigeren Zeitbedarf für die Umgebungswahrnehmung und -bewertung in automatisierten Fahrzeugen Rechnung, welcher sich im Wesentlichen auf Rechen- und Verarbeitungszeiten bei Objekterkennung, -verfolgung und -fusion sowie Kommunikationsprozesse innerhalb des Fahrzeugsystems beschränkt. Die Reaktionszeit wirkt sich auf das Fahrzeugfolgeverhalten aus, worauf in Kapitel 6.3.2.4 eingegangen wird.

Da die Reaktionszeit in AIMSUN stets ein ganzzahliges Vielfaches der Simulationsschrittweite sein muss, wurde die Simulationsschrittweite in den Szenarien mit automatisierten Fahrzeugen ebenfalls auf 0,15 s herabgesetzt.

Neben der allgemeinen Reaktionszeit kann die Reaktionszeit nach Halt (z. B. durch Stau) separat festgelegt werden. Im progressiven und im aus Betreibersicht wünschenswerten Modell wurde hier ebenfalls 0,15 s gesetzt. Zwar kann die sichere Erkennung, dass das vorausfahrende Fahrzeug wieder anfährt, u. a. aufgrund der dann noch niedrigen Geschwindigkeiten mit einem etwas höheren Zeitbedarf verbunden sein als in Fahrzeugfolgevorgängen allgemein. Es wird jedoch angenommen, dass dieser Einfluss z. B. durch Statusnachrichten vorausfahrender Fahrzeuge (z. B. Cooperative Awareness Messages) ausgeglichen werden kann.

Beim konservativen Modell wurde unterstellt, dass das Anfahren eines vorausfahrenden Fahrzeugs erst mit einer höheren Sicherheit erkannt werden soll und Statusnachrichten des Vorausfahrenden nicht berücksichtigt werden. Demensprechend wurde hier die Reaktionszeit nach Halt mit 1,0 s deutlich höher angesetzt.

6.3.2.2 Wunschgeschwindigkeit

Die Wunschgeschwindigkeit wurde zunächst als zulässige Höchstgeschwindigkeit des jeweiligen Fahrzeugtyps festgelegt. Dies sind:

- 130 km/h für Pkw-ähnliche Fahrzeuge
- 80 km/h bzw. 100 km/h für Lkw-ähnliche Fahrzeuge (vgl. auch Kapitel 6.3.1)

Im Gegensatz zu konventionellen Fahrzeugen unterliegt die Wunschgeschwindigkeit keiner Streuung.

Die Wunschgeschwindigkeit wird während der Simulation dynamisch an die durch die SBA gegebene zulässige Höchstgeschwindigkeit sowie teils auch in Abhängigkeit vom Umgebungsverkehr angepasst. Hierauf wird in Kapitel 6.3.3 näher eingegangen.

6.3.2.3 Wunschfahrstreifen

Die Fahrstreifenwahl in den dieser Untersuchung zugrundeliegenden AIMSUN-Szenarien wird weniger durch Fahrverhaltensparameter, sondern vielmehr durch Fahrstreifennutzungsverbote für bestimmte Fahrzeugklassen beeinflusst. Dies war im Rahmen der Kalibrierung des Modells ohne automatisierte Fahrzeuge erforderlich, um realistische Fahrstreifenaufteilungen erreichen zu können (vgl. Kapitel 4.2.3.3). Da dies eine feste Vorgabe ist, können Wirkungen von SBA und auch von automatisierten Fahrzeugen auf die Fahrstreifenaufteilung nicht untersucht werden. Hinzu kommt, dass einige Parameter auf einzelne Streckenabschnitte (Sektionen) oder Fahrrelationen in Knotenpunkten (Turns) bezogen sind, aber dort nicht fahrzeugtypspezifisch differenziert werden können. Um Störeinflüsse und unerwünschte Unterschiede bei der Bewertung der übrigen Wirkeffekte zu vermeiden, wurde festgelegt, die auf Fahrstreifenwechsel bezogenen Verhaltensparameter sowie die Fahrstreifennutzungsverbote für automatisierte Fahrzeuge unverändert beizubehalten. Dies betrifft auch die Kooperations-

bereitschaft zur Ermöglichung von Fahrstreifenwechseln bzw. beim Einfahren.

6.3.2.4 Fahrzeugfolge

Das in AIMSUN verwendete Fahrzeugfolgemodell ist eine Erweiterung des Modells nach GIPPS [Gip81] (vgl. Kapitel 2.2.3.1). Zur Begründung der Wahl der Parameter ist ein tieferes Verständnis des Modells notwendig. Daher wird nachfolgend eine detailliertere Beschreibung auf Grundlage der AIMSUN-Nutzerdokumentation [TSS14] [Aim19] gegeben und die Auswirkung von Parameteranpassungen untersucht.

Je Simulationsschritt t und je Fahrzeug n wird eine neue Fahrgeschwindigkeit $v(n, t + T)$ für den nächsten Simulationsschritt $t + T$ berechnet. Damit wird die Fahrzeugposition $x(n, t + T)$ aktualisiert. Dies geschieht asymmetrisch, d. h. unterschiedlich für Beschleunigen und Verzögern:

Beschleunigen:

$$x(n, t + T) = x(n, t) + v(n, t + T)T$$

Verzögern:

$$x(n, t + T) = x(n, t) + 0,5(v(n, t) + v(n, t + T))T$$

Die Fahrgeschwindigkeit $v(n, t + T)$ entspricht dem Minimum der mit folgenden Termen berechneten Geschwindigkeiten:

- Beschleunigungsterm
- Verzögerungsterm, Kriterium Wunschverzögerung
- Verzögerungsterm, Kriterium Mindestzeitlücke

Darüber hinaus bestehen Einflüsse auf die Fahrgeschwindigkeit u. a. auch durch das Fahrstreifenwechselmodell (Verzögern oder Beschleunigen, um auf eine Lücke zu zielen, Kooperation durch Lückenbildung) sowie das mehrstreifige Fahrzeugfolgemodell (Begrenzung Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen Fahrstreifen). Hierauf wird jedoch nachfolgend nicht näher eingegangen.

Der Beschleunigungsterm ist wirksam, wenn kein vorausfahrendes Fahrzeug existiert oder eine sehr große Zeitlücke zu diesem besteht. Die so berechnete Geschwindigkeit $v_a(n, t + T)$ bildet die Annäherung an die Wunschgeschwindigkeit des Fahrzeugs $v_{des}(n)$ (erste Gleichung Bild 6-1). Der Parameter maximale Wunschbeschleunigung $a(n)$ beeinflusst die hierzu verwendete Beschleunigung nicht direkt,

sondern entspricht dem Maximum des Beschleunigungsverlaufs in Abhängigkeit von aktueller und Wunschgeschwindigkeit.

Der Verzögerungsterm mit Kriterium Wunschverzögerung ist wirksam bei Fahrzeugfolgesituationen, in denen die Zeitlücke zum Vorausfahrenden noch nicht zu gering, d. h. noch nicht nahe der Mindestzeitlücke ist. Mit der so bestimmten Geschwindigkeit $v_b(n, t + T)$ erfolgt eine Reaktion auf einen langsameren bzw. verzögernden Vorausfahrer derart, dass die eigene normale Wunschverzögerung $d(n)$ eingehalten wird (zweite Gleichung Bild 6-1). Neben der Wunschverzögerung fließen auch der Nettoabstand $\Delta x(n, t)$ zum Vorausfahrenden sowie die Geschwindigkeit $v(n-1, t)$ und die geschätzte normale Wunschverzögerung $d'(n-1)$ des vorausfahrenden Fahrzeugs $n - 1$ ein. Die Fahrgeschwindigkeit des Vorausfahrenden wird durch das Ego-Fahrzeug n mit idealer Genauigkeit, seine normale Wunschverzögerung dagegen gegenüber der tatsächlichen normalen Wunschverzögerung $d(n-1)$ um den Sensitivity Factor α verzerrt wahrgenommen.

Es ist anzumerken, dass in der Realität die Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs $n - 1$ durch das Ego-Fahrzeug n nur mit einer gewissen Ungenauigkeit erfasst werden kann. Weiterhin ist die normale Wunschverzögerung als Eigenschaft der Fahrer-Fahrzeug-Einheit im Allgemeinen gar nicht wahrnehmbar und könnte allenfalls grob in Abhängigkeit von der Fahrzeugklasse eingeschätzt werden (typisches Verzögerungsvermögen, erwarteter Fahrstil). Dies wird im Modell in Kauf genommen und gewährleistet neben dem Zeitlückenkriterium die Kollisionsfreiheit.

Der Verzögerungsterm mit Kriterium Mindestzeitlücke wirkt bei Fahrzeugvorgängen mit vergleichsweise kurzen Zeitlücken sowie ggf. bei starken Ver-

$$v_a(n, t + T) = v(n, t) + 2,5 a(n) T \left(1 - \frac{v(n, t)}{v_{des}(n)} \right) \sqrt{0,025 + \frac{v(n, t)}{v_{des}(n, t)}} \parallel$$

$$v_b(n, t + T) = d(n)T + \sqrt{d(n)^2 T^2 - d(n)(2\Delta x(n, t) - v(n, t)T - \frac{v(n-1, t)^2}{d'(n-1)})}$$

mit $d'(n-1) = d(n-1) \cdot \alpha \parallel$

$$v_{min\Delta t}(n, t + T) = \frac{x(n-1, t + T) - x(n, t)}{\Delta t_{min} + T} \parallel$$

Bild 6-1: Beschleunigungsformeln AIMSUN

zögerungen vorausfahrender Fahrzeuge. Hierbei kann eine Verzögerung auch oberhalb der normalen Wunschverzögerung auftreten. Die so berechnete Geschwindigkeit $v_{\min\Delta t}(n, t + T)$ (dritte Gleichung Bild 6-1) dient der Einhaltung der Mindestbruttozeitlücke Δt_{\min} , die somit modellbedingt i. d. R. nicht unterschritten werden kann (Ausnahme: Bei bestimmten Einstellungen zur Lückenakzeptanz beim Fahrstreifenwechsel ist eine Unterschreitung möglich; dies wird in diesem Vorhaben jedoch nicht genutzt). Somit kann die Mindest-Zeitlücke keinen Puffer erzeugen, der zum Ausgleich plötzlicher Störungen im Verkehrsfluss genutzt werden könnte.

Die drei o. g. Terme zur Aktualisierung von Geschwindigkeit und Position wurden in mehreren synthetischen Szenarien (Konstellationen zu einem vorausfahrenden Fahrzeug) in Microsoft Excel nachgebildet, um die Einflüsse von Variationen v. a. der Parameter max. Wunschbeschleunigung, normale Wunschverzögerung, Sensitivity Factor und Mindestzeitlücke abschätzen zu können.

Die max. Wunschbeschleunigung bestimmt, wie rasch die Annäherung an die Wunschgeschwindigkeit erfolgt. Die tatsächlich erreichte Beschleunigung hängt von der Geschwindigkeit ab und ist i. d. R. niedriger. Bei einem Anfahrvorgang von 0 auf 100 km/h erreicht die tatsächliche Beschleunigung ihr Maximum nach ca. 3 bis 7 s und in einem niedrigen Geschwindigkeitsbereich; danach fällt sie stetig (vgl. Bild 6-2).

Eine moderate Beschleunigung im dichten Verkehr ist wünschenswert, damit ein Beitrag zur Dämpfung von Stauwellen geleistet wird. Hierbei ist jedoch anzumerken, dass bei typischen Fahrzeugabständen in einer solchen Situation das Fahrverhalten meist vom Verzögerungsterm mit Kriterium Wunschverzögerung bestimmt wird. Dies wird dadurch bestätigt, dass nach ersten Simulationsläufen der Szenarien mit 100 % Durchdringung eine Variation dieses Parameters keinen signifikanten Einfluss auf das Fahrverhalten hatte, was auch bereits zuvor bei der Kalibrierung des Wirkmodells für menschliche Verkehrsteilnehmer festgestellt wurde. Ist die Lücke zum Vorausfahrenden so groß, dass dieses Kriterium noch nicht greift, ist eine größere Beschleunigung unschädlich. Sie ist sogar u. U. wünschenswert, um einen raschen Stauabfluss zu ermöglichen. Daher wurde für alle drei Ausprägungen automatisierten Fahrens eine dem menschlichen Verhalten ähnliche Wunschbeschleunigung angesetzt.

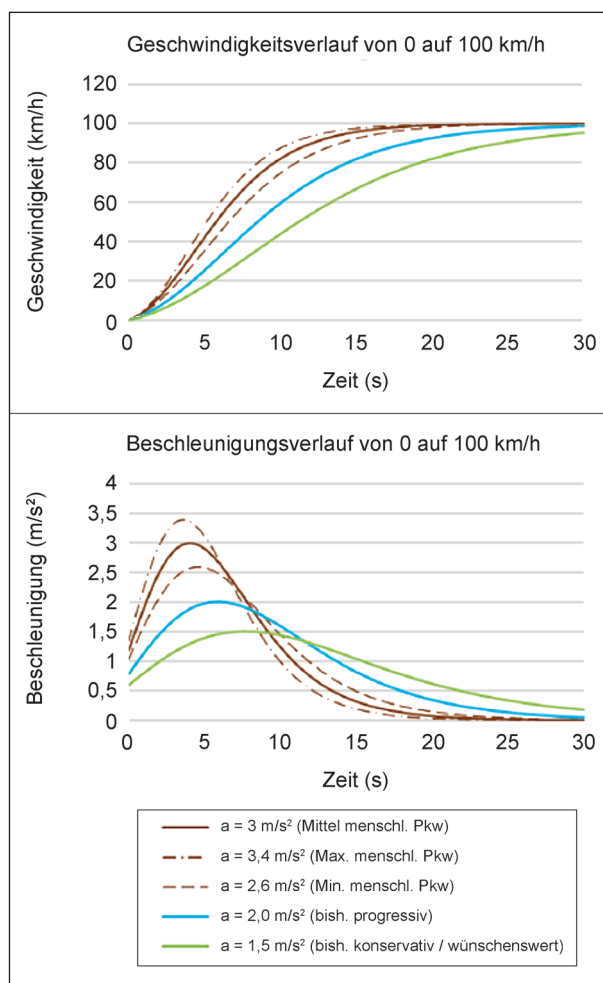


Bild 6-2: Einfluss der Wunschbeschleunigung am Beispiel Anfahren von 0 auf 100 km/h

Die Wunschverzögerung im Normalfall beeinflusst, wie frühzeitig auf ein langsames (oder stehendes) vorausfahrendes Fahrzeug reagiert wird: Je niedriger der Betrag der Wunschverzögerung (die übrigen Parameter seien unverändert), desto früher setzt die Reaktion ein. Je später wiederum die Reaktion einsetzt, desto größer ist die dabei auftretende Verzögerung. Der Unterschied in Reaktionsbeginn und erreichter Verzögerung ist besonders stark zwischen Verzögerungen von $-2,0 \text{ m/s}^2$ und $-3,0 \text{ m/s}^2$, unterhalb von $-3,0 \text{ m/s}^2$ ist der Unterschied dagegen geringer. Bild 6-3 zeigt dies am Beispiel einer Fahrzeugfolgesituation, in der ein zunächst mit 100 km/h fahrendes Fahrzeug auf ein langsames vorausfahrendes Fahrzeug (80 km/h) trifft. In diesem Beispielfall bleibt die tatsächliche Verzögerung immer unter der Wunschverzögerung.

Die Mindest-Zeitlücke beeinflusst, wann in einem Verzögerungsvorgang das Kriterium Mindestzeitlücke greift. I. d. R. reagiert ein Fahrzeug bereits zu vor aufgrund des Kriteriums Wunschverzögerung

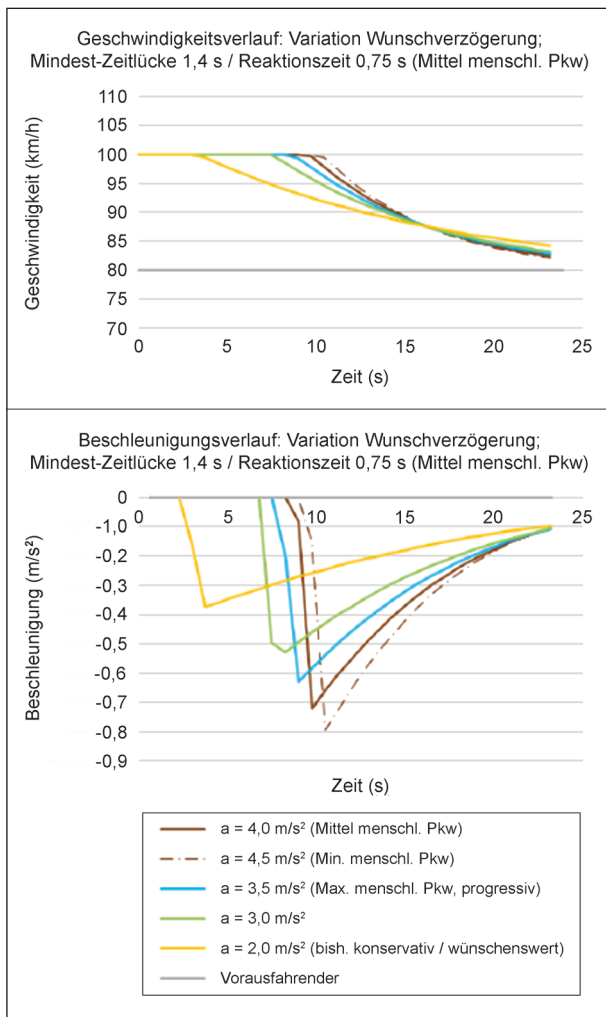


Bild 6-3: Einfluss der Wunschverzögerung am Beispiel Annähern an langsames Fahrzeug

auf ein langsames vorausfahrendes Fahrzeug; wird die Mindest-Zeitlücke annähernd erreicht, beginnt dieses zweite Kriterium zu greifen. Dabei können auch deutlich stärkere Verzögerungen als die Wunschverzögerung erreicht werden. Je größer die Mindestzeitlücke, desto früher werden stärkere Verzögerungen eingesetzt. Dabei entsteht unter Umständen ein Sprung im zeitlichen Verlauf der Verzögerung. Dieser Sprung ist besonders stark bei großen Mindestzeitlücken ausgeprägt, insbesondere wenn der Betrag der Wunschverzögerung gleichzeitig ebenfalls groß ist. Dann nämlich konnte in der ersten Phase der Annäherung mittels des Kriteriums Wunschverzögerung die Geschwindigkeit noch nicht deutlich genug reduziert werden. Dies ist – ebenfalls am Beispiel der vorgenannten Fahrzeug-folgesituation – in Bild 6-4 erkennbar.

Während die Reaktionszeit im Beschleunigungsfall keinen signifikanten Einfluss hat, hat sie im Verzögerungsfall einen deutlichen Einfluss auf den Be-

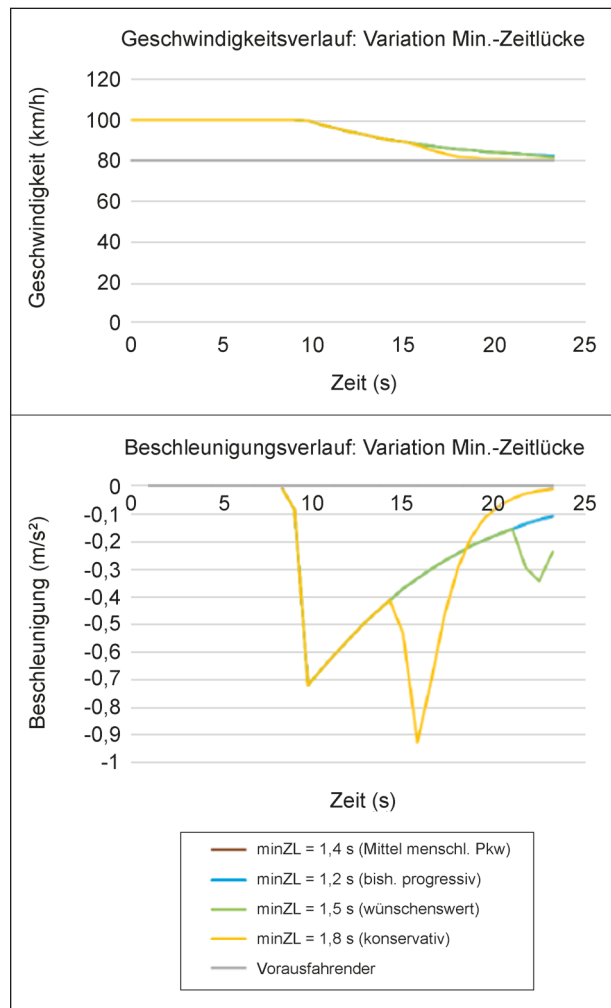


Bild 6-4: Einfluss der Mindestzeitlücke am Beispiel Annähern an langsames Fahrzeug (Die Geschwindigkeitsverläufe der Kurven minZL = 1,4 s und minZL = 1,2 s liegen unter der Kurve minZL = 1,5 s; Der Beschleunigungsverlauf der Kurve minZL = 1,4 s liegt unter der Kurve minZL = 1,2 s)

ginn der Reaktion auf einen Vorausfahrer. Je kürzer die Reaktionszeit, desto später (und dadurch stärker) fällt die Reaktion aus. Gerade in der Phase der Verzögerung nach Zeitlückenkriterium können so erheblich stärkere Verzögerungen auftreten. Da die Reaktionszeit bereits auf Grundlage der Erwägungen in Kapitel 6.3.2.1 festgelegt wurde, muss durch geeignete Wahl der übrigen Parameter sichergestellt werden, dass dieser Effekt nicht zu starke Störungen im Verkehrsablauf verursacht; insbesondere muss dadurch selbst in einem progressiven Modell der Fahrzeugsteuerung ein niedrigerer Betrag der Wunschverzögerung gesetzt werden als für menschliche Verkehrsteilnehmer mit höheren Reaktionszeiten.

Der Sensitivity Factor beeinflusst ebenso wie die Wunschverzögerung den Beginn der Reaktion auf

	Konservativ	Aus Betreibersicht wünschenswert	Progressiv
Wunschbeschleunigung	3,0 m/s ² (Pkw) bzw. 1,5 m/s ² (Lkw)		
Wunschverzögerung	-2,0 m/s ²	-2,0 m/s ²	-3,5 m/s ²
Sensitivity Factor	1,2	1,1	1,0
Mindestzeitlücke	1,8 s (Pkw) bzw. 2,1 s (Lkw)	1,0 s (Pkw) bzw. 1,2 s (Lkw)	1,0 s (Pkw) bzw. 1,2 s (Lkw)
Erläuterungen	<ul style="list-style-type: none"> • Große Min.-Zeitlücke (stets einzuhalten, ggf. durch starkes Verzögern) • Puffer bei Folgefahrt auf konventionelles Fzg. • Frühe Reaktion auf Vorfahrer 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Zeitlücken zwischen autom. Fahrzeugen • Puffer bei Folgefahrt auf konventionelles Fzg. • Frühe Reaktion auf Vorfahrer 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Zeitlücken zwischen allen Fahrzeugen • Späte Reaktion auf Vorfahrer

Tab. 6-3: Parameter Fahrzeugfolgmodell für die drei Ausprägungen automatisierter Fahrzeuge

einen langsameren Vorfahrer. Bei Sensitivity Factor < 1 wird der Betrag der Wunschverzögerung des Vorfahrers unterschätzt, d. h. es wird später reagiert. Dadurch kann das Zeitlückenkriterium greifen und zu stärkeren Verzögerungen führen. Bei Sensitivity Factor > 1 wird ein konservativeres Abstandsverhalten gewählt. Unter Umständen wird die Mindestzeitlücke gar nicht erreicht, was im Falle einer plötzlichen starken Verzögerung des Vorfahrenden einen Sicherheitspuffer darstellt, der bei Bedarf aber kurzzeitig unterschritten werden kann. Dieser Effekt stellt sich jedoch nur ein, wenn gleichzeitig auch der Betrag der eigenen Wunschverzögerung gering ist.

Unter Berücksichtigung dieser Zusammenhänge sind in Tabelle 6-3 die für die drei Ausprägungen der automatisierten Fahrzeugsteuerung festgelegten Parameterkombinationen angegeben.

6.3.3 Dynamische Anpassung der Wunschgeschwindigkeit

Eine dynamische Anpassung der Wunschgeschwindigkeit erfolgt in folgenden Situationen:

- Beim Passieren eines Anzeigequerschnitts: Anpassen der Wunschgeschwindigkeit an die angezeigte zulässige Höchstgeschwindigkeit
- Bei der Ausfahrt aus einem Stau: Aufhebung einer etwaigen zulässigen Höchstgeschwindigkeit im Zuge der Stauwarnung (erfordert vorherige Verfolgung der Stauannäherung und -durchfahrt)
- Laufend: Anpassung der Wunschgeschwindigkeit an die Verkehrsbedingungen (nur konservatives und wünschenswertes Modell)

6.3.3.1 Passieren eines Anzeigequerschnitts

Jedes Fahrzeug, das einen Anzeigequerschnitt passiert, wird durch die bestehende Schnittstellenanwendung zum Wirkmodell für konventionelle Fahrzeuge erfasst. Handelt es sich dabei um ein automatisiertes Fahrzeug, werden jedoch nicht wie zuvor dem wahrgenommenen Anzeigezustand zugeordnete Fahrverhaltensparameter gemäß des Wirkmodells zugeordnet, sondern lediglich die an dem Anzeigequerschnitt angezeigte zulässige Höchstgeschwindigkeit als neue Wunschgeschwindigkeit des Fahrzeugs übernommen. Die Wunschgeschwindigkeit automatisierter Fahrzeuge unterliegt keinen Streuungen. Sie kann jedoch unter Einhaltung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit dynamisch an die Verkehrsbedingungen angepasst werden (vgl. Kapitel 6.3.3.3). Um die Einhaltung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit auch nach Passieren des Anzeigequerschnitts gewährleisten zu können, wird diese für jedes Fahrzeug mitgeführt, bis es den nächsten Anzeigequerschnitt erreicht oder das Simulationsnetz verlässt. Bei menschlichen Fahrern wird beim Passieren eines Anzeigequerschnitts auch die Mindestzeitlücke und der Sensitivity Factor als Einflussgrößen der Abstandswahl angepasst.

Wird am Anzeigequerschnitt eine Stauwarnung i. V. m. einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 60 km/h angezeigt, treten die diesen Querschnitt passierenden automatisierten Fahrzeuge in die Fahrzeugverfolgung durch den Stau ein (vgl. Kapitel 6.3.3.2).

6.3.3.2 Fahrzeugverfolgung durch einen Stau

Bei einer Stauwarnung im Rahmen einer SBA wird allgemein stromabwärts des gestauten Bereichs eine Stauwarnung i. V. m. einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 60 km/h angezeigt. Da in diesem Fall die zulässige Höchstgeschwindigkeit gemeinsam mit der Gefahrenwarnung angeordnet wurde, gilt diese nur solange, bis die Gefahrenstelle (hier: der Staubereich) passiert wurde. Wann die Gefahr durch Stau nicht mehr besteht, ist u. U. im Einzelfall nicht klar erkennbar, z. B. bei dichtem Verkehr und wiederkehrenden Stauwellen. Ist jedoch eine stromabwärtige Staufront erkennbar, kann die zulässige Höchstgeschwindigkeit als aufgehoben angesehen werden.

Automatisierte Fahrzeuge könnten jedoch ohne Ergreifung weiterer Maßnahmen nicht über die am vorangegangenen Anzeigequerschnitt angezeigten 60 km/h hinaus beschleunigen, da diese als Wunschgeschwindigkeit gesetzt wurde. Somit könnte es zu Behinderungen in der Stauausfahrt kommen, die im Mischverkehr auch erhebliche negative Wirkungen auf konventionelle Fahrzeuge haben können. Im ungünstigsten Fall könnte der Capacity-Drop-Effekt verstärkt werden.

Um dies zu adressieren, wurde eine individuelle Verfolgung automatisierter Fahrzeuge durch einen Stau realisiert und mit dem externen Fahrverhaltensmodell an die Verkehrsflusssimulation angehängen. Automatisierte Fahrzeuge können sich in einen von drei folgenden Zuständen befinden:

- Keine Stauverfolgung
- Stauannäherung
- Staudurchfahrt

Zunächst befinden sich automatisierte Fahrzeuge im Zustand keine Stauverfolgung. Passiert ein automatisiertes Fahrzeug einen Anzeigequerschnitt, an dem eine Stauwarnung i. V. m. einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 60 km/h angezeigt wird,



Bild 6-5: Prinzip Verfolgung der Staudurchfahrt

tritt es in den Zustand Stauannäherung ein. Die Wunschgeschwindigkeit des Fahrzeugs wird auf 60 km/h gesetzt. Zusätzlich wird es in einer Liste zu verfolgender Fahrzeuge gespeichert und zwecks einer performanteren Adressierung in der Simulation als „tracked“ gekennzeichnet.

Für jedes Fahrzeug, das sich im Zustand der Stauannäherung befindet, wird alle 30 s (Zeit in Simulation) geprüft, ob es zwischenzeitlich den Staubereich erreicht hat und somit in den Zustand Staudurchfahrt wechselt. Dies gilt als erfüllt, wenn die Fahrgeschwindigkeit des Fahrzeugs auf unter 35 km/h fällt.

Für jedes Fahrzeug, das sich im Zustand Staudurchfahrt befindet, wird wiederum geprüft, ob es das stromabwärtige Stauende erreicht hat. Dies wird als gegeben angesehen, wenn die Fahrgeschwindigkeit wieder auf mindestens 55 km/h ansteigt. Dann wird die Wunschgeschwindigkeit des Fahrzeugs heraufgesetzt und es wechselt in den Zustand keine Stauverfolgung. Außerdem wird es aus der Liste zu verfolgender Fahrzeuge entfernt. Eine niedrigere Geschwindigkeitsschwelle erscheint nicht angemessen, da dann ggf. auf nur kurzzeitige Geschwindigkeitsschwankungen im Stau reagiert werden könnte, ohne dass das eigentliche Stauende bereits erreicht ist. Eine höhere Geschwindigkeitsschwelle ist ebenfalls nicht geeignet, da durch die Wunschgeschwindigkeit von 60 km/h höhere Geschwindigkeiten kaum erreicht werden könnten.

Beim Stauaustritt wird die Wunschgeschwindigkeit auf die fahrzeugspezifische zulässige Höchstgeschwindigkeit zurückgesetzt (130 km/h bei Pkw-ähnlichen Fahrzeugen, 80 km/h bzw. 100 km/h bei Lkw-ähnlichen Fahrzeugen). Bei Pkw kann die neue Wunschgeschwindigkeit auch durch die gleichzeitig wirkende laufende Anpassung an die Verkehrsbedingungen niedriger liegen (vgl. Kapitel 6.3.3.3).

Passiert ein Fahrzeug einen Anzeigequerschnitt ohne Stauwarnung, während er sich im Zustand Stauannäherung oder Staudurchfahrt befindet, verlässt er die Stauverfolgung. Die Wunschgeschwindigkeit wird dann gemäß dem Anzeigezustand neu gesetzt und das Fahrzeug aus der Liste der zu verfolgenden Fahrzeuge entfernt. Das gilt auch, wenn sich das Fahrzeug noch immer in einem Staubereich befindet oder nie einen Staubereich passiert hat.

6.3.3.3 Laufende Anpassung an Verkehrsbedingungen

Wie bereits zuvor in Kapitel 6.3.2.2 beschrieben, gelten für alle Ausprägungen automatisierter Fahrzeuge fahrzeugtypspezifische Obergrenzen bzgl. der Wunschgeschwindigkeit (130 km/h für Pkw-ähnliche, 80 km/h bzw. 100 km/h für Lkw-ähnliche Fahrzeuge). Diese gelten, sofern keine niedrigeren zulässigen Höchstgeschwindigkeiten z. B. durch die SBA gelten.

Um die von automatisierten Fahrzeugen erwartete vorausschauende Fahrweise (möglichst wenige Fahrstreifenwechsel oder stärkere Brems- und Beschleunigungsmanöver) in der Simulation zu ermöglichen, wurde zusätzlich die Möglichkeit einer Anpassung der Wunschgeschwindigkeit an aktuelle Verkehrsverhältnisse im Umfeld automatisierter Pkw vorgesehen. Dies entspricht einer Komponente der operationalen Fahrzeugsteuerung vorgelegerten taktischen FahrentscheidungsEbene. Hierzu wurde eine fahrzeugindividuelle Vorausschau auf den nachfolgenden Streckenabschnitt realisiert. Die Vorausschauweite beträgt i. d. R. 500 m (weniger, wenn die Entfernung zum Ende der aktuellen Netzkante geringer). Diese Vorausschau geht über die erreichbare Sensorreichweite automatisierter Fahrzeuge hinaus, ließe sich jedoch z. B. mittels Fahrzeug zu Fahrzeug- oder Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Kommunikation realisieren. Für jeden automatisierten Pkw erfolgt alle 60 s eine Aktualisierung der Verkehrslage innerhalb des Vorausschauhorizonts. Dabei werden alle Fahrzeuge innerhalb des Vorausschauhorizonts mit Geschwindigkeit und Fahrzeugklasse (Pkw/Lkw) erfasst. Daraus wird die mittlere Kfz- und Pkw-Geschwindigkeit sowie die Dichte je Fahrstreifen und querschnittsbezogen ermittelt. Das Aktualisierungsintervall von 60 s stellt einen Kompromiss zwischen der Simulationslaufzeit auf der einen und der Trägheit der dynamischen Anpassung auf der anderen Seite dar.

Bei einer progressiven Fahrzeugsteuerung wird auf den verkehrsabhängigen Einfluss auf die Wunsch-

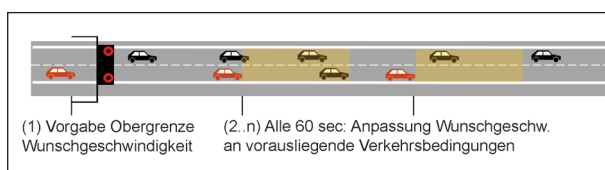


Bild 6-6: Prinzip der laufenden Anpassung der Wunschgeschwindigkeit an die Verkehrsbedingungen

geschwindigkeit verzichtet, d. h. die Fahrzeuge streben unabhängig von den Verkehrsbedingungen stets die maximal zulässige Geschwindigkeit an. Auch bei automatisierten Lkw wurde auf diese Möglichkeit der Beeinflussung verzichtet.

Bei Pkw mit konservativem oder aus Betreibersicht wünschenswertem Fahrzeugsteuerungsmodell wirkt die verkehrsabhängige dynamische Anpassung der Wunschgeschwindigkeit, jedoch mit unterschiedlicher Zielsetzung und auf unterschiedliche Weise.

Im konservativen Modell wird die Wunschgeschwindigkeit an die mittlere Pkw-Geschwindigkeit auf dem gerade genutzten Fahrstreifen angepasst (zzgl. 5 km/h). Mindestens muss die Wunschgeschwindigkeit 100 km/h betragen; außerdem muss eine Mindest-Verkehrsdichte erreicht sein. Hierdurch soll ein Beitrag zu einem defensiveren Überholverhalten der konservativen Fahrzeuge geleistet werden. Auf diese Weise soll keine intelligente bzw. aus Betreibersicht wünschenswerte Fahrfunktion abgebildet werden.

Im aus Betreibersicht wünschenswerten Modell wurde hingegen eine Funktion umgesetzt, die eine intelligente Anpassung an die vorherrschenden Verkehrsverhältnisse auf vereinfachte Weise abbilden soll. Hierbei werden zwei Fälle unterschieden:

- Ist die Verkehrsdichte auf dem links angrenzenden Fahrstreifen hoch oder besteht kaum ein Geschwindigkeitsunterschied zwischen den Fahrstreifen, wäre ein Überholen nicht wünschenswert. Daher wird in diesem Fall die Wunschgeschwindigkeit an die mittlere Pkw-Geschwindigkeit des gerade genutzten Fahrstreifens angepasst (zzgl. 5 km/h).
- Ansonsten wird die Wunschgeschwindigkeit an die mittlere Pkw-Geschwindigkeit des links angrenzenden Fahrstreifens angepasst (ebenefalls zzgl. 5 km/h). In diesem Falle ist Überholen verträglich, sodass es nicht durch eine niedrige Wunschgeschwindigkeit erschwert wird. In diesem Falle muss die Wunschgeschwindigkeit mindestens 90 km/h betragen, außerdem muss auch hier eine Mindestverkehrsdichte (querschnittsbezogen) erfüllt sein.

7 Durchführung der Simulation für automatisierte Fahrzeuge

7.1 Vorbereitung und Durchführung der Simulation

Zur Vorbereitung der Simulationsläufe wurde ein Szenarienplan erstellt. Dabei wurde jedem Szenario und jedem diesem zugeordneten Simulationslauf (Replication) eine eindeutige ID zugeordnet. Über diese lassen sich die aufgezeichneten Daten den Szenarien zuordnen. Die IDs setzen sich aus von AIMSUN vergebenen Objekt-IDs für Szenario, Experiment und Simulationslauf (Replication) auf der einen und einer selbst vorgegebenen sechsstelligen Szenarienkennung auf der anderen Seite zusammen.

Je Simulation wurde ein eigenes Verzeichnis angelegt, in dem die AIMSUN-Szenariendatei (.ang-Datei) sowie die Konfigurationsdatei der Schnittstellenanwendung zum Wirkmodell und zur Datenaufzeichnung abgelegt wurden. Während bzw. nach der Simulation wurden verschiedene Log-Dateien erzeugt, die ebenfalls in diesem Szenarien-Verzeichnis abgelegt wurden.

Neben anfänglichen Testläufen sowie den Simulationsszenarien ohne automatisierte Fahrzeuge wurden 24 Szenarien à 6 Simulationsläufen, d. h. insgesamt 144 Simulationsläufe durchgeführt. Tabelle 7-1 zeigt eine Übersicht über die 24 Szenarien.

Szenarien-Kennz.	Bezeichnung	Durchdringung automatisierter Fzge.	Ausprägung Fzg.-steuerung	Strecke
124100	haf_conservative_100_a92	100 %	konservativ	A92
124200	haf_conservative_100_a57			A57
134100	haf_favored_100_a92		aus Betreibersicht wünschenswert	A92
134200	haf_favored_100_a57			A57
144100	haf_progressive_100_a92		progressiv	A92
144200	haf_progressive_100_a57			A57
121100	haf_conservative_010_a92	10 %	konservativ	A92
121200	haf_conservative_010_a57			A57
131100	haf_favored_010_a92		aus Betreibersicht wünschenswert	A92
131200	haf_favored_010_a57			A57
141100	haf_progressive_010_a92		progressiv	A92
141200	haf_progressive_010_a57			A57
122100	haf_conservative_050_a92	50 %	konservativ	A92
122200	haf_conservative_050_a57			A57
132100	haf_favored_050_a92		aus Betreibersicht wünschenswert	A92
132200	haf_favored_050_a57			A57
142100	haf_progressive_050_a92		progressiv	A92
142200	haf_progressive_050_a57			A57
123100	haf_conservative_090_a92	90 %	konservativ	A92
123200	haf_conservative_090_a57			A57
133100	haf_favored_090_a92		aus Betreibersicht wünschenswert	A92
133200	haf_favored_090_a57			A57
143100	haf_progressive_090_a92		progressiv	A92
143200	haf_progressive_090_a57			A57

Tab. 7-1: Übersicht Simulationsszenarien mit automatisierten Fahrzeugen (ohne Baustellen Szenarien)

7.2 Auswertung der Simulationsergebnisse der Szenarien automatisiertes Fahren

Bei der Auswertung der Szenarien mit automatisierten Fahrzeugen werden wie bei der Auswertung der menschlichen Fahrer die Auswirkungen der Automatisierung und der unterschiedlichen Fahrverhaltensmodelle auf den Verkehrsfluss, das Geschwindigkeitsverhalten und das Abstandsverhalten analysiert. Für die einzelnen untersuchten Kennwerte werden die Auswirkungen je Fahrverhaltensmodell und je Ausstattungsrate durch Gegenüberstellung der Ergebnisse mit dem Nullfall (100 % menschliche Fahrer) untersucht. Für das konservative Fahrverhaltensmodell zeigte sich, dass bereits ab einem Ausstattungsgrad von 50 % HAF eine Überstauung der Strecke an manchen Querschnitten eintritt. Dies ist auf die relative große Mindestzeitlücke von 1,8 s bzw. 2,9 s, die beschränkend auf die Kapazität einwirkt, zurückzuführen. Die Zeitlücken sind dadurch auch deutlich größer als die in der ISO 22179 vorgesehenen Mindestzeitlücken. Bild 7-1 zeigt, dass beim konservativen Fahrverhaltensmodell die Kapazität im zweistreifigen Bereich auf etwa 4.000 Kfz/h absinkt. Dies ist bereits ab einer Ausstattungsrate von 50 % der Fall. In der weiteren Analyse wird das konservative Fahrverhaltensmodell nicht weiter berücksichtigt, da mit Überstauung der Strecke nicht die vorgesehenen Verkehrsmengen in die Simulation eingespeist werden können und die Ergebnisse somit nicht sinnvoll weiter auszuwerten sind.

Wie in Tabelle 7-1 beschrieben, wurden Simulationen mit den Ausstattungsgraden 10 %, 50 %, 90 %

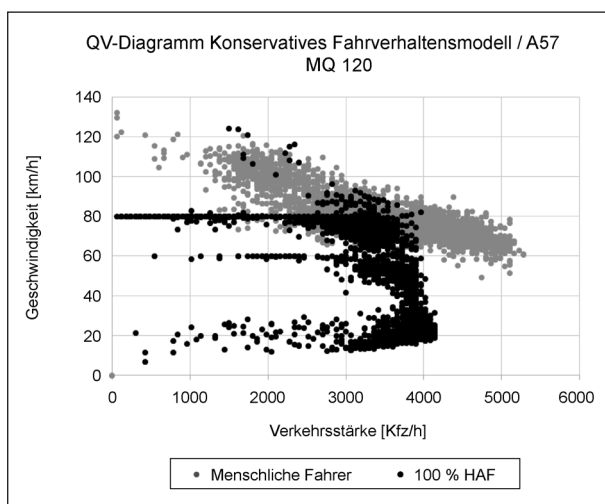


Bild 7-1: QV-Diagramm; Basis Ein-Minuten-Intervalle; A57 zweistreifiger Bereich; konservatives Modell

und 100 % HAF durchgeführt. Bei einer Ausstattung von 10 % ist bei allen Modellen kein nennenswerter Unterschied zum Szenario „100 % menschliche Fahrer“ festzustellen. Ab einer Ausstattungsrate von 50 % werden die Auswirkungen je nach betrachtetem Kennwert jedoch deutlich.

Sowohl mit dem progressiven als auch mit dem wünschenswerten Modell wird der Verkehrsfluss bei 90 und bei 100 % HAF harmonisiert und deutlich flüssiger. Die Stausituationen, die bei 100 % menschlichen Fahrern an manchen Querschnitten vorhanden waren, entstehen in den Szenarien 90 % HAF und 100 % HAF nicht, wodurch gegenüber dem Nullfall auch keine Stauschaltungen mehr vorhanden sind. Bei der Modellierung der automatisierten Fahrzeuge wird für alle Fahrverhalten definiert, dass automatisierte Fahrzeuge die zulässigen Höchstgeschwindigkeiten eines Streckenabschnittes unbedingt einhalten müssen (siehe Kapitel 5.1.3.2). Im Modell wird daher der Befolungsgrad der Geschwindigkeit von HAF mit 1,0 definiert. Für die menschlichen Fahrer wird demgegenüber ein Befolungsgrad mit einem Maximum von 1,2 und einem Minimum von 1,0 angesetzt.

Mit einer Befolgung von 1,0 fahren die Fahrzeuge nicht schneller als durch eine Geschwindigkeitsbeschränkung vorgegeben.

Die Konfiguration der Unterzentrale sieht für eine Deaktivierung einer Harmonisierungsschaltung von z. B. 80 km/h eine mittlere lokale Geschwindigkeit > 80 km/h vor. Da dies aber durch die Parameter der HAF ausgeschlossen wird, ist die Deaktivierung einer Schaltung bei 100 % HAF nicht möglich, wenn das gleiche Schaltbild an allen Messquerschnitten gilt, die für die Ermittlung des Schaltbilds am Anzeigequerschnitt herangezogen werden. Aus diesem Grund gibt es in den Szenarien mit hohen Ausstattungsgraden, unabhängig vom Fahrverhaltensmodell einen sehr großen Anteil an Harmonisierungsschaltungen von 80 km/h und nur sehr wenige Harmonisierungsschaltungen von 100 km/h oder 120 km/h. Auf der A57 wird die Harmonisierungsschaltung von 80 km/h ab Beginn der zweistreifigen Strecke angezeigt, daher kann sie nicht mehr deaktiviert werden. Auf der A92 werden die Harmonisierungsschaltungen von 80 km/h und 100 km/h nicht ab dem Anfang der Strecke angezeigt und können daher deaktiviert werden. Aus diesem Grund gibt es auf der A92 einen größeren Anteil an der Harmonisierungsschaltung 130 km/h und 100 km/h. Zusätzlich sind die Messquerschnitte und Anzeigequerschnitte

schnitte anders zueinander lokalisiert. Auf der A92 liegen MQ und AQ sehr nahe zusammen, sodass das Anzeigebild des vorherigen AQs ebenfalls Einfluss am MQ hat. Auf der A57 ist der Abstand zwischen AQ und MQ meistens größer.

Um die Auswirkungen der Automatisierung gezielt zu analysieren, wurden für die drei Kategorien

- Verkehrsfluss,
- Geschwindigkeit und
- Abstandsverhalten

jeweils Hypothesen für die zu erwartenden Wirkungen aufgestellt und diese Hypothesen zunächst am 100 % HAF Szenario überprüft. Sofern die Hypothese bestätigt werden kann, werden die Auswirkungen auch in den Mischszenarien detailliert analysiert.

Auf der A92 liegen die Anzeigequerschnitte und die Messquerschnitte sehr nah zusammen. In der Auswertung wurden die Schaltbilder des Anzeigequerschnitts mit den Daten des Messquerschnitts verknüpft. Da der Abstand aber sehr gering ist haben die automatisierten Fahrzeuge, die das Schaltbild erst mit der Durchfahrt am Anzeigequerschnitt bekommen, keine Möglichkeit darauf zu reagieren. Daher kann die gefahrene Geschwindigkeit am Messquerschnitt höher sein als am Anzeigequerschnitt angezeigt, insbesondere wenn am vorherigen Querschnitt ein anderes Schaltbild angezeigt wurde. Aus diesem Grund werden auf der A92 keine lokalen Daten in Abhängigkeit des Schaltbildes ausgewertet. Die Geschwindigkeitsauswertungen werden mit streckenbezogenen Daten durchgeführt.

7.2.1 Bewertung des Verkehrsflusses/ Störungen

Zur Analyse des Verkehrsflusses wurden die folgenden Hypothesen aufgestellt, die bei einer Ausstattungsrate von 100 % bei beiden Modellen erwartet werden:

- Bei hoher Dichte wird eine höhere Geschwindigkeit erreicht (1).
- Es wird eine höhere maximale Verkehrsstärke erreicht (höhere Kapazität) (2).
- Bei gleicher Geschwindigkeit wird eine höhere Dichte, insbesondere bei hohen Dichten erreicht (3).

- Bei hohen Verkehrsstärken treten geringere Schwankungen der Verkehrsstärke auf (4).
- Die Schwankungen der mittleren Geschwindigkeit fallen geringer aus (5).
- Die Anzahl der Einbrüche bei hohen Verkehrsstärken ist geringer (6).
- Die Reisezeiten sind geringer (7).

7.2.1.1 Verkehrsfluss

Für die Beurteilung der Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Dichte wurden kV-Diagramme auf der Strecke gebildet. Es wurde zwischen dem 2-streifigen und dem 3-streifigen Bereich unterschieden. Da auf der A57 die Harmonisierungsschaltung von 80 km/h bei einem hohen Anteil automatisierter Fahrzeuge mit den vorhandenen UZ-Parametern nicht mehr aufgelöst werden konnte, ist bei 100 % Ausstattungsrate die zulässige Geschwindigkeit von 80 km/h deutlich zu erkennen, wie in Bild 7-2 für den gesamten zweistreifigen Bereich zu sehen ist.

Dadurch dass die Schaltung nicht aufgehoben wird, wird im niedrigen Dichtebereich < 20 Kfz/km die Leistungsfähigkeit der Strecke nicht genutzt und die Geschwindigkeit liegt in diesem Bereich deutlich niedriger als im Vergleichsfall mit 100 % menschlichen Fahrern. Bei einer Dichte > 70 Kfz/km größer ist die Geschwindigkeit der automatisierten Fahrzeuge hingegen höher als die der menschlichen Fahrer. Auf der A92 ist die Geschwindigkeit bei größerer Dichte ebenfalls etwas höher als bei 100 % menschlichen Fahrern. Da dort aber nicht haupt-

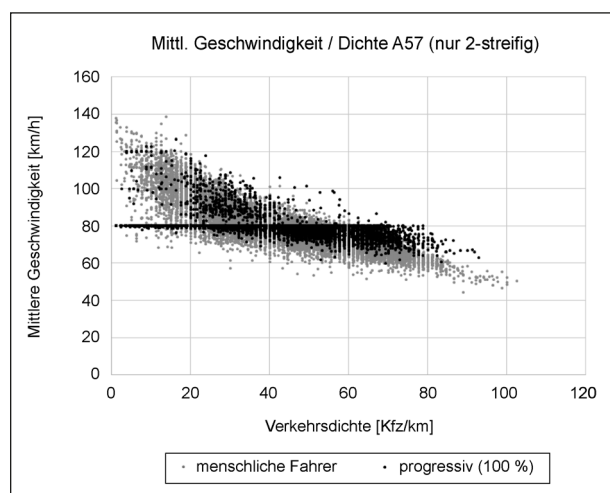


Bild 7-2: Geschwindigkeit/Dichte; Ein-Minuten-Intervalle; A57 zweistreifiger Bereich; progressives Modell 100 % HAF

sächlich eine Harmonisierungsschaltung von 80 km/h anliegt, ist der gesamte Geschwindigkeitsbereich abgebildet. Im wünschenswerten Modell gibt es insgesamt wenig „passiv“ Schaltungen, daher wird der obere Geschwindigkeitsbereich nicht abgebildet. Während bei 10 % HAF in beiden Verhaltensmodellen keine wesentlichen Unterschiede zu den menschlichen Fahrern zu sehen sind, ist auch bei 50 % HAF eine höhere Geschwindigkeiten bei hohen Dichten erkennbar (siehe Bild 7-3), da die kleineren Zeitlücken der HAF einen bemerkbaren Einfluss bekommen. Der Unterschied zu den menschlichen Fahrern ist auf der A57 deutlicher als auf der A92. Auf der A92 ist die Dichte bei gleicher Geschwindigkeit deutlich höher wie Bild 7-4 zu sehen ist.

Es kann eine Erhöhung der Kapazität für beide Fahrverhaltensmodelle festgestellt werden. Diese beträgt mindestens 800 Kfz/h für das progressive

Modell und mindestens 300 Kfz/h für das wünschenswerte Modell. Allerdings gab es bei 100 % HAF keine Zusammenbrüche, sodass die tatsächliche Kapazität nicht ermittelt werden konnte. Bei 50 % HAF und 90 % HAF ist ebenfalls eine Erhöhung der Kapazität, besonders für das progressive Modell zu erkennen, wie in Bild 7-6 für das progressive Modell und in Bild 7-5 für das wünschenswerte Modell am Beispiel des MQ 120 auf der A57 dargestellt ist. Auf der A92 ist ebenfalls eine Kapazitätserhöhung von ähnlicher Größe für beide Fahrverhaltensmodelle sichtbar. Für eine genaue Kapazitätsermittlung ist jedoch ein anderes Simulationsszenario zu empfehlen. Die Hypothesen (1) und (3) konnten teilweise bestätigt werden. Auf der A57 sind die Geschwindigkeiten bei hoher Dichte etwas größer, bei kleinerer Dichte aufgrund der bestehenden SBA-Schaltung und der Befolgung durch die automatisierten Fahrzeuge allerdings deutlich geringer. Auf der A92 ist der Geschwindigkeitsunter-

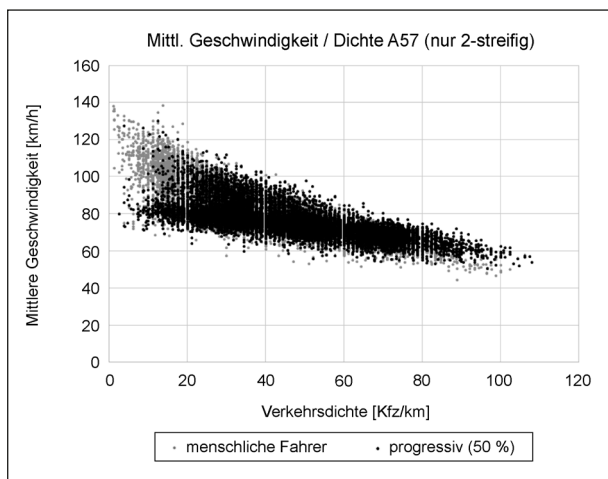


Bild 7-3: Geschwindigkeit/Dichte; Ein-Minuten-Intervalle; A57 zweistreifiger Bereich; progressives Modell 50 % HAF

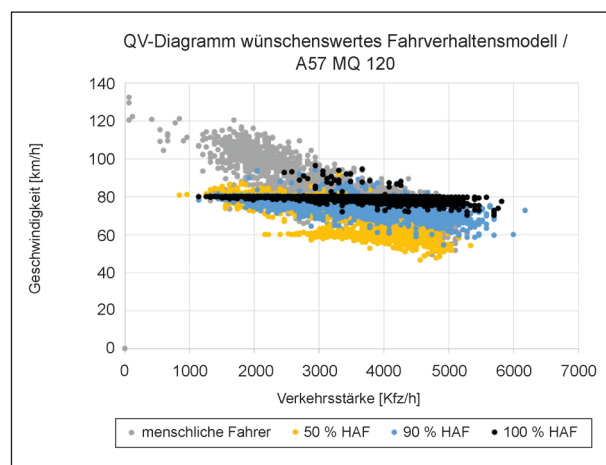


Bild 7-5: QV-Diagramm; Basis Ein-Minuten-Intervalle; A57 MQ 120; wünschenswertes Modell

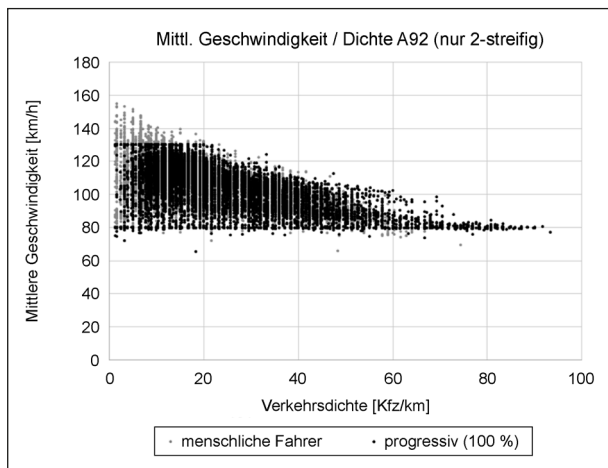


Bild 7-4: Geschwindigkeit/Dichte; Ein-Minuten-Intervalle; A92 zweistreifiger Bereich; progressives Modell 100 % HAF

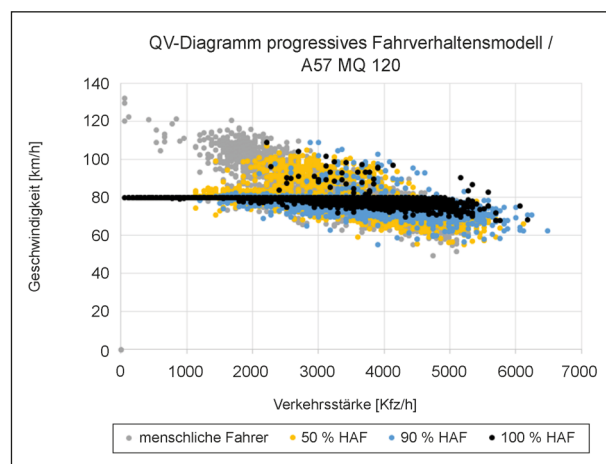


Bild 7-6: QV-Diagramm; Basis Ein-Minuten-Intervalle; A57 MQ 120; progressives Modell

schied weniger deutlich ausgeprägt. Hier ist die Dichte (Hypothese 2 und 3) bei gleicher Geschwindigkeit höher. Für eine genaue Ermittlung der Kapazität sind weitere Simulationen nötig. Die Hypothese (2), dass mit zunehmender Automatisierung (50 % und höher) die Kapazität ansteigt, wird grundsätzlich bestätigt. Sie hängt allerdings sehr stark von den gewählten Modellparametern, insbesondere der Zeitlückenverteilung der HAF ab und kann wie im konservativen Modell zu sehen auch zu geringerer Kapazität führen.

7.2.1.2 Schwankungen der Verkehrsstärke

Beim Vergleich der Schwankungen der Verkehrsstärke vom Nullfall mit den 100 % HAF Szenarien konnten für beide Fahrverhaltensmodelle keine eindeutige Verbesserung im Vergleich zum Nullfall mit nur menschlichen Fahrern beobachtet werden. Die angenommene Hypothese (4) wird nicht belegt. Es ist zu vermuten, dass die Einspeisung der Fahrzeuge in das Netz, die für den Nullfall und die Szenarien identisch ist, der wesentliche Einflussfaktor auf die Schwankung der Verkehrsstärke ist.

7.2.1.3 Schwankungen der mittleren Geschwindigkeit

Die Wunschgeschwindigkeit von HAF ist sehr nahe an der Geschwindigkeitsbeschränkung, sofern diese vorhanden ist. Wenn die Fahrzeuge aufgrund der Verkehrsbedingungen mit ihrer Wunschgeschwindigkeit fahren können, ist die Geschwindigkeitsabweichung zum gleitenden Mittelwert bei einer 100 % Ausstattungsrate in beiden Modellen sehr gering, wie in Bild 7-7 für den MQ 120 im wünschenswerten Modell und einer Geschwindigkeitsbeschränkung von 80 km/h dargestellt ist. Die Verringerung der Schwankungen ist ab einer Ausstat-

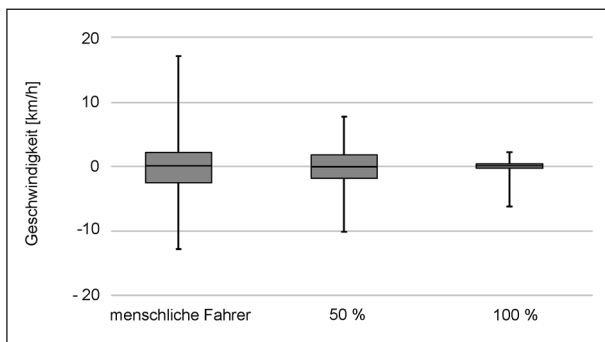


Bild 7-7: Abweichung vom gleitenden Mittelwert Geschwindigkeit; Basis Ein-Minuten-Intervalle; wünschenswertes Modell

tungsrate von 50 % HAF zu erkennen. Die Verringerung nimmt mit stärkerer Beschränkung zu. Die Schwankungen im wünschenswerten Modell sind etwas geringer als im progressiven Modell. Die Hypothese (5) konnte aufrechtgehalten werden.

7.2.1.4 Anzahl der Geschwindigkeitseinbrüche

Für das progressive Modell gab es bei einer Ausstattungsrate von 50 % HAF am MQ 60 und MQ 120 jeweils einen Zusammenbruch nach den in Kapitel 5.3.1.3 definierten Kriterien. Für das wünschenswerte Modell gab es auf der A57 am MQ 60 einen Zusammenbruch. An den Querschnitten 150/140 traten weitere Zusammenbrüche auf. Für die Szenarien mit 100 % HAF wurden für beide Verhaltensmodelle keine Zusammenbrüche beobachtet. Auf der A92 gab es in beiden Modellen für 50 % und 100 % HAF keine Zusammenbrüche. Die Hypothese (6) wird somit aufrecht gehalten. Bei 100 % HAF findet unabhängig vom Fahrverhaltensmodell eine Homogenisierung des Verkehrsflusses statt, sodass bei den vorhandenen Verkehrsbelastungen keine Störungen mehr auftreten. Auch mit einer Ausstattung von 50 % sind schon Verbesserungen gegenüber dem Nullfall, in dem noch mehrere Zusammenbrüche zu beobachten waren, zu sehen. Sie sind auf der A57 in Intensität und Dauer deutlich ausgeprägter als im Szenario mit 50 % Ausstattung.

7.2.1.5 Mittlere Reisezeit

Auf der A57 ist bei 100 % HAF zum Großteil eine 80 km/h Harmonisierungsschaltung aktiviert. Zusätzlich entstand keine Störung wie im Nullfall. Dadurch sinkt die Reisezeit für beide Fahrverhaltensmodelle bei einer Ausstattungsrate von 100 % HAF im Vergleich zu 100 % menschlichen Fahrern wie in Bild 7-8 zu sehen ist. Der Median beider Modelle ist ähnlich, allerdings ist die Streuung bei dem wünschenswerten Modell etwas kleiner als bei dem progressiven Modell, nimmt aber im Vergleich zum Nullfall für beide Modelle ab. Auf der A92 besteht auch im Nullfall keine Störung, dadurch gibt es keine Ausreißer nach oben. Aufgrund der anderen Anordnung der MQs und AQS kommt es auf der A92 auch bei 100 % HAF zu mehreren Schaltbildern. Der Median der Reisezeit bei 100 % HAF nimmt im progressiven Modell ab. Im wünschenswerten Modell ist er gleichbleibend. Die Streuung nimmt auf der A92 im Gegensatz zur A57 zu, wie in Bild 7-9 zu sehen ist. Allerdings sind aufgrund der verschiedenen Schaltbilder auch unterschiedliche Geschwin-

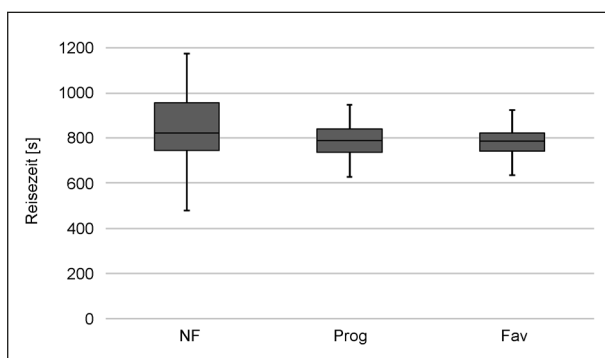


Bild 7-8: Reisezeit; A57; 100 % HAF

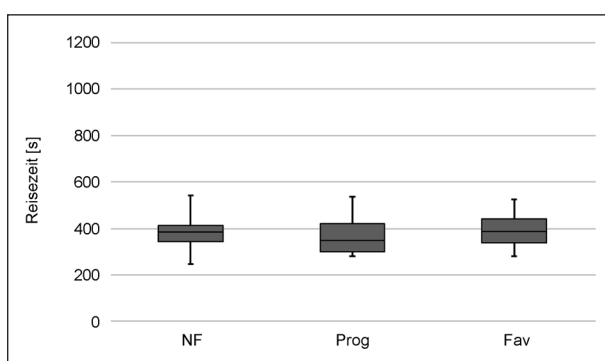


Bild 7-9: Reisezeit; A92; 100 % HAF

digkeiten möglich, was sich wiederum in der Reisezeit und einer größeren Streuung widerspiegelt. Die geringere Reisezeit auf der A57 wird erst ab 100 % Ausstattungsrate deutlich. Bei 90 % sinkt die Reisezeit für das progressive Modell, steigt aber für das wünschenswerte Modell leicht an. Die Streuung der Reisezeiten wird bei der Ausstattung von 90 % für beide Modelle im Vergleich zum Nullfall kleiner. Bei einer Ausstattungsrate von 50 % bleibt die Reisezeit für das progressive Modell gleich, steigt aber ebenfalls im wünschenswerten Modell an. Ein Grund liegt darin, dass im wünschenswerten Modell die Zeitlücke zwischen HAF und menschlichem Fahrer um 0,9 s größer als im progressiven Modell ist. Dadurch sind die Abstände etwas größer und der Verkehrsfluss bei hohen Verkehrsstärken etwas störungsanfälliger. Für das 100 % HAF Szenario konnte die Hypothese (7) aufrecht gehalten werden. Der Median der Reisezeit auf der A57 sinkt um 35 s bzw. 37 s bei einer Gesamtreisezeit von ca. 13 min.

7.2.2 Bewertung des Geschwindigkeitsverhaltens

Zur Analyse des Geschwindigkeitsverhaltens wurden die folgenden Hypothesen aufgestellt, die bei einer Ausstattungsrate von 100 % bei beiden Modellen erwartet werden:

- Bei gleichen Harmonisierungsschaltungen (ohne nachfolgenden Zusammenbruch) sinkt das Geschwindigkeitsniveau (8).
- Die Standardabweichung der lokalen Kfz-Geschwindigkeiten wird geringer (9).
- Zwischen benachbarten Fahrstreifen treten geringere Differenzen der lokalen Kfz-Geschwindigkeiten auf (10).
- Die Geschwindigkeitsdifferenzen individueller aufeinanderfolgender Fahrzeuge fallen geringer aus (11).

7.2.2.1 Geschwindigkeitsniveau

Die Streuung der lokalen Geschwindigkeit auf der A57 nimmt mit stärkerer Geschwindigkeitsbeschränkung in beiden Fahrverhaltensmodellen bei 100 % HAF deutlich ab, wie in Bild 7-10 und Bild 7-11 für den MQ 120 auf der A57 bei einer Geschwindigkeitsbeschränkung von 80 km/h zu sehen ist. Für diesen Querschnitt ist das Min/Max bei 61/94 km/h für 100 % menschliche Fahrer bei einer Geschwindigkeitsbeschränkung von 80 km/h. Die Spanne wird für 100 % HAF deutlich verringert und liegt zwischen 72 und 80 km/h. Da es aufgrund der stehenbleibenden Harmonisierungsschaltung von 80 km/h keine große Anzahl an anderen Schaltungen gibt, kann für das Geschwindigkeitsniveau nur eine Aussage für die Harmonisierungsschaltung von 80 km/h getroffen werden. Der Median bleibt mit ca. 79 km/h ähnlich bei 100 % HAF und 100 % menschlicher Fahrer. Bei 50 % HAF ist der Median niedriger. Dabei ist das Geschwindigkeitsniveau im progressiven Modell etwas höher als im wünschenswerten Modell. Für eine Ausstattungsrate von 90 % steigt die Geschwindigkeit etwas an und liegt bei 75 km/h für das wünschenswerte Modell und 76 km/h für das progressive Modell. Auf der A92 wurde das momentane Geschwindigkeitsniveau untersucht. Bei einer Geschwindigkeitsbeschränkung von 100 km/h ist die Streuung ebenfalls geringer als bei 100 % menschlichen Fahrern. Der Median liegt im Abschnitt des MQ 500 mit 88 km/h

unter dem der menschlichen Fahrer mit 95 km/h, wie in Bild 7-12 zu sehen ist. Die angenommene Hypothese (8), dass die Geschwindigkeit mit zunehmender HAF-Ausstattungsrate abnimmt, trifft für alle Mischszenarien bei einer Beschränkung von 80 km/h zu. Bei 100 % HAF ist der Median ähnlich dem Nullfall. Bei einer Beschränkung vom 100 km/h ist die Geschwindigkeit ebenfalls geringer als bei menschlichen Fahrern bei 100 % HAF. Allerdings ist deutlich sichtbar, dass die Geschwindigkeiten homogener werden und somit die Streuung abnimmt, was allerdings durch die Modellparameter der HAF vorgegeben ist.

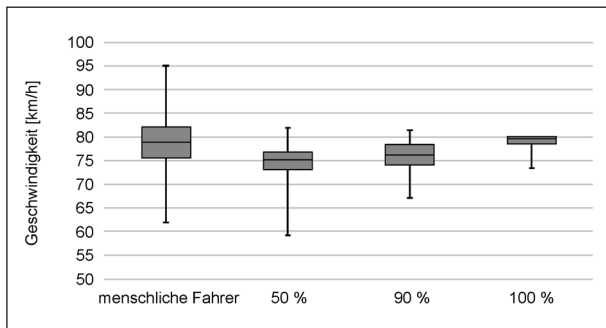


Bild 7-10: Lokale Geschwindigkeit; Basis Ein-Minuten-Intervalle; A57 MQ 120 V80 km/h; progressives Modell

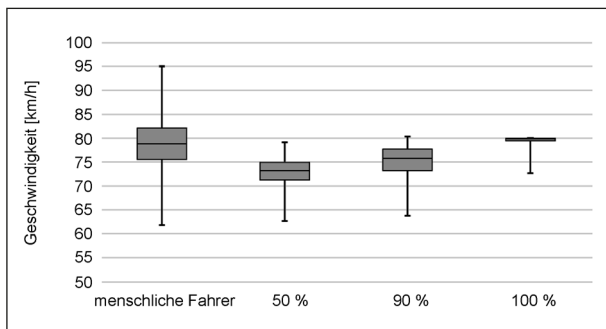


Bild 7-11: Lokale Geschwindigkeit; Basis Ein-Minuten-Intervalle; A57 MQ 120 V80 km/h; wünschenswertes Modell

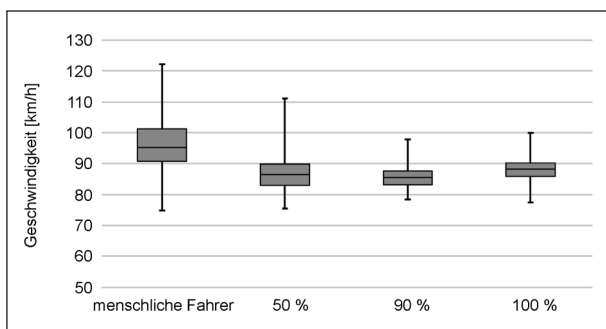


Bild 7-12: Momentane Geschwindigkeit; Basis Ein-Minuten-Intervalle; A92 Subsec 500 V100 km/h; wünschenswertes Modell

7.2.2 Standardabweichung Geschwindigkeit

Die Standardabweichung der lokalen Geschwindigkeit nimmt bei beiden betrachteten Fahrverhaltensmodellen mit zunehmendem Ausstattungsgrad für eine Harmonisierungsschaltung von 80 km/h ab, wie in Bild 7-13 und Bild 7-15 zu sehen ist. Dies wird ab einer Ausstattungsrate von 50 % HAF sichtbar und ist bei 100 % HAF deutlich zu erkennen. Bei allen anderen Schaltungen ist die Standardabweichung für das progressive Modell ähnlich wie die der menschlichen Fahrer. Im wünschenswerten Modell sinkt die Standardabweichung auch bei allen anderen Schaltzuständen. Bei einer Ausstattungsrate von 50 % ist zu sehen, dass auch im Fall einer Stauschaltung die Standardabweichung abnimmt und somit die Geschwindigkeiten homogener sind. Klassifiziert man die Standardabweichungen nach den Verkehrsbelastungen, wird deutlich, dass sowohl im Nullfall als auch bei einem Ausstattungsgrad von 50 % die Standardabweichung der Geschwindigkeit relativ konstant über die verschiedenen Verkehrsnachfragebereiche ist. Bei einem Ausstattungsgrad von 100 % steigt die Standardabweichung mit zunehmender Verkehrsnachfrage, da die Fahrzeuge häufiger nicht ihre Wunschgeschwindigkeit fahren können. Die Standardabweichung der momentanen Geschwindigkeit auf der A92 im wünschenswerten Modell sinkt bei einer Geschwindigkeitsbeschränkung von 100 km/h bei 50 % HAF. Sie steigt allerdings für 100 % HAF wieder etwas an (vgl. Bild 7-14), was an den unterschiedlichen Geschwindigkeiten für Lkw und Pkw liegt. Im progressiven Modell ist kein Unterschied zwischen einer Ausstattung mit 50 % und 100 % HAF zu sehen. Die Hypothese (9) kann insbesondere für die Harmonisierungsschaltung 80 km/h und die Stauschaltung aufrecht gehalten werden.

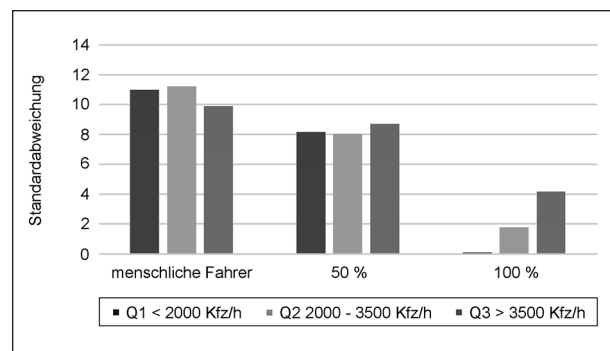


Bild 7-13: Standardabweichung lokale Geschwindigkeit; Basis Ein-Minuten-Intervalle; A57 MQ 120 V80 km/h; progressives Modell

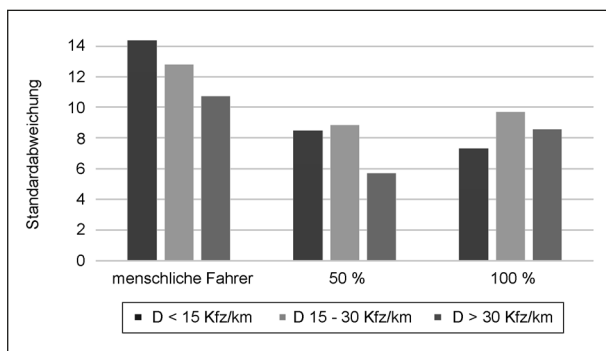


Bild 7-14 Standardabweichung momentane Geschwindigkeit; Basis Ein-Minuten-Intervalle; A92 MQ 500 V100 km/h; wünschenswertes Modell

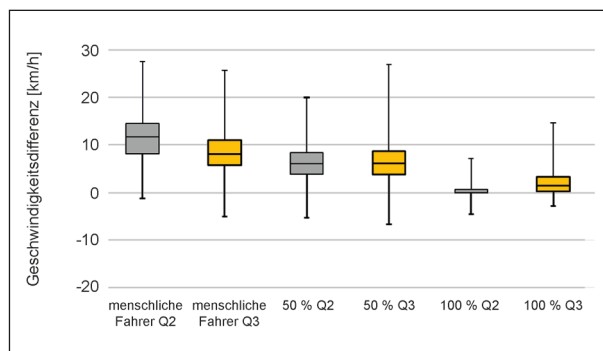


Bild 7-16: Lokale Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Fahrstreifen; A57 MQ 120 V80 km/h; progressives Modell

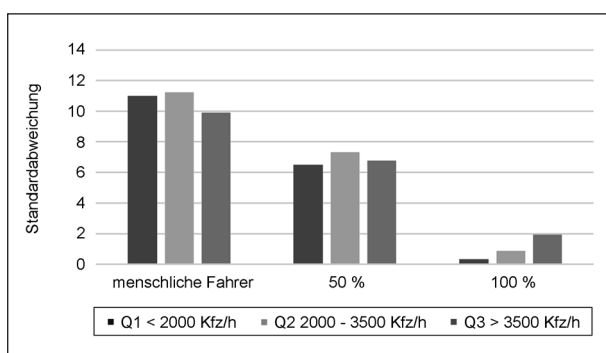


Bild 7-15: Standardabweichung lokale Geschwindigkeit; Basis Ein-Minuten-Intervalle; A57 MQ 120 V80 km/h; wünschenswertes Modell

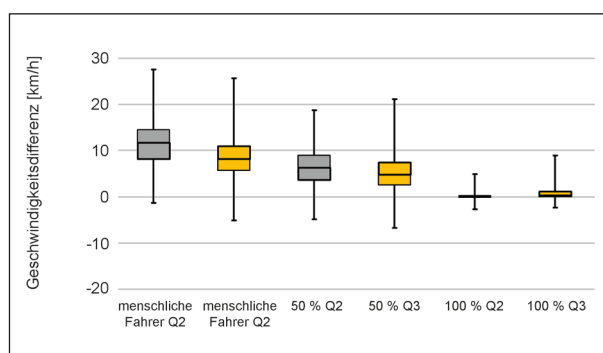


Bild 7-17: Lokale Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Fahrstreifen; A57 MQ 120 V80 km/h; wünschenswertes Modell

7.2.2.3 Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen den Fahrstreifen

Die lokalen Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen den Fahrstreifen wurden für die Analyse in Verkehrsstärkeklassen (Q1 < 2.000 Kfz/h; Q2 2.000 – 3.500 Kfz/h; Q3 > 3.500 Kfz/h) unterteilt. Während einer Harmonisierungsschaltung von 80 km/h wird der Median der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen den Fahrstreifen in beiden Modellen kleiner und liegt für einen Ausstattungsgrad von 100 % nahe 0. Ebenso liegen das Maximum und das Minimum näher aneinander. Es konnten keine Unterschiede zwischen den Verkehrsstärkeklassen ermittelt werden. Die Hypothese (10) konnte belegt werden.

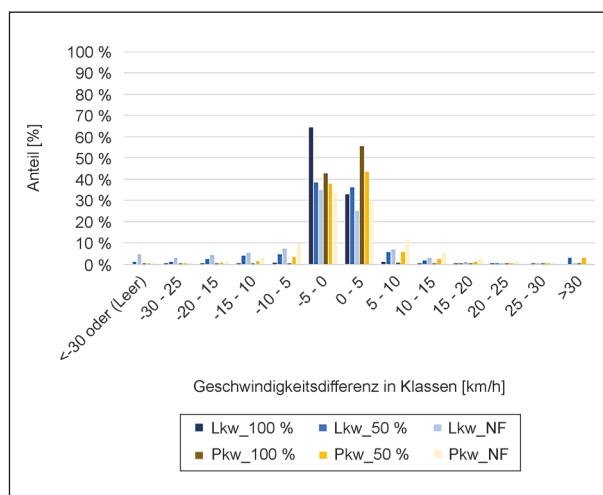


Bild 7-18: Geschwindigkeitsdifferenz zum Vorderfahrzeug; A57 Subsection 120 V80 km/h; wünschenswertes Modell

7.2.2.4 Geschwindigkeitsdifferenzen aufeinanderfolgender Fahrzeuge

Die Geschwindigkeitsdifferenzen zum Vorderfahrzeug wurden je Streckenabschnitt unterschieden in Kfz, Pkw und Lkw untersucht. Die Differenzen für alle Pkw zum Vorderfahrzeug sind für menschliche Fahrer (Nullfall) mit einem Mittelwert nahe 0 bereits

gering, werden aber bei 100 % HAF in beiden Fahrverhaltensmodellen und beiden Strecken noch kleiner. Im Nullfall liegen 60 % der Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen -5 und 5 km/h, wie in Bild 7-18 zu sehen ist. Bei einer Ausstattung von 100 % liegt die Geschwindigkeitsdifferenz von 90 % der Pkw und Lkw zwischen -5 und 5 km/h. Der Anteil an ne-

gativen Differenzen ist für Lkw größer, da es häufiger einen schneller fahrenden Pkw als Vorderfahrzeug gibt. Bei 50 % Ausstattung liegt der Anteil der Differenzen zwischen -5 und 5 km/h bei 70-80 %. Im progressiven Modell ist der Anteil an großen Differenzen etwas höher als im wünschenswerten Modell. Die aufgestellte Hypothese (11) kann aufrecht erhalten werden.

7.2.3 Bewertung des Abstandsverhaltens

Zur Analyse des Abstandsverhaltens wurden die folgenden Hypothesen aufgestellt, die bei einer Ausstattungsrate von 100 % bei beiden Modellen erwartet werden:

- Es treten kleinere Zeitlücken auf (12).
- Bei gleicher Dichte wird ein günstigeres CIBTR ermittelt (13).

7.2.3.1 Mittlere Nettozeitlücke

Die Nettozeitlücke wurde je Abschnitt (Section) aus Einzelfahrzeugdaten alle 30 s berechnet. Vergleicht man die Zeitlücken der verschiedenen Ausstattungsgrade für eine Harmonisierungsschaltung von 80 km/h auf einer Section, fällt auf, dass der Anteil an kleinen Zeitlücken (1-2 s) um mindestens 10 % größer wird bei vorhandenen HAF. Es konnte kein expliziter Unterschied zwischen den Ausstattungsgraden festgestellt werden. Allerdings ist bei 100 % HAF im wünschenswerten Modell der Anteil an Zeitlücken bis 0,75 s deutlich kleiner als im progressiven Modell, wie in Bild 7-19 und Bild 7-20 für einen exemplarischen Streckenabschnitt im zweistreifigen Bereich auf der A57 in einer Teilstrecke zwi-

schen der AS Krefeld Oppum und der AS Krefeld Zentrum zu sehen ist. Der Anteil an Zeitlücken zwischen 0,75 und 1 s ist dagegen größer. Dies ist auf die defensive und sehr homogene Fahrweise der HAF im wünschenswerten Modell zurückzuführen und ist auf beiden Strecken zu beobachten. Der Anteil an Zeitlücken von 2-7 s wird kleiner je größer der Anteil an HAF ist. Die Hypothese (12) konnte aufrecht gehalten werden.

7.2.3.2 Mittlere (Compensated) Individual Braking Time Risk (CIBTR)

Die CIBTR wird wie in Kapitel 3.3.4 beschrieben berechnet. Die Werte γ_{max} und κ bleiben konstant. Somit sind die beiden Variablen die Geschwindigkeit und die Nettozeitlücke zum Vorderfahrzeug. Die Geschwindigkeit ist bei einer Beschränkung von 80 km/h sehr nahe an 80 km/h. Der Anteil der Nettozeitlücken < 1 s nimmt mit zunehmender Automatisierung zu. Dadurch steigt der CIBTR Wert bei beiden Modellen mit zunehmender Automatisierung in den positiven Bereich, was einen größeren Anteil an riskanten Fahrmanövern bedeutet. Dies ist besonders für den rechten Fahrstreifen in Bild 7-21 für das wünschenswerte Modell zu sehen. Der Wert κ dient zur Unterscheidung zwischen sicheren und unsicheren Situationen und wurde für menschliche Fahrer gewählt. Da HAF Fahrzeugen ein anderes Fahrverhalten zugrunde liegt, das für kleinere Zeitlücken sicherer erscheint, ist eine Anpassung von κ als erforderlich anzusehen. Dadurch ist ein Vergleich mit dem Nullfall nicht mehr ohne weiteres möglich, würde aber realistischere CIBTR für HAF ermöglichen. Zur Ermittlung eines Wertes muss weitere Forschung betrieben werden. Auf dem linken Fahrstreifen sinkt der Median bei 100 % Aus-

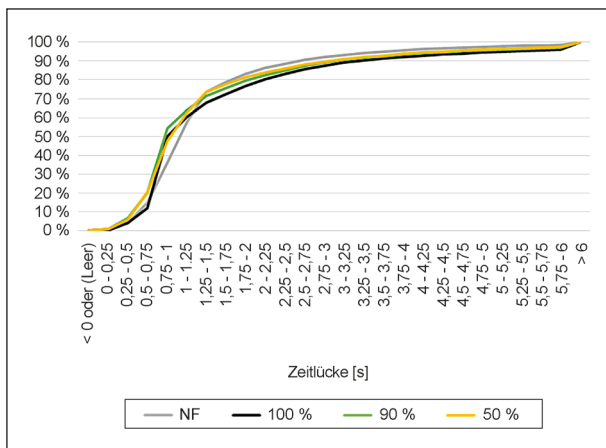


Bild 7-19: Zeitlückenverteilung; A57 Subsec 120 V80 km/h; progressives Modell

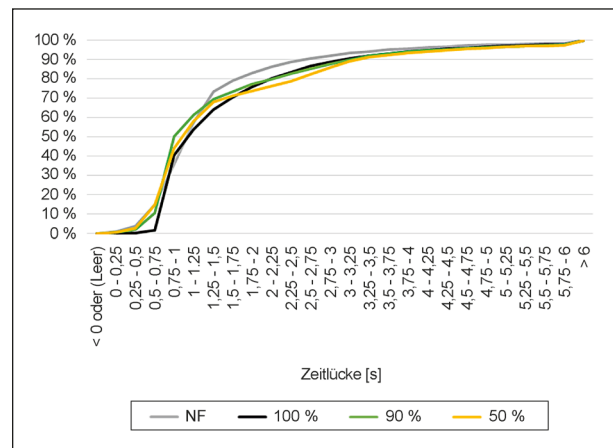


Bild 7-20: Zeitlückenverteilung; A57 Subsec 120 V80 km/h; wünschenswertes Modell

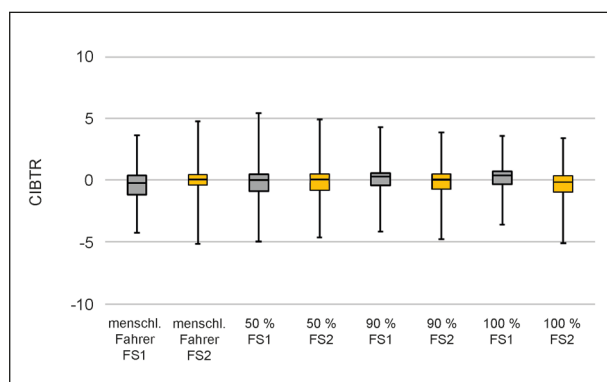


Bild 7-21: CIBTR; A57 Subsec 120 V80km/h; wünschenswertes Modell

stattung gegenüber dem Nullfall etwas. Die Hypothese, dass es durch das homogenere Fahrverhalten der HAF zu weniger kritischen Situationen kommt, konnte mit den berechneten Parametern nicht belegt werden.

7.2.4 Fazit

Von den drei Fahrverhaltensmodellen der HAF können das progressive und das wünschenswerte Modell als zielführend angesehen werden. Das konservative Modell führte ab einer Ausstattungsrate von 50 % zu einer deutlich verringerten Streckenkapazität um ca. 1.000 Kfz/h im zweistreifigen Bereich gegenüber den menschlichen Fahrern und wurde daher nicht weiter analysiert. Die Untersuchung hat gezeigt, dass die Ausschaltkriterien einer Harmonisierungsschaltung bei einem hohen HAF-Anteil nicht erreicht werden. Für die Szenarien mit 90 % und 100 % HAF wurde verkehrsbedingt relativ zügig eine Schaltung von 80 km/h aktiviert, die bis zum Ende der Simulation Bestand hatte. Der Grund dafür liegt in der parametrisierten Ausschaltsschwelle. Die Schaltung wird bei einer mittleren lokalen Geschwindigkeit > 80 km/h deaktiviert. Da die automatisierten Fahrzeuge aber die Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h nicht überschreiten, ist eine Deaktivierung nur mit menschlichen Fahrern möglich. Daher wurde bei der Betrachtung der Auswirkungen auf den Verkehrsfluss auf der A57 hauptsächlich dieser Schaltzustand analysiert. Insgesamt wird der Verkehrsfluss für beide Fahrverhaltensmodelle der HAF bei steigendem Ausstattungsgrad aufgrund der Parameter der Modelle deutlich homogenisiert und damit verbessert. Bei einer Ausstattung von 100 % ist dies zum einen daran erkennbar, dass es keine Stauschaltungen und auch keine Zusammenbrüche nach den beschriebenen Kriterien gibt. Zum

anderen nimmt das Geschwindigkeitsniveau bei hoher Dichte ebenfalls zu. Für die Szenarien mit 100 % HAF ist eine deutliche Kapazitätserhöhung erkennbar, sodass bereits ohne Einbrüche Kapazitätssteigerungen von mindestens 800 Kfz/h im progressiven Modell und ca. 300 Kfz/h im wünschenswerten Modell erreicht werden. Für eine genaue Kapazitätsermittlung sind weitere Simulationen, bei denen Verkehrszusammenbrüche enthalten sind, nötig. Eine Kapazitätserhöhung wird bereits ab einem Ausstattungsgrad von 50 % erkennbar, es kommt aber je nach Querschnitt und Modell noch zu Einbrüchen, daher sind die Erhöhungen kleiner. Als Hauptgrund für die Kapazitätserhöhungen und die damit verbundenen höheren Dichten sind die geringeren Zeitlücken bei gleichzeitig relativ hohen Geschwindigkeiten (80 km/h) zu sehen, die für die verschiedenen Fahrverhaltensmodelle der HAF eingestellt werden.

Im progressiven und wünschenswerten Modell sind mittlere Abstände zwischen den Fahrzeugen von ca. 20 m bei Geschwindigkeiten von ca. 80 km/h zu beobachten. Die in der Simulation maximal erreichte Dichte von 45 FZ/km/Fahrstreifen führt zu sehr geringen Zeitlücken von 0,775s bei 80 km/h. Dies liegt unter dem in [VDA17] und als komfortabel beschriebenen Abstand und unter der in der ISO 22179 definierten Mindestzeitlücke.

Auch wenn die geringen Zeitlücken nicht die gesamte Strecke gefahren werden, sondern durch gewisse Situationen (z. B. Spurwechsel) bedingt werden, können die insgesamt geringeren Abstände auch zu Problemen führen. An Anschlussstellen wird beispielsweise das Einfahren auf die Hauptfahrbahn deutlich erschwert. In der Simulation kann mit dem gewählten Fahrverhalten die aktuelle Nachfrage auf den Strecken bedient werden. Die Dichte kann allerdings nicht beliebig erhöht werden, da das System irgendwann zusammenbrechen wird. Aus diesem Grund wird weiterhin der Bedarf für Streckenbeeinflussungsanlagen vorhanden sein.

Die mittlere Reisezeit nimmt für beide Fahrverhaltensmodelle auf der A57 um ca. 35 s ab (mehr als 4 %), was ebenfalls in der Homogenisierung des Verkehrsablaufs begründet liegt. Auf der A92 kann nur für das progressive Modell eine Verbesserung der Reisezeit erreicht werden, allerdings waren im Nullfall keine Störungen vorhanden. Im progressiven Fahrverhaltensmodell ist insbesondere für die Mischszenarien von 50 % und 90 % das Geschwindigkeitsniveau höher als im wünschenswerten Mo-

dell. Das Niveau und der Median sind im 100 % Szenario für beide Modelle ähnlich. Der Median ist zudem ähnlich der menschlichen Fahrer, allerdings ist die Streuung deutlich geringer, da die automatisierten Fahrzeuge annähernd die gleiche Wunschgeschwindigkeit haben. Im progressiven Modell ist die Streuung für 100 % HAF größer als im wünschenswerten Fahrverhaltensmodell. Die Standardabweichung der Geschwindigkeit ist bei hoher Verkehrsnachfrage im progressiven Modell größer, da die HAF später und stärker auf das vorausfahrende Fahrzeug und Störungen reagieren. Dadurch sind die Geschwindigkeiten nicht so homogen wie im wünschenswerten Modell, in dem die Fahrzeuge weniger offensiv reagieren. Während es für die Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen den Fahrstreifen keine modellbezogenen Unterschiede gibt, ist die Streuung der Geschwindigkeitsdifferenzen zum Vorderfahrzeug im progressiven Modell größer, was ebenfalls auf die Verzögerung und die möglichen Abstände zum Vorderfahrzeug zurückzuführen ist. Der Anteil an Zeitlücken von 0-0,75 s ist aufgrund der weniger vorausschauenden Reaktion der progressiven HAF im 100 % Szenario in diesem Modell größer. Das CIBTR ist für beide Modelle ähnlich. Insgesamt sind für beide Modelle die 100 % Ergebnisse in ihrem Median ähnlich. Allerdings fahren die Fahrzeuge im wünschenswerten Modell etwas vorausschauender und homogener aufgrund der nicht ganz so starken Wunschverzögerung, sodass die Streuungen im wünschenswerten Modell kleiner sind.

Abschließend kann festgehalten werden, dass durch die Einführung von HAF sich je nach Parametereinstellungen im Modell sowohl eine positive als auch eine negative Wirkung hinsichtlich der Kapazität ergeben kann. Einen wesentlichen Einfluss auf die Dichte haben die Zeitlücken, deren Veränderungen kritisch betrachtet werden müssen, da sie u. U. an der Grenze des praktisch Machbaren liegen und die Sicherheit nicht mehr gewährleistet werden kann. Zudem ist festzuhalten, dass automatisierte Fahrzeuge mit dem angenommenen Fahrverhalten nicht gut mit der vorhandenen SBA Steuerung harmonisieren, da Harmonisierungsschaltungen zum Teil nicht aufgelöst werden, obwohl aufgrund der Verkehrslage eine Rücknahme der Schaltung angemessen wäre.

8 Diskussion der Ergebnisse

8.1 Beurteilung der Belastbarkeit und Übertragbarkeit der Ergebnisse

Gemeinsam mit dem Auftraggeber wurden zwei mit einer SBA ausgestattete und für deutsche Autobahnen repräsentative Streckenabschnitte ausgewählt, die über eine Länge von jeweils mehr als 20 km, mehrere Anschlussstellen und Autobahnkreuze sowie zwei- und dreistreifige Bereiche verfügen. Bei der Auswahl der Referenzstrecken wurde neben der Datenverfügbarkeit Wert auf die spätere Übertragbarkeit der Ergebnisse gelegt, sodass spezielle regionale Verhältnisse oder ein ausgeprägter Einfluss der Streckentopologie als Ausschlusskriterien angesetzt wurden. Wichtig bei der Auswahl war zudem, dass auf den Strecken wiederkehrende Störungen auftreten, die ihrerseits zu regelmäßigen Maßnahmenumsetzungen der SBA wie Harmonisierungs-, Lkw-Überholverbots- und Stauabsicherungsmaßnahmen führen.

Ausgewählt wurde der Streckenabschnitt der A57 zwischen AK Kaarst und dem AK Moers und der Streckenabschnitt der A92 zwischen AS Erding und dem Kreuz Neufahrn.

Die Verkehrszusammensetzung auf beiden Strecken ist ähnlich. Auf der A57 besteht zur Spitzenzeit das Fahrzeugkollektiv im Wesentlichen aus Pendlern, die den Ballungsraum Düsseldorf, Krefeld, Köln befahren. Der Lkw-Anteil liegt über den Simulationszeitraum bei etwa 12 %. Auf der A92 besteht das Fahrzeugkollektiv hauptsächlich aus Pendlern, die aus dem Umland in den Ballungsraum München einfahren sowie dem Flughafenverkehr. Der Lkw-Anteil liegt bei etwa 15 %.

Für beide Strecken war die Datengrundlage sehr gut, d. h. aktuelle Messdaten der statischen Detektion, Einzelfahrzeugdaten, Umfelddaten und Schaltdaten waren verfügbar und konnten sowohl für die Kalibrierung und Validierung des mikroskopischen Simulationsmodells als auch für die Kalibrierung des Wirkmodells herangezogen werden.

Auf beiden Strecken ist eine SBA im Einsatz, die mit dem MARZ 99 Steuerungsverfahren betrieben wird, das die Grundlage für die meisten SBAs in Deutschland bildet. Für beide Strecken unterscheidet sich die Parametrierung des Steuerungsverfahrens. Die Steuerparameter der SBAs wurden vor Inbetriebnahme und im Betrieb an das jeweilige Verkehrsgeschehen und das Verkehrskollektiv angepasst. Für

die Untersuchung wurden in der Simulation die jeweiligen Steuerungsparameter der Anlagen übernommen, sodass die simulierten SBA die realen Steuerungen möglichst genau abbilden. Neben den Steuerungsparametern unterscheiden sich die beiden Strecken in den Maßnahmen. Auf der A92 gibt es anstelle der Harmonisierungsschaltung von 120 km/h eine Harmonisierungsschaltung von 130 km/h. Auch dies wurde in der Simulation umgesetzt.

Auf der A57 traten regelmäßig überlastungsbedingte Störungen auf. Für die A92 zeigte sich in der detaillierten Analyse, dass die Störungswurzel häufig im Autobahnkreuz Neufahrn lag, das nicht vollständig im Simulationsnetz abgebildet wurde. Aus diesem Grund wurde für die A92 ein Verkehrsbelastungsszenario ausgewählt, das zwar eine hohe Verkehrsnachfrage aufweist, eine überlastungsbedingte Stausituation tritt allerdings im Untersuchungsbe- reich nicht auf.

Insgesamt entsprechen die Randbedingungen der ausgewählten Strecken den Bedingungen, wie sie auch auf anderen Autobahnen in Ballungsräumen vorgefunden werden können. Daher ist die grundsätzliche Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Streckenabschnitte, die mit einer SBA nach dem MARZ 99 Steuerungsverfahren ausgestattet sind, gegeben.

Gleichzeitig ist die Übertragbarkeit der Ergebnisse mit der gewählten Untersuchungsmethodik aber auch begrenzt. Ein mikroskopisches Simulationsmodell stellt dabei grundsätzlich eine Vereinfachung der Realität dar. Das Fahrverhalten der Verkehrsteilnehmer wird in der Simulation mittels mathematischer Formeln abgebildet und schwankt in definierten Grenzen um vorgegebene Mittelwerte.

Darüber hinaus wird im Besonderen mit den umgesetzten Modellen nur ein kleiner Bereich der Realität abgebildet und somit die Übertragbarkeit der Ergebnisse eingeschränkt. So wurde für beide Strecken, auch aufgrund der langen Berechnungsdauern, ein Simulationszeitraum von 6 Stunden angesetzt, der jeweils lediglich den Zeitraum der Spitzennachfrage abdeckt. Im Simulationszeitraum konnten auf beiden Strecken die Auswirkungen verschiedenen Harmonisierungsschaltungen und auf der A57 auch die Auswirkungen der Stauwarnung im Nullfall analysiert werden. Weitere Szenarien wie Baustellenszenarien und ein temporäres Lkw-Überholverbot konnten aufgrund der Einschränkungen, die das verwendete mikroskopische Simulations-

tool AIMSUN aufweist, nicht umgesetzt werden. So hat die Fahrstreifenbreite in AIMSUN keinen Einfluss auf das Fahrverhalten und damit unterscheidet sich ein Baustellenszenario auch nicht von einer Harmonisierungsschaltung mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h. Die Simulation des temporären Lkw-Überholverbotes führte ebenfalls zu einem unrealistischen Spurwechselverhalten im Modell, sodass von der Simulation und der weiteren Analyse der Maßnahmen abgesehen wurde.

Durch die Festlegung, dass witterungsbedingte Einflüsse bereits bei der Aufbereitung der Datengrundlage ausgeschlossen wurden, bilden die Ergebnisse nur das Fahren unter einschränkungs-freien Umfeldbedingungen ab.

Gleichzeitig ist die untersuchte verkehrliche Situation zwar wiederkehrend, deckt aber nur eine bestimmte Verkehrssituation (Spitzennachfrage im Berufsverkehr) ab, für die die Kalibrierung und die Parametrierung des Wirkmodells und damit der Reaktion der Fahrer auf Schaltungen der SBA, vorgenommen wurde. Die verkehrlichen Situationen auf den Strecken sind in der Realität vielfältiger als in der Simulation, zumal in der Modellierung die Situationen ausgeschlossen wurden, in denen die Störungsursache nicht im Simulationsbereich liegt, sondern im Abflussbereich eines Autobahnkreuz oder an einer Anschlussstelle im nachgeordneten Netz.

Daher ist eine Übertragbarkeit nur unter folgenden Randbedingungen möglich:

- kein Einfluss von Wetterereignissen
- Spitzenverkehrsnachfrage in Ballungsräumen mit SBA nach MARZ99 Steuerungsverfahren
- ähnlicher Lkw-Anteil (hier 12-15 %)
- Einfluss von Ereignissen wie Unfällen, Baustellen, Streckensperrungen ist ausgeschlossen; mögliche Störungen im Verkehrsablauf treten überlastungsbedingt auf und haben ihre Stauwurzel im Simulationsbereich

Ein weiterer Grund für die eingeschränkte Übertragbarkeit liegt auch im Fahrverhalten der simulierten HAFs. Zur Simulation der HAFs wurden drei verschiedene Fahrverhaltensmodelle für automatisierte Fahrzeuge definiert, die zuvor exemplarisch in Abstimmung mit Vertretern des Betreuerkreises gewählt wurden, um die Einflüsse der unterschiedli-

chen Vorgaben auf den Verkehrsablauf zu untersuchen. Die Parameter der Verhaltensmodelle bewegen sich dabei zwischen den Grenzen des gesetzlich Zulässigen, des technisch Möglichen und des aus Fahrkomfortsicht Vertretbaren.

Neben dem konservativen Fahrverhalten, das eine defensive und eher reaktive Fahrweise abbildet und dem progressiven Fahrverhalten, das an die Grenzen der für automatisierte Fahrzeuge unterstellten technischen und praktischen Machbarkeit geht, wurde ein aus Sicht der Betreiber wünschenswertes Fahrverhalten definiert. Das wünschenswerte Verhalten zeichnet sich durch eine vorausschauende Fahrweise und ein moderates Abstandsverhalten zur Kompensation von Störungen im Verkehrsfluss aus.

Bei der Untersuchung der Auswirkungen des HAF-Anteils auf den Verkehrsverlauf und die SBA-Schaltung wurde dann jeweils ein Fahrverhaltensmodell für alle HAFs des Szenarios umgesetzt. Eine Durchmischung verschiedener Fahrverhaltensausprägungen hätte die Analyse der Auswirkungen des automatisierten Fahrens erschwert. Für jedes Fahrverhaltensmodell wurden jeweils 4 Ausstattungsstufen untersucht (10%-, 50%-, 90%- und 100%-Ausstattung).

Somit verhalten sich die HAFs in den Szenarien sehr homogen, da für die wesentlichen Kennwerte wie Wunschgeschwindigkeit, Wunschbeschleunigung und Abstandsverhalten die gleichen Parameter gelten. In der Realität werden verschiedene HAF Typen, deren Verhaltensparameter variieren und um gesetzliche Vorgaben schwanken, auf der Strecke unterwegs sein. Dadurch wird der Verkehrsablauf heterogener sein als in der Simulation dargestellt. Für die Übertragbarkeit der Ergebnisse besteht daher weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der Durchmischung mehrerer Fahrverhaltensmodelle der HAF.

Unter der Voraussetzung, dass nur ein HAF-Fahrverhalten auf der Strecke unterwegs ist, sind die Parameter des wünschenswerten Modells für eine Umsetzung empfehlenswert. Mit ihnen kann eine Steigerung der Kapazität bei einer 100 % Ausstattung erreicht werden, gleichzeitig fahren sie nicht so aggressiv wie die HAF des progressiven Modells, sodass der Anteil der kleinen Zeitlücken von 0-0,75 s kleiner ist. Dadurch ist der Verkehrsfluss hinsichtlich der Geschwindigkeit der Einzelfahrzeuge und deren Differenz etwas homogener, was in den Standardabweichungen zu sehen ist. Allerdings basie-

ren die Erkenntnisse auf der Parameterumsetzung des in AIMSUN implementierten GIPPS-Modells. Für eine Realisierung in der Realität müssen die Parameter in ein anderes Modell übertragen werden. Dabei können sich modellbedingt andere Ergebnisse ergeben, die ein Anpassen der Parameter erfordern.

Zusätzliche Effekte von technischen Erweiterungen, wie beispielsweise das kommunikationsgestützte Platooning, das insbesondere bei hohen Ausstattungsraten möglich wäre, wurden nicht berücksichtigt. Auch hier besteht zusätzlicher Forschungsbedarf. Für alle Fahrzeuge wurde aber ein kooperatives Verhalten sowohl für automatisierte Fahrzeuge untereinander als auch mit menschlichen Verkehrsteilnehmern umgesetzt. Dies bedingte bei hohen Ausstattungsraten und dem progressiven bzw. dem wünschenswerten Fahrverhaltensmodell zeitweise hohe Verkehrsdichten bei anhaltend hohen Geschwindigkeiten in den Szenarien. So konnte für beide Verhaltensmodelle eine Kapazitätserhöhung ermittelt werden (im progressiven Verhaltensmodell bis zu 800 Kfz/h im zweistreifigen Bereich). Gleichzeitig führt dies aber zu einer Erhöhung der Dichte auf den Strecken und zum Fahren mit sehr kurzen Abständen. Für einzelne Streckenabschnitte wurde kurzzeitig mittlere Bruttoweglücken von ca. 20 m bei Geschwindigkeiten von 80 km/h erfasst. Neben der rechtlichen Situation, die Abstände sind deutlich geringer als der vorgeschriebene halbe Tacho, ist selbst bei technischer Beherrschbarkeit der Situation zu hinterfragen, ob mit diesem Fahrverhalten nicht die Grenzen des Komfortempfindens überschritten werden.

Die Anwendung des konservativen Fahrverhaltens führte demgegenüber zu einer Reduktion der Streckenkapazität, sodass bereits bei einem Ausstattungsgrad von 50 % der Verkehr in der Simulation vollständig zusammenbrach und die Verkehrsnachfrage nicht mehr im Modell abgewickelt werden konnte.

Die Auswertung der Ergebnisse hat zusätzlich gezeigt, dass die Anordnung und Zuordnung der Mess- und Anzeigequerschnitte und somit die Zuordnung eines ermittelten Schaltbildes zu einem Anzeigequerschnitt einen großen Einfluss auf die Umsetzung einer Maßnahme selber und auf das Zusammenspiel der HAFs mit der SBA hat. Auf der A57 führte die bestehende Anordnung zur Sonder-situation der anhaltenden Harmonisierungsschaltung von 80 km/h, da die Fahrzeuge bereits die Ge-

schwindigkeitsbeschränkung umgesetzt haben, wenn sie den zugehörigen Messquerschnitt überfahren. Eine Auflösung der Schaltung durch Erreichen der Ausschaltswelle, die mit einer Geschwindigkeit von über 80 km/h (Originalparametrierung der Anlage) versorgt war, war somit bei hohen Ausstattungsraten nicht möglich. Eine Variation der SBA-Parameter, um eine bessere Reaktion der SBA auf die HAFs zu ermöglichen und lokale Besonderheiten im Zusammenspiel mit HAFs zu berücksichtigen, konnte aufgrund des begrenzten Zeit- und Ressourcenbudgets nicht durchgeführt werden, sollte aber in weiteren Forschungsvorhaben aufgegriffen und untersucht werden.

Aus diesen Gründen ist eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Strecken unter Einhaltung der genannten Randbedingungen möglich. Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass wesentlicher Forschungsbedarf in Bezug auf die in der Simulation abgebildeten Fahrverhaltensmodelle besteht. Mit der Auswahl der Modelle wird ab einem Ausstattungsgrad von 50 % bereits die Spanne der Ergebnisse deutlich. Die Verwendung des konservativen Fahrverhaltens führt zu einem Verkehrszusammenbruch, während mit dem progressiven und dem wünschenswerten Fahrverhalten ein nahezu störungsfreier Verkehrsfluss zu beobachten ist. Ab einer Ausstattung von 90 % stellen sich bei beiden Verhaltensmodellen Verkehrsdichten ein, die gegebenenfalls technisch beherrschbar sind, aber voraussichtlich nur begrenzt mit dem bestehenden Sicherheitsempfinden der Verkehrsteilnehmer vereinbar sind.

Für eine erfolgreiche Integration der HAFs wird das Sicherheitsempfinden des Nutzers einen hohen Einfluss haben. Daher werden am Anfang die HAFs ein eher defensives Fahrverhalten aufweisen müssen. Bei einer 50 % Ausstattung würden somit deutlich geringere Kapazitäten erreicht werden als es momentan bei menschlichen Fahrern der Fall ist. In der Untersuchung konnten bei einer Ausstattung von 10 % HAF keine Modellunterschiede und keine Unterschiede zu den menschlichen Fahrern ermittelt werden, daher wird bei sehr geringen Ausstattungsraten kein negativer Einfluss erwartet. Es wird davon ausgegangen, dass sich ein gewisser Gewöhnungseffekt einstellt und damit das Vertrauen der Fahrer in die Technologie steigt, wodurch das Fahrverhaltensmodell in Richtung des wünschenswerten Modells angepasst werden kann, um die positiven Effekte hinsichtlich des Verkehrsablaufs bei höheren Ausstattungen zu nutzen. Dabei muss si-

chergestellt werden, dass z. B. die geringeren Zeitlücken nur in Situationen auftreten, in denen es das Netz verkraften und keine Störungen im nachgeordneten Netz, z. B. an Anschlussstellen, entstehen.

Es besteht weiterer Forschungsbedarf insbesondere auf die Auswirkungen der Durchmischung verschiedener Fahrverhaltensmodelle und der Mischung verschiedener Automatisierungsstufen, wie sie aller Voraussicht nach in der Realität mit der schrittweisen Umsetzung und Einführung des automatisierten Fahrens auftreten werden.

8.2 Notwendige Erweiterungen der SBA-Steuerung und weitergehenden Maßnahmen

Ziel des Forschungsprojektes ist es, auszuarbeiten, welche Anpassungen an der Steuerung von SBA bezüglich der zukünftigen Szenarien von automatisiertem Fahren sinnvoll bzw. notwendig sein werden. Dabei wird vorausgesetzt, dass mit einer SBA im Wesentlichen die Harmonisierung des Verkehrsablaufs zur Stauvermeidung und die Warnung der Verkehrsteilnehmer vor gefährlichen Situationen erzielt werden soll.

Trotz der bei hohen Ausstattungsraten mit einheitlichem Fahrverhalten festzustellenden Homogenisierung des Verkehrsablaufs wird davon ausgegangen, dass der Harmonisierungswirkung der SBA auch mit automatisierten Fahrzeugen weiterhin eine wichtige Rolle zukommt. Zum einen werden über einen langen Zeitraum Mischszenarien eintreten in denen die unterschiedlichen Verhaltensweisen von automatisiert und nicht automatisiert fahrenden Verkehrsteilnehmern zu Störungen im Verkehrsablauf führen können. Zum anderen werden auch bei hohen Ausstattungsraten für automatisierte Fahrzeuge keine idealisierten Verhältnisse mit einheitlichem Fahrverhalten, wie es in der Simulation der Fall war, eintreten. Auch die Verhaltensparameter der automatisierten Fahrzeuge werden in gewissen Grenzen variieren, sodass ebenfalls ein Harmonisierungspotenzial durch SBA vorhanden ist. Darüber hinaus kann den zukünftigen SBA auch die gezielte Beeinflussung der automatisierten Fahrzeuge zukommen, um die negativen Auswirkungen von eingetretenen Störungssituation zu verringern und beispielsweise eine zügigere Stauausfahrt zu unterstützen oder kapazitätsbedingte Störungen durch Verminderung oder zeitliche Verzögerung des Zuflusses zu entschärfen.

Im Folgenden werden aufbauend auf den Simulationsergebnissen und auf dem Austausch mit den Betreibern von SBA mögliche Erweiterungen der SBA-Steuerung und darüberhinausgehende Maßnahmen aufgeführt. Die erwarteten Wirkungen und der mit den Erweiterungen verbundene Umsetzungsaufwand wurden ebenfalls mit den Betreibern diskutiert und gemeinsam zusammengestellt.

1a Prüfung und Optimierung der MQ/AQ-Zuordnung und

1b Anpassung der Ein- und Ausschalt-schwellwerte

Das untersuchte Steuerungsverfahren nach MARZ 99 basiert auf Verkehrsdaten, die über lokale Messquerschnitte erfasst werden. Die Messquerschnitte sind je nach Steuerungsprogramm bestimmten Anzeigequerschnitten zugeordnet. Die MARZ 99 Steuerung sieht Schwellwerte für die an den Messquerschnitten erfassten Kennwerte, die mittlere Geschwindigkeit, die Dichte und die Bemessungsverkehrsstärke als Ein- und Ausschaltkriterium für z. B. eine Harmonisierungsschaltung vor. Dies kann, wie in der Simulation für die A57 erfolgt, in Kombination mit einer ungünstigen MQ/AQ Zuordnung zu einer ausbleibenden Deaktivierung einer Schaltung bei einem hohen Ausstattungsgrad mit HAF führen.

Aus diesem Grund ist mit zunehmendem HAF-Anteil die MQ/AQ Zuordnung zu prüfen und ggf. sind Anpassungen vorzunehmen. Dabei ist zu beachten, dass sich HAFs in der Simulation und voraussichtlich auch in der Realität so verhalten, dass die zulässige Höchstgeschwindigkeit eines Streckenabschnitts unbedingt eingehalten wird. Eine sich im Streckenverlauf ändernde Höchstgeschwindigkeit wird unmittelbar ab dem Standort des Anzeigequerschnitts, der diese anzeigt, eingehalten.

Die Anpassung der MQ/AQ Zuordnung kann i. d. R. vom Betreiber selber vorgenommen werden. Der Aufwand für eine solche Anpassung wird als gering bis mittel angesehen. Je nach System ist die Zuordnung dabei unterschiedlich tief in der Konfiguration hinterlegt und demnach einfacher oder weniger einfach veränderbar.

Bei einem höheren HAF-Anteil ist mindestens eine Anpassung der Geschwindigkeitsschwellwerte vorzunehmen. Aufgrund der Kapazitätserhöhung, die bei einem hohen Ausstattungsgrad erreicht werden kann, sollten neben der Geschwindigkeit auch die

weiteren Steuerparameter insbesondere die Bemessungsverkehrsstärke Q_B kritisch betrachtet werden.

Bezogen auf die A57 ist die Ausschaltsschwelle der mittleren Geschwindigkeit zu verringern, um die Auflösung der 80 km/h Harmonisierungsschaltung durch automatisierte Fahrzeuge zu ermöglichen. Mit einem Absenken der Ausschaltsschwellen sind aber auch die Einschaltsschwellen zu verringern, da ansonsten die Gefahr von instabilen Schaltzuständen besteht. Niedrigere Ein- und Ausschaltwerte bedingen aber auch eine trägere und damit zeitlich verzögerte Reaktion der SBA auf Störungen im Verkehrsablauf. Aus diesem Grund sollte bereits jetzt über Alternativen zur schwellwertbasierten Steuerung nachgedacht werden, um die positiven Effekte der SBA auf den Verkehrsablauf auch mit HAF nutzen zu können.

Der Aufwand, der mit einer Anpassung der Ein- und Ausschaltsschwellwerte verbunden ist, ist vergleichsweise gering und kann vom Bediener über die Benutzeroberfläche vorgenommen werden.

2 Anwendung neuer Steuerungsalgorithmen

Anstelle der schwellwertbasierten Verfahren sind neue Steuerungsverfahren zu entwickeln, die dynamischer auf Ereignisse in Verkehrskollektiven mit einem wesentlichen Anteil von HAF reagieren können, bzw. sogar prädiktiv den Verkehr beeinflussen, um den Verkehrsablauf in Richtung Systemoptimum zu verbessern. HAF werden ohne eine externe Beeinflussung das Nutzeroptimum anstreben, können aber durch gezielte Maßnahmen zur Systemoptimierung beitragen. Solche Steuerungsverfahren können beispielsweise regelbasiert oder Fuzzy basiert sein. Eine weitere Möglichkeit besteht in Verfahren mit einer zeitlich begrenzten Anzeige der Schaltbilder. Es zeigt sich, dass Steuerungsverfahren aus dem Jahr 1999 nicht oder nur bedingt geeignet sind, verkehrliche Szenarien zu steuern, die je nach Entwicklungsgeschwindigkeit in den kommenden 5 bis 20 Jahren auftreten können.

Mit dem MARZ 2018, das eine differenziertere Situationserkennung und Maßnahmenauswahl definiert und mit dem Situationsabgleich und Maßnahmenabgleich eine konsolidierte Maßnahmenumsetzung ermöglicht, sind wesentliche Voraussetzungen für die Anwendung neuer Steuerungsalgorithmen geschaffen. Das MARZ 2018 ermöglicht zudem die Integration kooperativer Systeme in der Situationserkennung und der Maßnahmenumsetzung.

Die Anwendung neuer Steuerungsalgorithmen ist auch aus Sicht der Betreiber mit einem hohen Aufwand verbunden, da die Steuerungsverfahren entwickelt, erprobt und standardisiert werden müssen.

3 Nutzung fahrzeugseitig generierter Daten

Zukünftig werden automatisierte und vernetzte Fahrzeuge auch Verkehrsdaten bereitstellen können, die infrastrukturseitig zur Steuerung genutzt werden können. Dabei handelt es sich zum einen um kontinuierlich bereitzustellende Positionsmeldungen (CAM im 10 Hz Takt) und zum anderen um Ereignismeldungen (DENM), die entsprechend ereignisbasiert übertragen werden. Die Daten können auf Seiten der Unterzentrale mit den Daten der statischen Detektion fusioniert werden und erlauben eine frühere und genauere Lokalisierung von Störungen, wenn ein ausreichender Durchsetzungsgrad vorhanden ist. Die Positionsbestimmung der Störungsmeldung sollte für eine genaue Warnung jedoch spurgenaue sein. Bei hohen Ausstattungsraten kann die Nutzung der fahrzeugseitig generierten Daten auch als Ersatz für die statische Detektion dienen. Zuverlässige Aussagen über die Verkehrsmenge sind aber nur über eine Vollerfassung wie die statische Detektion möglich. Die derzeitigen verwendeten Steuerungsalgorithmen benötigen die Verkehrsmenge und die Verkehrsdichte zu Maßnahmengenerierung.

Das MARZ 2018 sieht beispielsweise die Verkehrslageermittlung aus streckenbezogenen Daten vor, macht hier aber noch keine Vorgaben. Mit einem hohen Durchsetzungsgrad von Fahrzeugen, die kontinuierlich Daten bereitstellen, ist die Entwicklung neuer Steuerungsansätze, die auf der Fusion von Daten der statischen Detektion der Fahrzeugdaten beruhen, möglich.

Die Umsetzung ist mit einem hohen Aufwand verbunden, da zum einen die Datenübertragung standardisiert werden muss und auch die Steuerungsverfahren entwickelt, erprobt und standardisiert werden müssen.

4 Übermittlung von Fahrstrategien für ausgewählte Verkehrssituationen

Zusätzlich kann mit der Auswahl gezielter Fahrstrategien für automatisierte Fahrzeuge auf ausgewählte und erfasste Verkehrssituationen reagiert werden, in denen HAF mehr Unterstützung brauchen, um die Situationen effizient durchfahren zu können.

Hier wird in Zukunft ein großer Nutzen der SBA liegen. So könnten beispielweise automatisierte Fahrzeuge frühzeitig vor der Zufahrt zu aktuell hochbelasteten Streckenabschnitten oder Verflechtungsstrecken von der SBA eine Fahrstrategie übermittelt bekommen, die eine energieeffiziente Zufahrt in den jeweiligen Streckenabschnitt bewirkt und damit ggfs. zur Entzerrung von kurzfristigen Spitzen führt. Ein weiteres Beispiel ist die zügige Stauausfahrt, die von der SBA als Fahrstrategie übermittelt wird, sofern das Fahrzeug das Stauereignis passiert hat. Weitere Vorteile aus Betreibersicht werden in der Vermeidung der Gafferstaus, der Bildung von Rettungsgassen, im Vorbeileiten an Unfallstellen oder Baustellen, wenn ein spurgetreues Fahren nicht mehr möglich ist, und auch in Situationen, in denen die Streckenführung schwierig ist, gesehen. Hierfür muss jedoch erst die optimale Strategie für die einzelne Situation ermittelt werden. Hierzu ist weitere Forschung nötig, um die Auswirkungen verschiedener HAF-Verhaltensweise in bestimmten Situationen zu bestimmen, die Übertragbarkeit auf verschiedene Streckenbedingungen abzuleiten und das Zusammenwirken mit menschlichen Fahrern zu erfassen.

Die zu übermittelnde Fahrstrategie kann beispielsweise Empfehlungen und Vorgaben zum zu wählenden Fahrstreifen, zum Beschleunigungs- und Verzögerungsverhalten, zur Geschwindigkeitswahl oder zum Abstandsverhalten enthalten.

Im Rahmen der Untersuchung wurde der Verkehrsablauf im gesamten Streckenbereich über makroskopische und auch mikroskopische Kenngrößen analysiert. Eine detaillierte Auswahl von Verkehrssituationen wie die Stauausfahrt konnte aus den Daten nicht extrahiert und als eigenes Szenario untersucht werden. Genau dies wäre aber notwendig, um gezielte Beeinflussungsmaßnahmen zu entwickeln.

Zudem ist zu klären, inwieweit die Übermittlung von Fahrstrategien rechtlich möglich ist. Sofern konkrete Fahrverhaltensparameter übermittelt werden, die vom Fahrzeug umgesetzt werden sollen, besteht die Gefahr, dass Haftungsfragen im Falle von Unfällen relevant werden. Als Alternative könnten die Strategien als Empfehlung übermittelt werden, deren Umsetzung und Absicherung vom Fahrzeug erst übernommen werden muss. Allerdings besteht dadurch die Gefahr, dass die Strategien nur übermittelt werden, aber nicht übernommen werden, wodurch das Optimum des Verkehrsablaufs wahrscheinlich nicht erreicht werden wird.

5 Festlegung von Anforderungen an das Fahrverhalten automatisierter Fahrzeuge

Da je nach gewählten Fahrverhaltensparametern für die HAF sowohl Verbesserungen, wie die Vermeidung von Stauereignissen, die Erhöhung der Streckenkapazität und die Verringerung der Reisezeiten wie beim untersuchten progressiven und wünschenswerten Modell, als auch Verschlechterungen wie beim konservativen Modell hinsichtlich der Kapazität zu beobachten sind, sollte die Möglichkeit in Betracht gezogen werden, Vorgaben für HAF-Parameter wie das Geschwindigkeitsverhalten, Beschleunigungsverhalten und das Abstandsverhalten zu definieren, die im Rahmen der Zulassung der Fahrzeuge eingehalten werden müssen. Aufgrund der unterschiedlichen Wirkungen bei un-

terschiedlichen Ausstattungsraten sollten die Mindestanforderungen mit steigender Ausstattung angepasst werden.

Von Seiten der Betreiber kann die Erarbeitung von Vorgaben für Fahrverhaltensparameter von HAF durch Mitarbeit in Gremien unterstützt werden. Der Aufwand aus Betreibersicht wird eher gering eingeschätzt. Da allerdings die Vorgabe der Fahrverhaltensparameter gesetzlich geregelt werden müsste, ist der Gesamtaufwand und die zeitliche Dauer zur Umsetzung als hoch einzustufen.

In Tabelle 8-1 sind abschließend die möglichen Maßnahmen mit ihrer erwarteten Wirkung und dem erwarteten Umsetzungsaufwand aufgeführt.

	Maßnahme auf Seite der SBA oder HAF	Erwartete Wirkung	Erwarteter Umsetzungsaufwand
1a	Prüfung und Optimierung der AQ/MQ-Zuordnung	Vermeidung von Fehlschaltungen oder Verharren in einzelnen Schaltungen	Gering – mittel, je nach Umsetzung in Zentral.
1b	Anpassung der Ein- und Ausschaltenschwellwerte (Geschwindigkeit, QB, Dichte)	Auflösen von Harmonisierungsschaltungen möglich Zeitlich verzögerte Reaktion der SBA bei niedrigeren Schwellwerten, da mit der Absenkung der Ausschaltenschwellen auch die Einschaltenschwellen gesenkt werden müssen	Gering
2	Anderer Steuerungsalgorithmus (nicht schwellwertbasiert)	Präventiver und im Störfall aktivierender Algorithmus, der situative Fahrstrategien anordnet Frühere Reaktion auf Verkehrszustand als bei schwellwertbasierten Verfahren möglich Einbindung von kooperativen Systemen in Situationserfassung und Maßnahmenauswahl möglich	Mittel – groß Neue Verfahren müssen konzipiert, getestet und Softwaretechnisch umgesetzt werden.
3	Nutzung von fahrzeugseitig generierten Daten in der Steuerung	Zeitlich frühere Detektion von Ereignissen Genauere Lokalisierung von Ereignissen bei spurgenaue Meldung Ergänzung der lokaler Detektion, bei hohen Ausstattungsraten auch Ersatz der statischen Detektion (Ersatz der statischen Detektion nur mit neuen Steuerungsalgorithmen möglich, die keine Vollerfassung voraussetzen)	Groß MARZ 2018 sieht die Verkehrslageermittlung aus streckenbezogenen Daten vor, die Umsetzung muss aber noch definiert werden. Standardisierung der Datenübertragung und Nutzung nötig.
4	Übermittlung von Fahrstrategien für ausgewählte Verkehrssituationen: • Zufahrt auf hochbelastete Abschnitte/Verflechtungstrecken • Stauausfahrt • Gafferstau • Rettungsgassen • Unfallstellen wenn Spurgetreues Fahren nicht mehr möglich ist	Effizienteres Nutzen der Kapazität (Systemoptimum) Weniger gefährliche Situationen Weniger Unfälle/Zusammenbrüche Sicheres Vorbeileiten an gefährlichen Situationen	Groß Optimale Strategie/Verhalten in den einzelnen Situationen muss erst ermittelt und planerisch versorgt werden. Rechtliche Situation muss Übermittlung von Fahrstrategien gewährleisten. Rechtliche Situation der Haftung ist zu klären. Strategien können als Empfehlung gesehen werden, Haftung und Übernahme der Strategie obliegt dem HAF.
5	Festlegung von Anforderungen an das Fahrverhalten automatisierter Fahrzeuge	Vermeidung von z. B. Kapazitätsminderungen	Mittel Rechtliche Umsetzung über Zulassung und STVO

Tab. 8-1: Maßnahmen für SBA und HAF

8.3 Anforderung an die automatisierten Fahrzeuge

Für die automatisierten Fahrzeuge wurden die folgenden Anforderungen definiert und im Zuge der Maßnahmenermittlung ergänzt. In der Simulation hat sich das wünschenswerte Modell unter Berücksichtigung des Komfortgedankens und des Verkehrsablaufs als zielführend erwiesen. Allerdings können bei der Übertragung in ein anderes Modell

Parameteränderungen nötig sein, um die gleichen Ergebnisse zu erhalten, da der Einfluss eines Parameters unterschiedlich je Modell sein kann. Es wird erwartet, dass HAF mit verschiedenen Modellen ausgestattet sein werden. Tabelle 8-2 umfasst die Anforderungen, die bereits mit dem wünschenswerten Fahrverhaltensmodell definiert wurden, erweitert um Anforderungen, die sich aus den Erweiterungen der SBA-Steuerung und den weitergehende Maßnahmen ergeben.

Nr.	Anforderung
A1	Zuverlässige Erkennung verkehrsrechtlicher Vorgaben und Anordnungen: Sämtliche verkehrsrechtlichen Vorgaben und Anordnungen müssen fahrzeugseitig zuverlässig wahrgenommen werden. Auch die dynamischen Zustände von Wechselverkehrszeichen müssen zuverlässig erkannt werden können.
A2	Entgegennahme standardisierter Anzeigenübertragungen im Fahrzeug: Die Fahrzeuge empfangen die standardisierten Anzeigen der physikalischen und virtuellen Anzeigequerschnitte.
A3	Berücksichtigung und Einhaltung verkehrsrechtlicher Vorgaben und Anordnungen: Grundsätzlich sind sämtliche verkehrsrechtlichen Vorgaben und Anordnungen im automatisierten Fahrprozess zu berücksichtigen und einzuhalten.
A4	Sichere Geschwindigkeits- und Abstandwahl: Im Rahmen des durch A3 gegebenen Handlungsspielraums muss das Fahrverhalten so gewählt werden, dass stets ein sicheres Anhalten möglich ist.
A5	Vermeidung einer Behinderung des Verkehrs: Im Rahmen des durch A3 und A4 gegebenen Handlungsspielraums muss das Fahrverhalten so gewählt werden, dass andere Verkehrsteilnehmer nicht mehr als nach den Umständen unvermeidbar behindert oder belästigt werden (vgl. § 1, Abs. 2 StVO).
A6	Kooperation mit anderen automatisierten Fahrzeugen: Automatisierte Fahrzeuge kooperieren und kommunizieren miteinander, sodass bei der Fahrzeugfolge zwischen automatisierten Fahrzeugen deutlich geringere Abstände möglich sind als zwischen menschlichen Fahrern. Auf diese Weise können bei höheren Ausstattungsgraden negative Auswirkungen wie die Verringerung der Streckenkapazität mind. vermindert werden.
A7	Kooperation mit menschlichen Fahrern: Das automatisierte Fahrverhalten sollte Kooperation zwischen Verkehrsteilnehmern in solchen Situationen ermöglichen, in denen dies auch im heutigen Verkehrsgeschehen praktiziert und erwartet wird (insbesondere Fahrstreifenwechsel). Die Kooperation mit menschlichen Fahrern kann zusätzlich mittels übertragener Fahrstrategien verbessert werden.
A8	Vermeidung von subj. Gefährdung/Bedrängen: Andere Verkehrsteilnehmer dürfen sich durch das Fahrverhalten automatisierter Fahrzeuge nicht bedrängt und zu abrupten Manövern veranlasst fühlen (z. B. durch geringen Abstand).
A9	Vorhersehbarkeit und Nachvollziehbarkeit: Das Fahrverhalten sollte für andere Verkehrsteilnehmer (insbesondere nicht automatisierte) vorhersehbar und nachvollziehbar sein.
A10	Vorausschauende, harmonische Fahrweise: Das Fahrverhalten automatisierter Fahrzeuge sollte insgesamt möglichst homogen sein, d. h. es sollte eine vorausschauende Fahrweise angestrebt werden, die durch möglichst wenige Fahrstreifenwechsel oder stärkere Brems- und Beschleunigungsmanöver gekennzeichnet ist. Das Fahrverhalten sollte somit zu einer Harmonisierung des Verkehrsflusses und zu einer Dämpfung von Stauwellen beitragen.
A11	Entgegennahme und Umsetzung von Fahrstrategieempfehlungen: Die HAF nehmen Empfehlungen und Vorgaben zum zu wählenden Fahrstreifen, zum Beschleunigungs- und Verzögerungsverhalten, zur Geschwindigkeitswahl oder zum Abstandsverhalten entgegen und setzen die Vorgaben um.
A12	Bereitstellung fahrzeugseitig erfasster Daten: Die HAF stellen fahrzeugseitig erfasste Daten über standardisierte Übertragungswege in standardisierten Formaten (CAM, DENM) der SBA-Steuerung zur Verfügung.

Tab. 8-2: Anforderungen an eine automatisierte Fahrzeugsteuerung aus Betreibersicht

9 Handlungsempfehlungen, Road Map

Im folgenden Kapitel werden zunächst die Handlungsempfehlungen, die sich aus den einzelnen Maßnahmen für den Betrieb und die Steuerung von SBA und für die automatisierte Fahrzeugsteuerung ergeben, ermittelt. Anschließend werden die Handlungsempfehlungen in einen zeitlichen Bezug gebracht und offene Forschungsfragen beschrieben.

9.1 Handlungsempfehlungen aus Maßnahmen für SBA

9.1.1 Prüfung und Optimierung der AQ/MQ-Zuordnung

Die AQ/MQ-Zuordnung wird als Qualitätssicherungsaufgabe gesehen. Da sich HAF genau an die zulässige Höchstgeschwindigkeit halten, kann dies je nach Schwellwert zu einem Verharren in einer Schaltung führen, wenn der MQ hinter dem zugeordneten AQ liegt. Aus diesem Grund sollten mit zunehmendem HAF-Anteil die Zuordnung überprüft und ggf. angepasst werden.

9.1.2 Anpassung der Ein- und Ausschaltsschwellwerte

Die Ein- und Ausschaltwerte für die einzelnen Programme können vom Betreiber angepasst werden. Die Schwellwerte sollten überprüft werden und, wenn die Ausschaltgeschwindigkeit höher als die zulässige Geschwindigkeit ist, mit zunehmenden HAF-Anteil angepasst werden. Die maximale Kapazität unter Berücksichtigung der verschiedenen Ausstattungsarten und dem Zusammenspiel verschiedener Fahrverhaltensmodelle muss im Rahmen weiterer Forschung ermittelt werden. Abhängig davon ist es empfehlenswert, die Schwellwerte für die Bemessungsverkehrsstärke anzupassen. Ebenso muss vor einer Anpassung der Schwellwerte für die Dichte berücksichtigt werden, welche geschwindigkeitsabhängigen Fahrzeugabstände rechtlich zulässig und wünschenswert sind.

9.1.3 Entwicklung neuer Steuerungsalgorithmen (nicht schwellwertbasiert)

Die Entwicklung und Umsetzung neuer Steuerungsalgorithmen, die in der Situationserkennung, der

Maßnahmenauswahl und dem Maßnahmenabgleich besser auf HAF abgestimmt sind, ist als weitere Forschungsaufgabe anzusehen. Die Betreiber sollten in den entsprechenden Gremien mitwirken, um ihre Anforderungen einzubringen und in die Spezifikation einfließen zu lassen.

Nach Möglichkeiten sollten neue Steuerungsverfahren dabei eine Einbindung von kooperativen Systemen in die Situationserfassung beinhalten. Das MARZ 2018, das die Einbindung von kooperativen Systemen grundsätzlich berücksichtigt, kann damit als Grundlage für die Spezifikation genutzt werden.

9.1.4 Nutzung von fahrzeugseitig generierten Daten

Die Nutzung von Fahrzeugdaten in der Steuerung wird seit einiger Zeit vorangetrieben und ist auch im MARZ 18 vermerkt. Allerdings muss die Art und Weise der Nutzung erst definiert werden.

Betreiber, SBA Hersteller und Vertreter der Wissenschaft sollten hier gemeinsam Verfahren spezifizieren, testen und umsetzen, die auf Basis der bestehenden statischen Detektion und der fahrzeugseitigen Daten eine verbesserte Situationsanalyse ermöglichen, die wiederum an alle Fahrzeuge übertragen wird. HAF können mit diesen Informationen für die Situation angepasste Fahrstrategien wählen. Zudem kann auf Basis der verbesserten Situationsanalyse auch eine verbesserte Maßnahmenauswahl auf Betreiberseite erfolgen. Die Verfahren werden zunächst nur eine geringe Anzahl an Fahrzeugmeldungen verarbeiten müssen. Mit zunehmender Durchdringung wird das Datenvolumen und aber auch der daraus zu generierende Informationsgehalt steigen.

Um die Daten auf SBA Seite verfügbar zu haben, sind die mit SBA ausgestatteten Streckenabschnitte entweder mit ITS-G5 Kommunikation auszustatten oder die Möglichkeit der Mobilfunkkommunikation mit den Fahrzeugen (ggf. über das Backend) mit den Fahrzeugherstellern abzustimmen.

9.1.5 Bereitstellung von Fahrstrategien

Als Erweiterungsmaßnahme der SBA sollen in bestimmten Verkehrssituationen optimierte Strategien in das Fahrzeug übermittelt werden, mittels derer das Fahrverhalten der automatisierten Fahrzeuge

und ggf. der menschlichen Fahrer gezielt auf die Situation angepasst wird und damit Störungen im Verkehrsablauf vermieden oder vermindert werden können.

Die Strategien sind auf Basis von Simulation und Feldtests im engen Dialog zwischen Betreibern und Fahrzeugherstellern zu definieren.

Wenn die Übermittlung der Strategien als Maßnahme in der SBA Steuerung umgesetzt wird, ist die Berücksichtigung der Strategien auf Fahrzeugseite entscheidend für die Wirksamkeit der Steuerung. Daher sollte die Übernahme der Fahrstrategie rechtlich genauso bindend sein wie die Befolgung einer SBA-Anzeige.

Von Betreiberseite sollte in den zuständigen Gremien erwirkt werden, dass die Übertragung von Fahrstrategien als mögliche Verkehrsbeeinflussungsmaßnahme in die Regelwerke und Merkblätter (z. B. MARZ) aufgenommen wird.

9.2 Handlungsempfehlungen für HAF – Rahmenbedingung für automatisierte FZ-Steuerung

9.2.1 Anforderungen an das Fahrverhalten

Um einen sicheren und möglichst störungsfreien bzw. störungsarmen Verkehrsfluss mit der Nutzung von automatisierten Fahrzeugen zu erreichen, sind Mindestanforderungen für das Fahrverhalten der automatisierten Fahrzeuge zu definieren. Dies umfasst das Geschwindigkeitsverhalten, das Beschleunigungsverhalten und maßgeblich das Abstandsverhalten.

Dabei darf das Sicherheits- und Komfortempfinden des Fahrers, das u. U. mit dem Ausreizen der technischen Möglichkeiten nicht erfüllt wird, nicht vernachlässigt werden.

Da erwartet wird, dass die Fahrzeuge mit unterschiedlichen Modellen fahren werden, sollten die Parameteranforderungen das gewünschte Fahrverhalten möglichst modellunabhängig und allgemein beschreiben. Anhaltswerte für mögliche Vorgaben liegen mit dem definierten wünschenswerten Fahrverhaltensmodell vor. Allerdings wurden die Werte für das in AIMSUN angewendete Fahrzeugfolgemo- dell nach GIPPS definiert. Da das GIPPS-Modell voraussichtlich nicht exakt die zukünftigen Fahrver-

halten der HAF verschiedener Hersteller abbildet, ist eine Übertragung der angesetzten Werte nicht zulässig, sondern dient lediglich dazu, Anhaltspunkte bzw. einen Rahmen zu erstellen. In wieweit die angesetzten Werte auch für reale Fahrzeuge anzuwenden sind, bedarf noch umfangreicher Forschung.

Von Betreiberseite sollte gezielt an der Erarbeitung von Empfehlungen und Vorgaben zum Fahrverhalten in den entsprechenden Gremien mitgearbeitet werden.

9.2.2 Standardisierte Datenübertragung

Bei der Datenübertragung zwischen Infrastruktur und Fahrzeug ist auf die Verwendung von Standards zu achten. Mit den ETSI Standards stehen Datenformate zur Verfügung die zum einen für die fahrzeugseitige Bereitstellung (CAM, DENM) als auch für die Übertragung von Warnmeldungen und Schaltbilder von Seiten der Infrastruktur genutzt werden können (DENM, IVI).

Für die Übermittlung der Fahrstrategien ist zu prüfen, ob die bestehenden Formate ausreichen. Von Betreiberseite sollte gemeinsam mit den Fahrzeugherstellern auch hier auf eine Standardisierung hingearbeitet werden, um Lösungen anzubieten, die herstellerübergreifend genutzt werden können.

9.2.3 Fahrzeugseitige Umsetzung von Warnmeldungen in Strategien

Sofern unabhängig von physikalischen Anzeigequerschnitten Warnmeldungen an Fahrzeuge übertragen werden, wie z. B. einer genauen Störungslage, müssen diese Informationen fahrzeugseitig als Fahrstrategie umgesetzt werden.

Diese Umsetzung sollte nach Möglichkeit einheitlich über die automatisierten Fahrzeuge erfolgen, um eine effektive Verkehrsbeeinflussung zu ermöglichen. Hier müssen von Seiten der Behörden unter Mitarbeit der Betreiber Vorgaben erarbeitet werden, wie die fahrzeugseitige Umsetzung erfolgen soll. Es sind Vorgaben für die Fahrzeugseite zur erstellen, die nach Möglichkeit verbindlich umzusetzen sind.

9.3 Sonstige Handlungsempfehlungen

9.3.1 Klärung der rechtlichen Situation

Bis zur Einführung und Realisierung aller Maßnahmen muss die rechtliche Situation hinsichtlich der Übertragbarkeit von Informationen und Strategien geklärt sein. Es muss definiert werden, ob und in welchem Umfang Informationen, Empfehlungen und Strategien von SBA-Betreibern in HAF übertragen werden können. Zusätzlich muss für die Betreiber ersichtlich sein, wie die Fahrzeuge mit dieser Information umgehen.

Es ist zu regeln, dass übertragene Strategien als rechtlich verpflichtend ähnlich einer angezeigten Geschwindigkeitsbegrenzung zu beachten sind.

Zudem sind Festlegungen zu Haftungsfragen zu treffen, für den Fall, dass während oder infolge der fahrzeugseitiger Umsetzung von übermittelten Fahrstrategien ein Unfall eintritt.

Um sicheren und störungsarmen Verkehrsfluss bei höheren Durchsetzungsgraden von automatisierten Fahrzeugen zu erreichen, wurde die Maßnahme, Mindestanforderungen an das Fahrverhalten der HAF zu stellen, definiert. Mit diesem Fahrverhalten können gleichzeitig aber auch Zeitlücken und Abstände entstehen, die kleiner sind als durch die StVO erlaubt. Da HAF aber eine geringere Reaktionszeit und ein anderes Bremsverhalten als menschliche Fahrer haben, ist zu erwarten, dass sie auch bei niedrigeren Abständen sicher anhalten können.

Betreiber, Fahrzeughersteller und Gesetzgeber müssen die gesetzlichen Vorgaben schaffen, dass automatisierte Fahrzeuge das Streckennetz sicher

nutzen und gleichzeitig die Kapazitäten bei gleichen Randbedingungen nicht verringern.

9.4 Zeitliche Umsetzbarkeit

Die Umsetzbarkeit hängt sehr stark vom Anteil der HAF am Gesamtverkehr ab. Die 100 % Ausstattung mit HAF sowohl in der Pkw-Klasse als auch in der Lkw-Klasse liegt in ferner Zukunft. Daher liegt der Fokus auf der effizienten Abwicklung von gemischten Fahrzeugkollektiven. Hierfür werden 4 Phasen definiert, deren zeitliches Eintreten von vielen Rahmenbedingungen abhängt:

Phase 1: vorbereitende Phase

Phase 2: geringe Ausstattung (1-30 %)

Phase 3: mittlere Ausstattung (30-70 %)

Phase 4: hohe Ausstattung (> 70 %)

In Tabelle 9-1 werden die Handlungsempfehlungen den entsprechenden Phasen zugeordnet.

9.5 Forschungsbedarf

Mit der gewählten Vorgehensweise und den verwendeten Tools konnte neben den gewonnenen Erkenntnissen weiterer Forschungsbedarf identifiziert werden.

Einfluss von HAF auf die Szenarien Baustelle und Lkw-Überholverbot

Mit der Anbindung einer virtuellen UZ, parametrisiert mit den jeweiligen Steuerungsparametern der Anlagen und dem angebundenen Wirkmodell konnte

	Handlungsempfehlung zur Umsetzung der Maßnahmen
Phase 1	Definition der zukünftigen Rolle, Aufgabe und Zielsetzung von SBA Überprüfung der MQ/AQ Zuordnung; Anpassung der Schwellwerte Weitere Forschung hinsichtlich Kapazität im Zusammenspiel mit verschiedenen HAF Modellen und Ausstattungs-raten (Umfeldbedingungen, Engstellen etc.) Definition der Anforderungen an das Fahrverhalten Klärung der rechtlichen Situation Entwicklung neuer Steuerungsalgorithmen
Phase 2	Definition und Testen von Verfahren zur Nutzung von Fahrzeugdaten in der Steuerung Übertragung von Verkehrssituationen und Testen von Fahrstrategien für unterschiedliche Verkehrssituationen
Phase 3	Nutzung von Fahrzeugdaten in Steuerungsverfahren Übermittlung von Fahrstrategien an HAF (und konventionelle Fahrzeuge) und Umsetzung im Fahrzeug
Phase 4	Umsetzung neuer Steuerungsalgorithmen

Tab. 9-1: Zeitliche Umsetzbarkeit der Maßnahmen

eine SBA mit MARZ 99 Steuerungsmodell von der Situationsanalyse über die Maßnahmenaktivierung (Harmonisierungsschaltung, Stauschaltung) und deren Wirkungen auf den Verkehr vollständig abgebildet werden. Mit dem verwendeten Simulationstool AIMSUN war aufgrund modellbedingter Einschränkungen eine Untersuchung der Maßnahmen Lkw-Überholverbot und Baustellenschaltung nur unzureichend möglich, sodass im Rahmen des Forschungsvorhabens davon Abstand genommen wurde. Da beide Maßnahmen im Bereich von SBA häufig auftretende Ereignisse darstellen, ist auch für diese Maßnahmen der Einfluss von automatisierten Fahrzeugen zu klären. Dazu ist zunächst ein geeignetes Simulationstool zu entwickeln.

Einfluss des Lkw-Anteils

In den betrachteten Verkehrsbelastungsszenarien lag der Lkw-Anteil auf beiden Strecken zwischen 12 und 15 %. Für Lkw wurde in den verschiedenen Ausstattungsszenarien jeweils der gleiche Ausstattungsgrad mit HAF angesetzt wie für Pkw (0 %, 10 %, 50 %, 90 % und 100 %). Da aus derzeitiger Sicht durchaus die Möglichkeit besteht, dass die Marktdurchdringung automatisierter Fahrfunktionen für Pkw und Lkw nicht im gleichen Maße und Zeitrahmen verläuft, besteht Forschungsbedarf, welche Auswirkungen verschiedene Lkw-Anteile mit im Vergleich zu Pkw abweichenden Ausstattungsgraden haben. Ein hoher Lkw-Anteil mit gleichzeitig hohem Ausrüstungsgrad an automatisierten Fahrzeugen könnte beispielsweise zu einem Lkw-Kollektiv führen, das mit geringen Abständen bei gleichzeitiger strikter Einhaltung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit fährt. Der Einfluss des Lkw-Anteils und des Ausstattungsgrades mit HAF-Funktionalitäten ist zu untersuchen.

Durchmischung unterschiedlicher Fahrverhaltensmodelle

Mit der Umsetzung von einheitlichen Fahrverhaltensmodellen für HAF in der Simulation stellten sich ab einem Ausstattungsgrad von 50 % sehr gegensätzliche Ergebnisse für das konservative (Verkehrszusammenbruch) und das progressive bzw. das wünschenswerte Fahrverhalten (Kapazitätssteigerung) ein. Mit der Einführung von automatisiertem Fahren werden voraussichtlich Fahrverhalten umgesetzt, die in gewissen Bandbreiten schwanken. Es besteht Forschungsbedarf dahingehend, dass die Auswirkungen des automatisierten

Fahrens und das Zusammenspiel mit der SBA-Steuerung für die Durchmischung unterschiedlicher Verhaltensmodelle analysiert werden. Gegebenenfalls führt die Durchmischung verschiedener Fahrverhaltensmodelle zu einem Ergebnis zwischen den beobachteten Extremen Verkehrszusammenbruch und Kapazitätssteigerung, sodass kaum Änderungen gegenüber dem Nullfall (100 % menschliche Fahrer) bestehen. Gleichzeitig muss mit zukünftigen SBA-Steuerungen und der Übertragung von Fahrstrategien die Möglichkeit bestehen, das Fahrverhalten der automatisierten Fahrzeuge so zu beeinflussen, dass der Verkehrsablauf in Richtung Systemoptimum verbessert wird.

Neue Steuerungsverfahren (nicht schwellwertbasiert)

Die Simulation hat gezeigt, dass das bestehende schwellwertbasierte MARZ 99 Verfahren nicht geeignet ist, um bei höheren HAF-Anteilen frühzeitig auf Störungen im Verkehrsablauf zu reagieren. Es ist zu analysieren, inwieweit andere Steuerungsverfahren für Verkehrskollektive mit einem wesentlichen Anteil automatisierter Fahrzeuge besser zur Harmonisierung des Verkehrsablaufs, zur Stauvermeidung, zur Warnung der Verkehrsteilnehmer vor gefährlichen Situationen und zur Ermittlung und Bereitstellung von Fahrstrategien geeignet sind.

Definition und Umsetzung von Fahrstrategien für ausgewählte Verkehrssituationen

Als ein Ergebnis der Untersuchungen wurde die gezielte Übermittlung von Fahrstrategien an HAF für ausgewählte Verkehrssituationen als mögliche Erweiterung der SBA-Steuerung aufgeführt. Hier konnten im vorliegenden Forschungsvorhaben aufgrund der gewählten Untersuchungsmethodik (Simulation von ganzen Streckenzügen über einen Simulationszeitraum von mehreren Stunden) aber keine ausgewählten Verkehrssituationen detailliert analysiert werden. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf. So können mithilfe gezielter Simulation der einzelnen Verkehrssituationen (z. B. Zufahrt auf unfallbedingte Fahrstreifenreduktion) Fahrstrategien für HAF getestet und bewertet werden, mittels derer der Verkehrsablauf verbessert und die Verkehrssicherheit auch für menschliche Fahrer erhöht werden kann.

Entwicklung eines geeigneten Simulationstools bzw. Erweiterung bestehender Tools

Insbesondere bezüglich der weiteren Untersuchung zuvor genannter Forschungsthemen bedarf es geeigneter und leistungsfähiger Simulationstools. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchung sind zunehmend die Grenzen der vorhandenen Tools deutlich geworden. So mussten z. B. bezüglich der Fahrstreifenwahl, der Umsetzung des Lkw-Überholverbotes, der Kopplung mit der SBA und der Beeinflussung des Fahrverhaltens zeitintensive Zwischenlösungen entwickelt und Einschränkungen hingenommen werden. Um Fahrstrategien zu entwickeln und zu testen, die in HAFs und auch in konventionellen Fahrzeugen umgesetzt werden sollen, sind Weiterentwicklungen der Simulationstools zwingend erforderlich.

Weitere Forschungsfragen

Des Weiteren sind die folgenden Forschungsfragen zu klären:

- Welche Fahrverhaltensmodelle werden vom Nutzer akzeptiert, insbesondere im Hinblick auf das persönliche Sicherheitsempfinden?
- Welche zusätzlichen Effekte auf die Steuerung der SBA haben technische Erweiterungen wie z. B. die Umsetzung des Platooning?
- Welchen Effekt haben witterungsbedingte Einflüsse auf die automatisierten Fahrzeuge und wie sind diese Effekte in der Steuerung der SBA zu berücksichtigen?

10 Fazit und Ausblick

Es wurden zwei valide Simulationsmodelle zweier mit SBA ausgestatteter Streckenabschnitte mit der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation AIMSUN next erstellt. An die Simulationsmodelle wurde eine Nachbildung der dortigen UZ mit den Originalparametern angebunden. Aufgrund modellbedingter Einschränkungen konnten dabei nicht alle Steuerungsprogramme simuliert werden. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der mikroskopischen Simulation von variablen Lkw-Überholverböten in SBA und von Baustellenbereichen. Zusätzlich wurde ein Wirkmodell aus Realdaten entwickelt und angebunden. Das Wirkmodell bildet die

Reaktion der Verkehrsteilnehmer auf die SBA Maßnahmen ab und wurde für die menschlichen Fahrer auf der Basis von Einzelfahrzeugdaten und Schalt-daten kalibriert. In der Simulation werden mittels des Wirkmodells die Wunschgeschwindigkeiten und damit das Verhalten der simulierten Fahrzeuge je nach Schaltbild, Verkehrssituation und Fahrzeugart (HAF oder menschlicher Fahrer) beeinflusst. Dies geschieht bei Durchfahrt eines Fahrzeugs durch einen Anzeigequerschnitt.

Die HAF Fahrzeuge wurden mit drei verschiedenen Fahrverhaltensmodellen (konservativ/aus Betreibersicht wünschenswert/progressiv) abgebildet, die sich im Abstandsverhalten, dem Beschleunigungs- und Verzögerungsverhalten und der Reaktionsempfindlichkeit (Sensitivity factor) auf die umgebenden Fahrzeuge unterscheiden. Für alle Verhaltensmodelle wurden Szenarien mit verschiedenen Ausstattungs-raten modelliert und analysiert. Je nach Fahrverhaltensmodellen stellten sich bei hohen Ausstattungs-raten von HAF Verbesserungen oder auch Verschlechterungen in Bezug auf die Streckenkapazität ein.

Mit dem konservativen Verhalten konnte bereits ab einer Ausstattung von 50 % HAF die heutige Verkehrsnachfrage auf den Streckenabschnitten nicht abgewickelt werden.

Mit dem aus Betreibersicht wünschenswerten und dem progressiven Fahrverhalten wurden bei einer Ausstattung von 90 % HAF Kapazitätssteigerungen festgestellt.

Im aus Betreibersicht wünschenswerten Modell, für das die Parameter gemeinsam mit den Betreibern definiert wurden, ist dabei das Fahrverhalten weniger aggressiv und dadurch komfortabler für die Nutzer als im progressiven Modell.

Die Kapazitätssteigerungen sind mit einem homogenen Verkehrsfluss bei gleichzeitig geringen Zeitlücken zwischen den Fahrzeugen verbunden. Die Abstände werden geringer als derzeit in der StVO erlaubt. Hier ist ein sinnvoller Kompromiss zwischen dem technisch Möglichen, einem für den Nutzer komfortablen und aus rechtlicher Sicht durchführbaren Weg zu finden.

Da die Simulation der HAF jeweils mit nur einem Fahrverhaltensmodell durchgeführt wurde, waren das Verhalten bezüglich der Geschwindigkeit, der Differenzen zum Folgefahrzeug und zum Nachbarfahrstreifen sowie die Standardabweichungen sehr

homogen. Dadurch konnten im Zusammenspiel mit der SBA Zusammenbrüche vermieden und die Reisezeiten verbessert werden. Als nächster Schritt sollte untersucht werden, inwieweit sich diese Ergebnisse bei einer Durchmischung der Fahrverhaltensmodelle, wie sie auch in der Realität stattfinden wird, bestätigen.

In der SBA konnte bei steigender Durchdringung ein Verharren in der 80 km/h Harmonisierungsschaltung beobachtet werden, das auf die Ein- und Ausschaltenschwellwerte des MARZ 99 sowie die MQ/AQ Zuordnung zurückzuführen ist. Mit steigender Durchdringung von HAF müssen mindestens die Schwellwerte überprüft und bei Bedarf angepasst werden. Als zielführender wird aber die Entwicklung neuer, nicht schwellwertbasierter Steuerungsalgorithmen angesehen. Mit diesen könnte dann in Verkehrskollektiven mit einem wesentlichen HAF-Anteil dynamisch auf Ereignisse in reagiert und ggf. sogar prädiktiv beeinflusst werden. Des Weiteren kann unter Nutzung der Fahrzeug-Infrastrukturkommunikation mittels SBA die gezielte Beeinflussung der automatisierten Fahrzeuge erfolgen, um die negativen Auswirkungen von eingetretenen Störungssituationen zu verringern. Auf diese Weise kann eine zügigere Stauausfahrt unterstützt oder die sicherere Zufahrt auf Störungen erfolgen. Bei der Detektion ausgewählter Situationen und der dafür zu entwickelnden optimalen Fahrstrategie besteht weiterer Forschungsbedarf.

Generell wird auch mit Einführung von HAF ein Bedarf an SBA gesehen. Es wird davon ausgegangen, dass selbst bei hohen Ausstattungsraten die Harmonisierungswirkung der SBA weiterhin wichtig und notwendig ist, da zum einen in Mischszenarien die unterschiedlichen Verhaltensweisen von automatisiert und nicht automatisiert fahrenden Verkehrsteilnehmern zu Störungen im Verkehrsablauf führen können. Zum anderen werden auch Unterschiede in den Verhaltensparameter der automatisierten Fahrzeuge auftreten, sodass im Verkehrsablauf ebenfalls ein Harmonisierungspotenzial besteht. Zusätzlich werden sich die Aufgaben der SBA mit zunehmenden HAF-Anteil ändern. Der Fokus wird vielmehr auf der Situationserkennung und einer damit verbundenen Fahrstrategie, die entweder direkt in das Fahrzeug übertragen oder von dem HAF gewählt wird, liegen.

Literatur

- [Aim19] AIMSUN SLU: AIMSUN Next 8.4 User's Manual, 2019
- [Amm13] AMMON, D.: Systemtechnische Überlegungen auf dem Weg zum automatisierten Fahren. In: Der Fahrer im 21. Jahrhundert: Fahrer, Fahrerunterstützung und Bedienbarkeit. VDI-Berichte Nr. 2205. Braunschweig: VDI Verlag GmbH, 2013, p. 201-212
- [Ari16] ARIA, E.; OLSAM, J.; SCHWIETERING, C.: Investigation of Automated Vehicle Effects on Driver's Behavior and Traffic Performance. ISEHP International Symposium on Enhancing Highway Performance. Transportation Research Procedia, Volume 15, 2016, pp. 761-770
- [Arn11] ARNDT, S.: Evaluierung der Akzeptanz von Fahrerassistenzsystemen. Wiesbaden, VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2011
- [Bal95] BALZ, W.: Wirkung kollektiver Verkehrseinflussungsanlagen; Straßenverkehrstechnik, Band 7, S. 301, 1995
- [Ban95] BANDO, M. et al: Dynamical Model of Traffic Congestion and Numerical Simulation. Physical Review E51, Seiten 1035-1042, 1995
- [BASt97a] Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) (1997): Richtlinien für Wechselverkehrszeichen-Anlagen an Bundesfernstraßen (RWVA)
- [BASt97b] Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) (1997): Richtlinien für Wechselverkehrszeichen an Bundesfernstraßen (RWVZ)
- [BASt99] Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) (1999): Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrs-rechner-zentralen und Unterzentralen (MARZ)
- [BASt12] Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) (2012): Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLS 2012). Herausgeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
- [BASt18] Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt): BABSIM 2010. Artikel auf den Webseiten der BASt, zuletzt angesehen am 21.06.2018. URL: https://www.bast.de/BASt_2017/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v1-BABSIM/Unterordner/v1-BABSIM-Infos.html
- [Bay18] BayesFusion, LLC: GeNIe Modeler User Manual, Version 2.2.4 vom März 2018. URL: <https://support.bayesfusion.com/docs/GeNIe.pdf>
- [Bel16] BELLEM, H.; SCHÖNENBERG, T.; KREMS, J. F.; SCHRAUF, M.: Objective Metrics of Comfort: Developing a Driving Style for Highly Automated Vehicles. In: Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour 41 (2016), S. 45-54, 2016
- [Bev11] BEVRANI, K.; CHUNG, E.: An Examination of the Microscopic Simulation Models to Identify Traffic Safety Indicators. In: International Journal of Intelligent Transportation Systems Research. Springer, 2011
- [Bor09] BORGELT, C.; STEINBRECHER, M.; KRUSE, R.: Grafical Models – Representations for Learning, Reasoning and Data Mining, 2nd Edition, Wiley Series in Computational Statistics, 2009
- [Bri95] BRILON, W., PONZLET, M.: Auswirkungen von zeitlich veränderlichen Leistungsfähigkeiten. Schlussbericht zu FE 01.127 G90E des Bundesministers für Verkehr; Lehrstuhl für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum, Bochum 1995
- [Bri03] BRILON, W., ZURLINDEN, H.: Überlastungswahrscheinlichkeiten und Verkehrsleistung als Bemessungskriterium für Straßenverkehrsanlagen; Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 870, Bonn 2003
- [Bri05] BRILON, W., REGLER, M., GEISTEFELDT, J.: Zufallscharakter der Kapazität von Autobahnen und praktische Konsequenzen; Straßenverkehrstechnik, Heft 3 (Teil 1) und Heft 4 (Teil 2), Kirschbaumverlag, Bonn, 2005
- [Bro04] BROCKFELD, E. et al.: Calibration and Validation of Microscopic Traffic Flow Models. Transportation Research Board 83rd Annual Meeting, Washington, D.C., 2004
- [Bus84] BUSCH, F.: Spurbelastungen und Häufigkeit von Spurwechseln auf einer dreispurigen BAB-Richtungsfahrbahn. In: Straßenverkehrstechnik, Heft 6/1984, 1984
- [Chr11] GELAU, C., GASSER, T. M., SEECK, A.: „Fahrerassistenz und Verkehrssicherheit.“ In: WINNER, HERMANN, S. HAKULI, and G.

- WOLF, eds., Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. Springer-Verlag, 2011
- [Det11] DETERING, S.: Kalibrierung und Validierung von Verkehrssimulationsmodellen zur Untersuchung von Verkehrsassistenzsystemen. Dissertation an der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2011
- [DLR18a] DLR: Simulation of Urban Mobility – Wiki. Zuletzt angesehen am 21.06.2018. URL: http://sumo.dlr.de/wiki/Simulation_of_Urban_MObility_-_Wiki
- [DLR18b] DLR: Definition of Vehicles, Vehicle Types, and Routes. Artikel im Wiki des Simulationswerkzeugs SUMO, zuletzt angesehen am 21.06.2018. URL: http://sumo.dlr.de/wiki/Definition_of_Vehicles,_Vehicle_Types,_and_Routes
- [Ehm03] EHMANN, D.: Modellierung des taktischen Fahrerverhaltens bei Spurwechsellvorgängen. Dissertation, Aachen, 2003
- [emBW15] e-mobil BW GmbH (Hrsg.): Automatisiert. Vernetzt. Elektrisch. Potenziale innovativer Mobilitätslösungen für Baden-Württemberg (Studie), 2015
- [Erd14]: ERDMANN, J: Lane-Changing Model in SUMO. In: Proceedings of the SUMO2014 Modelling with Open Data, Seiten 77-88, Berlin, 2014
- [Fal16] FALLAH ZAVAREH, M., REZA MAMDOOHI, A., NORDFJÆRN, T.: The effects of indicating rear-end collision risk via variable message signs on traffic behaviour; Transportation Research Part F, 20116
- [Fes17] FESTNER, M.; EICHER, A.; SCHRAMM, D. H.: Beeinflussung der Komfort- und Sicherheitswahrnehmung beim hochautomatisierten Fahren durch fahrfremde Tätigkeiten und Spurwechsellodynamik. In: Uni-DAS (Hrsg.): 11. Workshop Fahrerassistenzsysteme und automatisiertes Fahren, S. 63-73, 2017
- [FGSV06] FGSV: Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation – Grundlagen und Anwendung, Heft 388, Köln 2006
- [FGSV12] FGSV: Hinweise zum Einsatz von Steuerungsverfahren in der Verkehrsbeeinflussung; Köln, 2012
- [FhG15] Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO): Hochautomatisiertes Fahren auf Autobahnen – Industriepolitische Schlussfolgerungen. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2015
- [FHUSA17] Heusch/Boesefeldt GmbH: Analysis, Modelling, and Simulation (AMS) Testbed Development and Evaluation to Support Dynamic Mobility Applications (DMA) and Active Transportation and Demand Management (ATDM) Programs, Studie im Auftrag der Federal Highway Administration des US Department of Transportation
- [Fri94] FRITZSCHE, H. T.: A Model for Traffic Simulation. In: Traffic Engineering and Control, S. 317-321, 1994
- [Gas12] GASSER, T. M. et al.: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung. In: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Fahrzeugtechnik, Heft F83, Bergisch Gladbach, 2012
- [Gaz61] GAZIS, D.; HERMAN, R.; ROTHERY, R.: Nonlinear Follow the Leader Models of Traffic Flow. In: Operations Research 9 (1961), S. 545-567, 1961
- [Gei15] GEISTEFELDT, J. et al.: Ausbau der Autobahn A7 in Hamburg – Simulationsstudie zur Wirksamkeitsanalyse einer Zuflussregelung am AD Hamburg-Nordwest in Fahrtrichtung Nord, Schlussbericht, 2015
- [Gei15a] GEISTEFELDT, J.: Empirical estimation of desired speed distributions for microscopic traffic simulation. Transportation Research Record, No. 2490, Transportation Research Board, Washington, D.C., S. 41-46, 2015
- [Gei17] GEISTEFELDT, J. et. al.: HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs auf Autobahnen, Forschungsauftrag FE03.0460/2009/OGB, Bergisch Gladbach: Schriftenreihe der Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrstechnik, Heft V 279, 2016
- [Gip81] GIPPS, P.: A behavioral car-following model for computer simulation. Transportation Research B, Vol. 15, Seiten 105-111, 1981
- [Gip86] GIPPS, P.: A model for the structure of lane-changing decisions. In: Transportation

- Research Part B: Methodological Vol. 20 (5), Seiten 403-414, 1986
- [Gri09] GRIMM, J.: Untersuchung zum Einsatzbereich von Steuerverfahren für Streckenbeeinflussungsanlagen. Diplomarbeit an der TU Dresden, 2009
- [Gri15] GRIESCHE, S.; NICOLAY, E.; ASSMANN, D.; DOTZAUER, M.; KÄTHNER, D.: Should My Car Drive As I Do? What Kind Of Driving Style Do Drivers Prefer For The Design of Automated Driving Functions? In: AAET: Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel; Beiträge zum gleichnamigen 16. Braunschweiger Symposium. ITS Niedersachsen, 2015, S. 185-204
- [Gri19] GRIMM, J.: Modeling the effects of motorway traffic control on driving behavior in a microscopic traffic simulation. 6th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS), Krakau, 2019, Seiten 1-8.
- [Gri20] GRIMM, J.: Kontext-differenzierte Modellierung durch intelligente Verkehrssysteme beeinflusstes Fahrverhalten am Beispiel von Streckenbeeinflussungsanlagen auf Autobahnen. Entwurf Dissertation (unveröffentlicht), TU Dresden, 2020.
- [Gua09] GUATTARI, M. C. et al.: Study of variable message signs comprehension using a driving simulator; Paper, University of Rome, Italy, 2009
- [Har07] HARDING, J.: Modellierung und mikroskopische Simulation des Autobahnverkehrs. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, 2007
- [Hay72] HAYWARD, J. C.: Near-Miss Determination Through Use of a Scale of Danger. Highway Research Record, Vol. 384, S. 24-34, 1972
- [Hei13] HEIMGARTNER et al.: Challenges for Better Understanding and Simulating Urban Traffic – The Zurich Experience. In: ALBRECHT, T. et al. (Eds.): Proceedings of the 3rd International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems, Dresden, 2013.
- [Hoo00] HOOPS et al.: Bewertung von Verfahren zur Erkennung von Störungen im Verkehrsablauf in Theorie, Praxis und Simulation. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 797, 2000
- [Hof13] HOFFMANN, S.: Mikroskopische Modellierung und Bewertung von verkehrssicherheitskritischen Situationen am Beispiel kommunikationsbasierter Fahrerwarnungen auf Autobahnen, Dissertation, Technische Universität München, 2013
- [Hüb15] HÜBNER, D., SCHWIETERING, C., RIEGELHUTH, G.: Aufbau einer kooperativen Verkehrszentrale in Hessen; Straßenverkehrstechnik, Kirschbaum-Verlag, Heft 7/2015
- [Jam13] JAMSON, A. H.; MERAT, N.; CARSTEN, O. M. J.; LAIE, F. C. H.: Behavioural changes in drivers experiencing highly-automated vehicle control in varying traffic conditions. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 30, pp. 116-125, 2013
- [Jon11] JONKERS, E. et al.: Results of field trials with dynamic speed limits in the Netherlands: improving throughput and safety on the A12 freeway; 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Washington, DC, USA. October 5-7, 2011
- [Kap10] KAPPICH, G., WESTERMANN, C., SCHMITZ, R.: Echtzeitbeurteilung und -optimierung der Wirksamkeit von Streckenbeeinflussungsanlagen Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1040, 2010
- [Kol06] KOLISETTY, V. G. B., et al.: Effect of Variable Message Signs on Driver Speed Behavior on a Section of Expressway under Adverse Fog Conditions – A Driving Simulator Approach; Journal of Advanced Transportation, Vol. 40, No. 1, pp. 47-74, 2006
- [Kra98] KRAUß, S.: Microscopic Modeling of Traffic Flow: Investigation of Collision Free Vehicle Dynamics. Dissertation, Universität zu Köln, 1998
- [Kra12] KRAJZEWICZ, D.; BIEKER, L.; HÄRRI, J.; BLOKPOEL, R.: Simulation of V2X Applications with the iTETRIS system. In: Procedia – Social and Behavioral Sciences 48 (2012), pp. 1482-1492
- [Kuh16] KUHN, B. T. et al.: Evaluation of Variable Speed Limit Pilot Projects for Texas Department

- of Transportation; Transportation Research Procedia, Volume 15, 2016, S. 676-693
- [Lem16] LEMMER, K. (Hrsg.): Neue autoMobilität – Automatisierter Straßenverkehr der Zukunft. Studie der acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 2016
- [Mag10] MAGET, C.: Untersuchung des Wettereinflusses auf den Verkehr. Diplomarbeit. Technische Universität München, 2010
- [Mau15] MAURER, M.; GERDES, J. C.; LENZ, B.; WINNER, H.: Autonomes Fahren. Springer Berlin Heidelberg, 2015
- [Mic85] MICHON, J. A. (1985). A critical view of driver behaviour models: What do we know, what should we do? In: L. EVANS and R.C. SCHWING (Eds.). Human Behaviour and Traffic Safety. Plenum, New York
- [Mon13] MONTEIL, J. G.: Investigating the Effects of Cooperative Vehicles on Highway Traffic Flow Homogenization: Analytical and Simulation Studies. Dissertation, 2013
- [Mou08] DE MOUZON, O.; PHAM, M. H.; EL FAOUZI, N.E.; CHUNG, E.: An effective real-time proactive road traffic risk indicator based on traffic data: compensated platoon braking time risk (CPBTR). 2008
- [Mül17] MÜLLER, A.; STOCKINGER, C.; WALTER, J.; HEUSER, T.; ABENDROTH, B.; BRUDER, R.: Einflussfaktoren auf die Akzeptanz des automatisierten Fahrens aus der Sicht von Fahrerinnen und Fahrern. In: WINNER, H.; BRUDER, R. (Hrsg.): (Wie) wollen wir automatisiert fahren? 8. Darmstädter Kolloquium, 2017, S. 1–22
- [Neu14] NEUMANN, T: Qualitätsmodellierung und -bewertung im Verkehr mittels eines probabilistischen Rahmenkonzepts. In: Straßenverkehrstechnik, 07/2014, S. 450 ff., 2014
- [Nis11] NISSAN, A., N. KOUTSOPOULOS, H.: Evaluation of the Impact of Advisory Variable Speed Limits on Motorway Capacity and Level of Service; 6th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service, Stockholm, Sweden, June 28 – July 1, 2011
- [Nto15] NTOUSAKIS, I. A.; NIKOLOS, I. K.; PAPAGEORGIOU, M.: On Microscopic Modelling of Adaptive Cruise Control Systems. 4th International Symposium of Transport Simulation (ISTS). In: Transportation Research Procedia 6 (2015), pp. 111-127
- [Ols04] OLSTAM, J. J.; TAPANI, A.: Comparison of Car-following Models. In: VTI meddelande 960A, Swedish National Road and Transport Research Institute, Linköping, Schweden, 2004
- [OLG08] OLG Hamm (Beschluss vom 29.10.2008 – 4 Ss OWi 629/08), Link: <https://www.verkehrsllexikon.de/Texte/Rspr2338.php>
- [Pan07] PANOU, M. et al (2007): Modelling Driver Behaviour in EU and International Projects. In: P.C. Cacciabue (Ed.). Modelling Driver Behaviour in Automotive Environments. Springer, London
- [Pap06] PAPAGEORGIOU, M., KOSMATOPOULOS, E., PAPAMICHAIL, I.: Effects of Variable Speed Limits on Motorway Traffic Flow; Internal Report 2006-25, Dynamic Systems and Simulation Laboratory, Technical University of Crete, Chania, Greece, 2006
- [Pha07] PHAM, M.-H.; DE MOUZON, O.; CHUNG, E.; DUMONT, A. G.: Applicability of Road Safety Indicators to Assess Driving Risks under Swiss Road Conditions. 7th Swiss Transport Research Conference, Monte Verità/Ascona, 2007
- [Pis03] PISCHNER et al.: Ermittlung und Bewertung der Nutzenkomponenten von Streckenbeeinflussungsanlagen im Hinblick auf den Verkehrsablauf. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 866, 2003
- [PTV11] PTV Planung Transport Verkehr AG: VISSIM 5.40 – Benutzerhandbuch. 2011
- [Rak10] RAKHA, H. et al: Calibration of Steady-State Car Following Models Using Macroscopic Loop Detector Data. Bericht zu einer Studie im Auftrag des Virginia Transportation Research Council, 2010
- [Räm01] RÄMÄ, P.: Effects of weather-controlled variable message signing on driver behaviour; Espoo 2001, Technical Research Centre of Finland, VTT Publications, 2001
- [Rey16] RAYMOND, G.; KEMENY, A.; DROULEZ, J.; BERTHOZ, A.: Role of Lateral Acceleration in Curve Driving: Driver Model and Experiments on a Real Vehicle and a Driving Simulator. In:

- Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society 43 (2016), Nr. 3, S. 483–495
- [Rie15] RIEGELHUTH, G., GLATZ, M.: Zuverlässiger Betrieb von Streckenbeeinflussungsanlagen auf Basis einer antizipierenden, regelbasierten Steuerung. Straßenverkehrstechnik. April 2015, Bd. 4.2015, S. 245-258
- [Ros03] ROSE, M.: Modellbildung und Simulation von Autobahnverkehr. Dissertation, Universität Hannover, 2003
- [RSZ17] RÖSENER, C., SAUERBIER, J., ZLOCKI, A., ECKSTEIN, L., HENNECKE, F., KEMPER, D., OESER, M.: Potenzieller gesellschaftlicher Nutzen durch zunehmende Fahrzeugautomatisierung. Schlussbericht zu FE 82.0626/ 2015/ ERB im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen. Aachen, 2017
- [SAE14] SAE On-Road Automated Driving (ORAD) committee: SAE J3016 – Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems; Warrendale/Troy, US, 2016
- [SAE18] SAE On-Road Automated Vehicle Standards Committee: SAE J3016_201806: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles, 2018
- [Sche15] SCHERER, S., DETTMANN, A., HARTWICH, F., PECH, T., BULLINGER, A. C., WANIELIK, G.: How the Driver Wants to Be Driven – Modelling Individual Driving Styles in Highly Automated Driving, 7. Tagung Fahrerassistenz, München, 25.-26.11.2015
- [Sche16] SCHERER, S., SCHUBERT, D., DETTMANN, A., HARTWICH, F., BULLINGER, A. C.: Wie will der „Fahrer“ automatisiert gefahren werden?: Überprüfung verschiedener Fahrstile hinsichtlich des Komforterlebens. In: 32. VDI/ VW-Gemeinschaftstagung Fahrerassistenz Und Automatisiertes Fahren. Düsseldorf : VDI Verlag GmbH, 2016 (VDI-Berichte, 2288), S. 299–310
- [Schi03] SCHICK, P.: Einfluss von Streckenbeeinflussungsanlagen auf die Kapazität von Autobahnabschnitten sowie die Stabilität des Verkehrsflusses; Eigenverlag Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2003
- [Schi14] SCHIMANDL, F. et al: Ermittlung von Wirkungen kooperativer Assistenzsysteme im motorisierten Individualverkehr mittels mikroskopischer Verkehrsflusssimulation – Methodik und Ergebnisse aus dem Projekt simTD. Straßenverkehrstechnik, Kirschbaum-Verlag, Heft 6/2014
- [Schü10] SCHÜNEMANN, B., WEDEL, J. W., RADUSCH, I.: V2X-Based Traffic Congestion Recognition and Avoidance. In: Tamkang Journal of Science and Engineering, Vol. 13, No. 1, pp. 63-70, 2010
- [Schu11] SCHUBERT, R.: Integrated Bayesian Object and Situation Assessment for Lane Change Assistance, Forschungsberichte der Professur Nachrichtentechnik Vol.7, Shaker Verlag, Aachen, 2011
- [Schw17] SCHWIETERING, C., BARTSCH, M., SCOTTI, C., PIRKELBAUER, S.: Optimierung der Steuerung von Streckenbeeinflussungsanlagen durch Einsatz von Einzelfahrzeugdaten. Vortrag und Langfassungsveröffentlichung im Rahmen der Heureka 2017, Stuttgart
- [Scu15] SCUTARI, M.; DENIS, J. B.: Bayesian Networks with Examples in R. CRC Press, 2015
- [Sie00] SIEGENER, W., TRÄGER, K., MARTIN, K., BECK, T.: Unfallgeschehen im Bereich von Streckenbeeinflussungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung der Verkehrsbelastung. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 787, 2000
- [Siv15] SIVAK, M.; SCHOETTLE, B.: Motion Sickness in Self-Driving Vehicles. Ann Arbor, 2015
- [Spa78] SPARMANN, U.: Spurwechsellvorgänge auf zweispurigen BAB-Richtungsfahrbahnen. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 263, 1978
- [Ste02] STEINHOFF, C., KATES, R., KELLER, H., FÄRBER, B., FÄRBER, B. (2002): Problematik präventiver Schaltungen von Streckenbeeinflussungsanlagen; SCHRIFTENREIHE Forschung Straßenbau und Verkehrstechnik, Heft 853, Bonn
- [Ste03] STEINHOFF: Online Bewertung der Akzeptanz und der Wirksamkeit präventiver Maßnahmen

- men durch Streckenbeeinflussungsanlagen auf Autobahnen. Dissertation, München, 2003
- [Str16] STRÖMGREN, P., LIND, G.: Harmonization with variable speed limits on motorways; Transportation Research Procedia, Volume 15, S. 664-675, 2016
- [StVO] Straßenverkehrs-Ordnung (StVO) in der Fassung des Inkrafttretens vom 30.10.2014. Letzte Änderung durch: Neunundvierzigste Verordnung zur Änderung straßenverkehrsrechtlicher Vorschriften vom 22. Oktober 2014 (Bundesgesetzblatt Jahrgang 2014 Teil I Nr. 48 S. 1635 Art. 1, ausgegeben zu Bonn am 29. Oktober 2014)
- [The97] THEIS, C.: Modellierung des Fahrverhaltens an Autobahnanschlüssen. Dissertation, Karlsruhe, 1997
- [Tra11] TRAPP, R.: Mikrosimulation von Verkehrsbeeinflussungsanlagen, Mitteilung 56 des Instituts für Straßenwesen, RWTH Aachen, 2011
- [Tre00] TREIBER, M.; HENNECKE, A.; HELBING, D.: Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations“, Physical Review E, 62 (2): 1805–1824, 2000
- [Tre10] TREIBER, M.; KESTING, A.: Verkehrsdynamik und -simulation – Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik. Springer-Verlag, 2010
- [TSS14] TSS Transport Simulation Systems: AIMSUN 8 Users' Manual. 2014
- [Ulb14] ULBRICH, S., MAURER, M.: Evaluation einer taktischen Verhaltensentscheidungsfindung für Fahrstreifenwechsel beim vollautomatisierten Fahren in Städten. In: Tagungsband des 9. Workshop Fahrerassistenzsysteme FAS 2014, Seiten 147 ff.
- [VDA17] Verband der Automobilindustrie (VDA): Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur. FAT-Schriftenreihe, Vol. 296, 2017
- [VDA18] Verband der Automobilindustrie (VDA): Automatisiertes Fahren. URL <https://www.vda.de/de/themen/innovation-und-technik/automatisiertes-fahren/automatisiertes-fahren.html> – Überprüfungsdatum 2018-05-16
- [Vol06] VOLLRATH, M., BRIEST, S., SCHIESSL, C., DREWES, J., BECKER, U.: Ableitung von Anforderungen an Fahrerassistenzsysteme aus Sicht der Verkehrssicherheit. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft F 60, Bremerhaven, Wirtschaftsverlag NW, 2006
- [Wag15] WAGNER, P.: Steuerung und Management in einem Verkehrssystem mit autonomen Fahrzeugen. In: Maurer, M. et al. (Hrsg.): Autonomes Fahren – Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2015
- [Wag16] WAGNER, P. et al.: The Structure of the Parameter Space of Car-Following Models. Transport Research Board 95th Annual Meeting, Washington, D.C., 2016
- [Wie74] WIEDEMANN, R.: Simulation des Straßenverkehrsflusses. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, Heft 8, 1974
- [Wie16] WIETHOLD, T.; HARDING, J.: Influence of Dynamic Traffic Control Systems and Autonomous Driving on Motorway Traffic Flow. ISEHP International Symposium on Enhancing Highway Performance, Transportation Research Procedia, Volume 15, 2016, pp. 176-186
- [Wil12] WILLE, J. M.: Manöverübergreifende autonome Fahrzeugführung in innerstädtischen Szenarien am Beispiel des Stadtpilotprojekts. Dissertation, Braunschweig, 2012
- [Win09] WINNER, H. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. 1. Aufl. Vieweg + Teubner, 2009
- [Win15] WINNER, H., HAKULI, S., WOLF, G.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort, 3. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015
- [Yan13] YANG, X. et al.: Proactive Optimal Vehicle Speed Limit Control for Recurrently Congested Freeway Bottlenecks. Transportation Research Board 92nd Annual Meeting, 2013

Tabellen

- Tab. 2-1: Übersicht der Stufen des automatisierten Fahrens und deren Funktionen [VDA18]
- Tab. 2-2: Zuordnung der SBA-Programme nach MARZ 1999 zu ihren Wirkzielen
- Tab. 2-3: Kenngrößen zur Beschreibung der Wirkung von SBA
- Tab. 3-1: Referenzstrecken – Überblick
- Tab. 3-2: Bewertung der Streckenabschnitte
- Tab. 3-3: Wertemengen der diskreten Zustandsvariablen des Wirkmodells
- Tab. 4-1: Wunschgeschwindigkeiten der Fahrzeugklassen A92
- Tab. 4-2: Wunschgeschwindigkeiten der Fahrzeugklassen A57
- Tab. 4-3: Fahrzeugklassenzuordnung auf Fahrstreifen zweistreifiger Bereich
- Tab. 4-4: Fahrzeugklassenzuordnung auf Fahrstreifen dreistreifiger Bereich
- Tab. 4-5: Kalibrierungsergebnis A57
- Tab. 4-6: Kalibrierungsergebnis A92
- Tab. 4-7: Validierungsergebnis A57
- Tab. 4-8: Validierungsergebnis A92
- Tab. 4-9: Knoten des finalen Gaußschen BN
- Tab. 4-10: Beispiele für Wunschgeschwindigkeitsverteilungen
- Tab. 6-1: Anforderungen an eine automatisierte Fahrzeugsteuerung aus Betreibersicht
- Tab. 6-2: Durchdringungsszenarien automatisierter Fahrzeuge
- Tab. 6-3: Parameter Fahrzeugfolgmodell für die drei Ausprägungen automatisierter Fahrzeuge
- Tab. 7-1: Übersicht Simulationsszenarien mit automatisierten Fahrzeugen (ohne Baustellen Szenarien)
- Tab. 8-1: Maßnahmen für SBA und HAF
- Tab. 8-2: Anforderungen an eine automatisierte Fahrzeugsteuerung aus Betreibersicht
- Tab. 9-1: Zeitliche Umsetzbarkeit der Maßnahmen

Bilder

- Bild 2-1: Fahrentscheidungs Ebenen; modifiziert nach [Pan07] (in Anlehnung an [FGSV06])
- Bild 2-2: Verkehrsflussdiagramm (Verkehrsstärke-Belegungsgrad) (a) Fundamental-diagramm (Geschwindigkeit-Verkehrsstärke) (b), [Pap06]
- Bild 3-1: Streckenabschnitt N 1 (Quelle: www.openstreetmap.de)
- Bild 3-2: Streckenabschnitt N6; (www.openstreetmap.de)
- Bild 3-3: Streckenabschnitt A4; (www.openstreetmap.de)
- Bild 3-4: Streckenabschnitt A8-Ost; (www.openstreetmap.de)
- Bild 3-5: Streckenabschnitt A57; (www.openstreetmap.de)
- Bild 3-6: Streckenabschnitt A92; (www.openstreetmap.de)
- Bild 3-7: Beispielhafte Darstellung einer Wochen-ganglinie (Auflösung hier: 5 min)
- Bild 3-8: Beispielhafte Darstellung eines QV-Diagramms (Auflösung hier: 1 min)
- Bild 3-9: Beispielhafte Darstellung einer Tages-ganglinie mit Schaltungen (Auflösung hier: 5 min)
- Bild 3-10: Beispielhafte Darstellung einer Tages-ganglinie mit Umfeldzuständen (Auflösung hier: 5 min)
- Bild 3-11: Beispielhafte Darstellung einer Tages-ganglinie mit Umfelddaten (Auflösung hier: 5 min)
- Bild 3-12: Beispielhafte Darstellung der Fahrstreifen-aufteilung (Auflösung hier: 15 min)
- Bild 3-13: Beispielhafte Darstellung eines Weg-Zeit-Diagramms (Auflösung: 1 min)
- Bild 3-14: Beispielhafte Darstellung einer Jahres-ganglinie (Auflösung: Tagesverkehr)
- Bild 3-15: Beispielhafte Darstellung einer Ereignis-ganglinie (Auflösung: 15 min)

- Bild 3-16: Beschreibung einer Fahrsituation mit Daten einer Streckenbeeinflussungsanlage
- Bild 3-17: Interaktion zwischen Wirkmodell und der Verkehrsflusssimulation AIMSUN
- Bild 3-18: Aufbau des Wirkmodells und Vorgehensweise zur Kalibrierung
- Bild 4-1: Vorgehen Erstellung Simulationsmodell
- Bild 4-2: Simulationsnetz A92 mit Mess- und Anzeigequerschnitten
- Bild 4-3: Simulationsnetz A57 mit Mess- und Anzeigequerschnitten
- Bild 4-4: Fahrstreifenaufteilung mit Fahrzeugklassenzuordnung auf Fahrstreifen
- Bild 4-5: Fahrstreifenaufteilung ohne Fahrzeugklassenzuordnung auf Fahrstreifen
- Bild 4-6: Kalibrierungsergebnis A57
- Bild 4-7: Kalibrierungsergebnis A92
- Bild 4-8: Initiales Gaußsches Bayessches Netz als Ausgangspunkt der Revision der Netztopologie
- Bild 4-9: Weboberfläche zur Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Fahrsituation und empirischen Verhalten
- Bild 4-10: Zusammenhänge Simulationsparameter/empirisches Verhalten (Auswahl, 3-streifiger Querschnitt)
- Bild 4-11: Finale Topologie des Gaußschen BN
- Bild 4-12: Zusammenhang Abstandsverhalten/ Simulationsparameter: Beispiel Sensitivity Factor/CIBTR
- Bild 4-13: Datenflüsse Anbindung Unterzentrale
- Bild 4-14: GUI A57
- Bild 5-1: QV-Diagramm mit Schaltzustand; Basis Ein-Minuten-Intervalle; A92 MQ 550; menschliche Fahrer
- Bild 5-2: Schwankungen der Verkehrsstärke; Basis Ein-Minuten-Intervalle; A57 MQ 120 im zweistreifigen Bereich, menschliche Fahrer
- Bild 5-3: Abweichung der Geschwindigkeit von gleitenden 5 min Mittelwert; A57 MQ 60; menschliche Fahrer
- Bild 5-4: momentane Geschwindigkeit zweistreifiger Bereich; Basis Ein-Minuten-Intervalle; A92 Subsec 500, menschliche Fahrer
- Bild 5-5: lokale Geschwindigkeit zweistreifiger Bereich; Basis Ein-Minuten-Intervalle; A92 MQ 500, menschliche Fahrer
- Bild 5-6: lokale Geschwindigkeit zweistreifiger Bereich; Basis Ein-Minuten-Intervalle; A57 MQ 60, menschliche Fahrer
- Bild 5-7: lokale Geschwindigkeit A57 zweistreifiger Bereich mit Grundversorgung von 100 km/h, A57 MQ 120; menschliche Fahrer
- Bild 5-8: Standardabweichung momentane Geschwindigkeit zweistreifiger Bereich mit Grundversorgung von 100 km/h; Basis Ein-Minuten-Intervalle; A57 Subsec 120; menschliche Fahrer
- Bild 5-9: Standardabweichung momentane Geschwindigkeit zweistreifiger Bereich; Basis Ein-Minuten-Intervalle; A92 Subsec 500, menschliche Fahrer
- Bild 5-10: Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Fahrstreifen im zweistreifigen Bereich; Basis Ein-Minuten-Intervalle; A92 MQ 500; menschliche Fahrer
- Bild 5-11: Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Fahrstreifen; Basis Ein-Minuten-Intervalle; A57 MQ 120; menschliche Fahrer
- Bild 5-12: Zeitlückenverteilung; Einzelfahrzeugdaten; A57 Subsection 60/70; menschliche Fahrer
- Bild 5-13: Geschwindigkeitsdifferenz zum Vorderfahrzeug Pkw; Einzelfahrzeugdaten; A57 Subsec 120; menschliche Fahrer
- Bild 5-14: CIBTR; Einzelfahrzeugdaten A92 Subsec 500, menschliche Fahrer
- Bild 6-1: Beschleunigungsformeln AIMSUN
- Bild 6-2: Einfluss der Wunschbeschleunigung am Beispiel Anfahren von 0 auf 100 km/h

- Bild 6-3: Einfluss der Wunschverzögerung am Beispiel Annähern an langsames Fahrzeug
- Bild 6-4: Einfluss der Mindestzeitlücke am Beispiel Annähern an langsames Fahrzeug (Der Geschwindigkeitsverläufe der Kurven $\min ZL = 1,4$ s und $\min ZL = 1,2$ s liegen unter der Kurve $\min ZL = 1,5$ s; Der Beschleunigungsverlauf der Kurve $\min ZL = 1,4$ s liegt unter der Kurve $\min ZL = 1,2$ s)
- Bild 6-5: Prinzip Verfolgung der Staudurchfahrt
- Bild 6-6: Prinzip der laufenden Anpassung der Wunschgeschwindigkeit an die Verkehrsbedingungen
- Bild 7-1: QV-Diagramm; Basis Ein-Minuten-Intervalle; A57 zweistreifiger Bereich; konservatives Modell
- Bild 7-2: Geschwindigkeit/Dichte; Ein-Minuten-Intervalle; A57 zweistreifiger Bereich; progressives Modell 100 % HAF
- Bild 7-3: Geschwindigkeit/Dichte; Ein-Minuten-Intervalle; A57 zweistreifiger Bereich; progressives Modell 50 % HAF
- Bild 7-4: Geschwindigkeit/Dichte; Ein-Minuten-Intervalle; A92 zweistreifiger Bereich; progressives Modell 100 % HAF
- Bild 7-5: QV-Diagramm; Basis Ein-Minuten-Intervalle; A57 MQ 120; wünschenswertes Modell
- Bild 7-6: QV-Diagramm; Basis Ein-Minuten-Intervalle; A57 MQ 120; progressives Modell
- Bild 7-7: Abweichung vom gleitenden Mittelwert Geschwindigkeit; Basis Ein-Minuten-Intervalle; wünschenswertes Modell
- Bild 7-8: Reisezeit; A57; 100 % HAF
- Bild 7-9: Reisezeit; A92; 100 % HAF
- Bild 7-10: lokale Geschwindigkeit; Basis Ein-Minuten-Intervalle; A57 MQ 120 V80 km/h; progressives Modell
- Bild 7-11: lokale Geschwindigkeit; Basis Ein-Minuten-Intervalle; A57 MQ 120 V80 km/h; wünschenswertes Modell
- Bild 7-12: momentane Geschwindigkeit; Basis Ein-Minuten-Intervalle; A92 Subsec 500 V100 km/h; wünschenswertes Modell
- Bild 7-13: Standardabweichung lokale Geschwindigkeit; Basis Ein-Minuten-Intervalle; A57 MQ 120 V80 km/h; progressives Modell
- Bild 7-14 Standardabweichung momentane Geschwindigkeit; Basis Ein-Minuten-Intervalle; A92 MQ 500 V100 km/h; wünschenswertes Modell
- Bild 7-15: Standardabweichung lokale Geschwindigkeit; Basis Ein-Minuten-Intervalle; A57 MQ 120 V80 km/h; wünschenswertes Modell
- Bild 7-16: lokale Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Fahrstreifen; A57 MQ 120 V80 km/h; progressives Modell
- Bild 7-17: lokale Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Fahrstreifen; A57 MQ 120 V80 km/h; wünschenswertes Modell
- Bild 7-18: Geschwindigkeitsdifferenz zum Vorderfahrzeug; A57 Subsection 120 V80 km/h; wünschenswertes Modell
- Bild 7-19: Zeitlückenverteilung; A57 Subsec 120 V80 km/h; progressives Modell
- Bild 7-20: Zeitlückenverteilung; A57 Subsec 120 V80 km/h; wünschenswertes Modell
- Bild 7-21: CIBTR; A57 Subsec 120 V80 km/h; wünschenswertes Modell

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Verkehrstechnik“

2019

V 313: **Tausalzverdünnung und -rückhalt bei verschiedenen Entwässerungsmethoden – Modellberechnungen**
Braun, Klute, Reuter, Rubbert € 18,50

V 314: **Übergreifende verkehrstechnische Bewertung von Autobahnstrecken und -knotenpunkten**
Hartmann, Vortisch, Vieten, Chatzipanagiotidou, Haug, Spangler € 18,50

V 315: **Telematisch gesteuertes Kompaktparken für das Lkw-Parkraummanagement auf Rastanlagen an BAB – Anforderungen und Praxiserprobung**
Kappich, Westermann, Holst € 15,50

V 316: **Akustische Wirksamkeit alter Lärmschutzwände**
Lindner, Hartmann, Schulze, Hübel € 18,50

V 317: **Wahrnehmungspsychologische Aspekte (Human Factors) und deren Einfluss auf die Gestaltung von Landstraßen**
Schlag, Anke, Lippold, Wittig, Waltherr € 22,00

V 318: **Unfallkommissionsarbeit – Unterstützung durch einen webbasierten Maßnahmenkatalog zur Beseitigung von Unfallhäufungen**
Wolf, Berger, Bärwolff € 15,50

V 319: **Vermeidung von abflussschwachen Zonen in Verwindungsbereichen – Vergleich und Bewertung von baulichen Lösungen**
Lippold, Vettters, Ressel, Alber
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 320: **Einsatzbereiche und Entwurfsэлеmente von Rad-schnellverbindungen**
Malik, Lange, Andriess, Gwasda, Erler, Stein, Thiemann-Linden € 18,00

V 322: **Automatisch gesteuerte Streustoffausbringung durch Nutzung neuer mobiler Sensoren**
Hausmann € 18,00

V 323: **Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2016**
Fitschen, Nordmann € 31,50
Die Ergebnisdateien können als kostenpflichtiger Download unter: www.schuenemann-verlag.de heruntergeladen werden. € 15,00

2020

V 321: **Dynamisches umweltsensitives Verkehrsmanagement**
Diegmann, Wursthorn, Breitenbach, Düring, Schönharting, Kraus, Klemm, Voigt, Kohlen, Löhner € 20,00

V 324: **Konzept zur Bewertung des Verkehrsablaufs an Knotenpunkten mit und ohne LSA**
Vortisch, Buck, Leyn, Baier, Schuckließ, Schimpf, Schmotz
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 325: **Entwurfsparameter von Hochleistungsstraßen innerhalb bebauter Gebiete**
D. Schmitt, J. Gerlach, M. Schwedler, F. Huber, H. Sander
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 326: **Straßenverkehrszählung 2015 – Methodik der manuellen Zählungen**
Schmidt, Frenken, Mahmoudi € 15,50

V 327: **Straßenverkehrszählung 2015 – Ergebnisse**
Frenken, Mahmoudi € 16,50

V 328: **Anprallprüfungen an Fahrzeug-Rückhaltesystemen und Entwicklung von Nachrüstlösungen**
Meisel, Balzer-Hebborn, Ellmers, Jungfeld, Klostermeier, Kübler, Schmitz, Schwedhelm, Yu
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 329: **Streckenbezogene Glättevorhersage**
Schedler, Gutbrod, Müller, Schröder € 24,50

V 330: **Führung des Radverkehrs an Landstraßen**
Baier, Leu, Rittershaus
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 331: **Leitfaden für die Streckenfreigabe für den Einsatz von Lang-Lkw**
Lippold, Schemmel, Förg, Süßmann € 17,00

V 332: **Räumliche Linienführung von Autobahnen**
Lippold, Zösch
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 333: **Passive Schallschutzmaßnahmen – Akustische Wirksamkeit**
Hänisch, Heidebrunn € 17,00

V 334: **Akustische Wirksamkeit von Lärmschutzwandaufsätzen**
Lindner, Kluth, Ruhnau, Schulze € 17,00

V 335: **Ermittlung aktualisierter Grundlagen für Beschleunigungsvergütungen in Bauverträgen**
Geistefeldt, Hohmann, von der Heiden, Finkbeiner € 16,00

V 336: **Vergleich der Detektoren für die Verkehrserfassung an signalisierten Knotenpunkten**
Ungureanu, Ilić, Radon, Rothe, Reichert, Schober, Stamatakis, Heinrich € 18,50

V 337: **Bridge-WIM Pilotversuch – Begleitung und Auswertung**
Kathmann, Scotti, Kucera € 18,50

2021

V 338: **Streckenbeeinflussungsanlagen – Entwurf eines regelungstechnischen Modells zur verbesserten Harmonisierung des Verkehrsablaufs**
Schwietering, Schwietering, Maier, Hakenberg, Pyta, Abel
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 339: **Aktualisierung der Datenbank MARLIS**
Schneider, Turhan, Pelzer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 340: **Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2017**
Fitschen, Nordmann € 31,00

V 341: **Lebenszykluskostenbewertung von Schutzeinrichtungen**
Eckert, Hendrich, Horlacher, Kathmann, Scotti, von Heel
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 342: **Entwicklung eines aktuellen, echtzeit-verfügbaren Key Performance Indicator (KPI) Systems für das deutsche Autobahnnetz**
Peter, Janko, Schick, Waßmuth, Friedrich, Bawidamann € 21,00

V 343: **Kreisverkehre an Landstraßen Auswirkungen der Erkennbarkeit und der Zufahrtsgestaltung auf die Verkehrssicherheit**
Schmotz, Schröter, Schemmel, Lippold, Schulze € 21,50

V 344: **Verkehrsträgerübergreifende Lärmkumulation in komplexen Situationen**
Popp, Eggers, Heidebrunn, Cortes € 21,00

V 345: **Aufbau einer Datenbank zur Berechnung exemplarischer Lärmsituationen mit Geräuschemissionsdaten der Straße und meteorologischen Daten**
Liepert, Skowronek, Eberlei, Crljenkovic, Müller, Schady, Elsen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 346: **Zusammenhang reduzierter Geräuschgrenzwerte mit den in-use Geräuschemissionen bei unterschiedlichen Verkehrssituationen**
Müller, Huth, Liepert € 15,00

V 347: **Chancen in der Verkehrsbeeinflussung durch Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation**
Schwietering, Lößbering, Spangler, Gabloner, Busch, Roszak, Dobmeier, Neumann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 348: **Einsatz und Verkehrssicherheit von Fußgängerüberwegen**
Bohle, Busek, Schröder € 18,50

V 349: **Straßenbepflanzung und Verkehrssicherheit – Ermittlung unfallbeeinflussender Merkmale auf Basis empirischer Modelle unter besonderer Berücksichtigung der Bepflanzung im Seitenraum an Landstraßen**
Schreck-von Below € 22,00

V 350: **Wirksamkeit von Lärmschutzwandaufsätzen**
Bartolomaeus, Strigari, Sammet
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 351: **Effektivität und Wirtschaftlichkeit der Streustofflagerung – TAUSALA II**
Holldorb, Cypra, Pape
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2022

V 352: **Abriebe von Fahrbahnoberflächen**
Düring, Schmidt, Johannsen € 19,00

V 353: **Nutzung der C2X-basierten ÖV-Priorisierung an signalisierten Knotenpunkten**
Gay, Grimm, Otto, Partzsch, Gersdorf, Gierisch, Löwe, Schütze € 16,00

V 354: **Anwendung der Methode BIM in Konformität mit den Regelwerken der FGSV und des IT-Ko**
Radenberg, Müller, König, Hagedorn, Geistefeldt, Hohmann, Heinrichs, Stiehler, Kortemeyer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 355: **Pilotversuch des Rechtsabbiegens von Rad Fahrern bei Rot**
Niestegge, Schüller, Hantschel, Schröter, Gerike
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 356: **Entwicklung von Einsatzkriterien für Fußgänger-schutzanlagen mit unterschiedlichen Grundstellungen**
Medicus, Schmotz, Gerike, Reinartz, Baier
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 357: **Qualifizierung der in Deutschland verwendeten Fahrzeug-Rückhaltesysteme mit verbessertem Schutz für Motorradfahrer nach den aktuellen europäischen Spezifikationen**
Klöckner, Gärtner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 358: **Nutzenpotenziale von eCall im Verkehrsmanagement**
Schaarschmidt, van Driel, Reinthaler, Nitsche, Aleksa
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 359: **Management von Neophyten – Ein Überblick über die aktuelle Situation auf Straßenbegleitflächen**
Bartels
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 360: **Wirksamkeit von Tunnelwänden als Träger photokatalytischer Oberflächen – Hauptstudie**
Stephan, Ehm, Kamaruddin
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 361: **Nachhaltigkeitsbewertung von Streckenzügen der Straßeninfrastruktur**
Hess, Lohmeier, Mielecke, Kunz
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 362: **Simulation des hochautomatisierten Fahrens auf Autobahnen mit kollektiver Streckenbeeinflussung**
Hilgers, Krabbe, Haug, Grimm, Kutter, Tempelhahn, Schwietering, Füg
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel. +(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

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

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.