

Potenzieller gesellschaftlicher Nutzen durch zunehmende Fahr- zeugautomatisierung

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Fahrzeugtechnik Heft F 128

bast

Potenzieller gesellschaftlicher Nutzen durch zunehmende Fahr- zeugautomatisierung

von

Christian Rösener
Jan Sauerbier
Adrian Zlocki
Lutz Eckstein

RWTH Aachen
Lehrstuhl für Straßenwesen
Institut für Kraftfahrzeuge

Friederike Hennecke
Dirk Kemper
Markus Oeser

RWTH Aachen
Lehrstuhl für Straßenwesen
Institut für Straßenwesen

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Fahrzeugtechnik Heft F 128

bast

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

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

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

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

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

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

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

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE 82.0626/2015/:
Potentieller gesellschaftlicher Nutzen durch zunehmende Fahrzeugautomatisierung

Fachbetreuung

Claus Pastor

Herausgeber

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

Redaktion

Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag

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

ISSN 0943-9307

ISBN 978-3-95606-435-7

Bergisch Gladbach, März 2019

Kurzfassung – Abstract

Potenzieller gesellschaftlicher Nutzen durch zunehmende Fahrzeugautomatisierung

Im vorliegenden Forschungsvorhaben wird der potenzielle gesellschaftliche Nutzen durch die zunehmende Fahrzeugautomatisierung untersucht. Dazu werden primär die Potenziale hinsichtlich der Verkehrssicherheit und in einem weiteren Schritt die Potenziale zur Steigerung der Verkehrseffizienz und zur Änderung des Energiebedarfs analysiert. Dabei werden vom Stau-Chauffeur bis zum Urbanen Roboter-Taxi insgesamt fünf verschiedene Fahrfunktionen bei vier verschiedenen Marktdurchdringungsszenarien (5 %, 25 %, 50 %, 100 %) analysiert.

Um die Potenziale der Fahrzeugautomatisierung hinsichtlich der Verkehrssicherheit zu ermitteln, wird nach der Bestimmung der Wirkfelder der jeweiligen Fahrfunktionen eine zweiteilige Methode angewendet. Diese berücksichtigt neben der Bestimmung der Änderung der Unfallschwere durch Unfallresimulationen auch die Änderung der Auftretenshäufigkeit der Szenarien. Da automatisierte Fahrzeuge im Gegensatz zu Systemen der aktiven Sicherheit kontinuierlich arbeiten, ist es wahrscheinlich, dass bestimmte Unfallszenarien (z. B. Auffahrszenarien) durch automatisierte Fahrfunktionen nicht mehr so häufig hervorgerufen werden. Die durch automatisierte Fahrzeuge induzierte Änderung der Auftretenshäufigkeiten verschiedener Szenarien wird mit einer Verkehrssimulation ermittelt.

Mittels einer Hochrechnungsmethodik werden die Simulationsergebnisse auf das gesamte Bundesgebiet skaliert. Dabei zeigt sich, dass z. B. durch den Autobahn-Chauffeur bei einer Durchdringungsrate von 50 % rund 30 % aller Unfälle mit Personenschaden auf deutschen Autobahnen verhindert werden können. Dies entspricht ca. 2 % aller Unfälle mit Personenschaden auf deutschen Straßen.

Zur Abschätzung der Potenziale hinsichtlich des Energiebedarfs wird die Änderung des streckenbezogenen Energiebedarfs der Fahrzeuge induziert durch automatisiertes Fahren untersucht. Die Betrachtung findet ebenfalls unter Nutzung von Verkehrssimulationen statt.

Potential societal benefits by increasing vehicle automation

In this research report the potential societal benefits induced by advancing vehicle automation are investigated. On the one hand the potential for safety benefits is considered, on the other hand the potentials for reducing fuel consumption and pollutant emissions and increasing traffic efficiency are investigated. The main objective of this research is to assess the potential of increasing road safety. Within this investigation, five different automated driving functions ranging from a Traffic Jam-Chauffeur to an Urban Robot-Taxi are examined for four different market penetrations (5%, 25%, 50%, 100%).

For identifying the benefits with respect to road safety, methods incorporating the characteristics of automated driving functions are used. Hence, besides investigating the change of severity of the accident by using accident resimulations, the change of frequency of occurrence induced by automated driving is considered as well. This is in particularly necessary since automated driving functions in contrast to active safety systems continuously control the behavior of the vehicle. Thus, it is possible that certain accident scenarios (e.g. rear-end scenarios) will occur less frequently with the introduction of automated driving functions. These changes in frequency of occurrence of accident scenarios are analysed by using traffic simulations.

After determining the effectiveness of the automated driving functions, they are projected and depicted over the whole territory of the Federal Republic of Germany. The results indicate that, e.g. a Motorway-Chauffeur at a market penetration of 50% has a potential for reducing about 30% of all accidents on German motorways resulting in personal injury. This equals 2% of all accidents with personal injuries on German roads.

In order to estimate the potentials of automated driving functions concerning the energy demand the distance related energy demand will be investigated. For this purpose, the effects of automated driving functions in larger traffic scenarios will be assessed and carried out by using traffic simulations.

Summary

Potential societal benefits by increasing vehicle automation

In this research report the potential societal benefits induced by advancing vehicle automation are investigated. On the one hand the potential for safety benefits is considered, on the other hand the potentials for reducing energy demand and increasing traffic efficiency are investigated. The main objective of this research is to assess the potential of increasing road safety.

Research methodology

In the first step, appropriate market penetration scenarios are determined before the potential of vehicle automation is identified. In this context the market influence of vehicle automation is assessed using analogue surveys of existing driver assistance systems which are already available on the market. The results of these considerations are market penetration scenarios with a given indicator of the penetration rate of a system to short- and long-term time horizons.

The analysis of the traffic safety potential is carried out at various detail levels. First of all the potential addressed accident scenarios of automated driving functions are determined. Afterwards, these by the automated driving functions addressed accidents are investigated by means of simulations.

The starting point for the investigation of the potentials of automated driving functions in both areas is the description of the considered automated driving functions. The considered automated driving functions are ranging from level 3 to 4 according to [SAE (2016)].

On the basis of the previously defined automated driving functions, the scenarios addressed by these functions are described. They are described with reference to different road types. The road types are motorways, federal roads, provincial roads, district roads and municipal roads. In addition to describing the addressed scenarios, the environmental conditions under which the driving functions are operating are also named. This includes the light and weather conditions as well as limitations of road

design (e.g. road routing layouts) and road operation (e.g. road works, road repairs etc.).

After the identification of the effectiveness fields of the automated driving functions, the accidents are extracted from the detailed accident data and the impact of the automated driving functions is analysed in a simulation-based manner. Besides investigating the change of severity of the accidents by using accident resimulations, the change of frequency of occurrence induced by automated driving is considered as well. For the reason that automated driving functions – in contrast to active safety systems – continuously control the behavior of the vehicle, it is possible that certain accident scenarios (e.g. rear-end scenarios) will occur less frequently with the introduction of automated driving functions.

After determining the effectiveness of the automated driving functions, these will be projected and depicted over the whole territory of the federal republic of Germany.

Based on the statements on traffic safety, the potential in traffic efficiency and energy demand due to automated driving is investigated. For this purpose, the effects of automated driving functions in larger traffic scenarios are assessed. The investigations are determined by means of traffic simulations at different penetration rates of the systems to be examined. The potential for traffic efficiency is determined on the basis of a literature review. In addition, when identifying potentials concerning traffic efficiency, the results with regard to road safety are also taken into account. They are in particular relevant with regard to the change in the number of traffic jams due to a changed frequency of accidents.

Examination results

In order to determine the potential societal benefit due to increasing vehicle automation, an analysis of the safety potential as well as a determination of the change in energy demand and traffic efficiency induced by the automated driving functions has been carried out.

In the following the results of the potential of automated driving with respect to traffic safety are presented. The following five automated driving functions have been analysed:

- Traffic Jam-Chauffeur,
- Motorway-Chauffeur,
- Commuter-Chauffeur,
- Universal-Chauffeur,
- Urban Robot-Taxi.

Whereas Traffic Jam-, Motorway- and Commuter-Chauffeur are operating only outside city limits, the Universal-Chauffeur is operating in addition within city limits and the Urban Robot-Taxi is operating within city limits solely. All described automated driving functions are operating on different sites, on different road classes, in a certain speed range, are addressing different scenarios and have different functional limits as well as different sensor view ranges.

The potential of vehicle automation with respect to traffic safety was estimated conservatively, because the accidents in which it is unclear whether the vehicle automation system can have a positive impact on the accident (e.g. environmental conditions or alcohol and drug influence) were not considered. The results also imply the (not conservative) assumption that the automated driving functions themselves do not cause any accidents.

Figure 1 shows the effectiveness of the considered five automated driving. The potential of the driving functions was examined for four road penetration scenarios (5%, 25%, 50% and 100%). The “domain” contains the sites on which the automated driving functions operate.

On basis of the Urban Robot-Taxi Figure 1 will be explained below. On average, 205,321 accidents involving personal injuries occurred in one year. Since only automated driving functions of passenger cars are examined, only accidents can be addressed in which at least one passenger car is among the first two parties. For the example of the Urban Robot-Taxi, 36,486 accidents with personal injuries per year cannot be addressed (see light gray area).

Furthermore, 47,487 accidents per year are outside the functional limits of the Urban Robot-Taxi (see dark gray area). Among the accidents outside the functional limits are those accidents which cannot be attributed to one of the manageable scenarios and those accidents in which the first participant is under the influence of alcohol, drugs or the vehicle has technical deficiencies. Among the accidents

which are not addressed by the automated driving functions are those which cannot be attributed to one of the manageable scenarios and those accidents which do not occur within the controllable speed range of the automated driving function. The accidents occurring outside the addressed functional limits (rain, fog, ice, construction sites) are not addressed by SAE level 3 automated driving functions. Besides, in case of the Urban Robot-Taxi, it is noticeable that fewer accidents are avoided with 100% penetration rate of automation than with lower vehicle automation, e.g. Universal-Chauffeur. This is due to the fact that the Universal-Chauffeur has a larger domain and thus has a larger effectiveness field.

Hence, the maximum effectiveness field of the Urban Robot-Taxi is 121,348 accidents with personal injuries per year. Apart from the restrictions on the speed range, the effectiveness fields have been determined on the basis of the accidents in the five federal states which feature the 3-digit accident type. By comparing the accident structure of these five federal states with the accident structure of the remaining eleven federal states, it has been shown that the identified effectiveness fields can be applied to the whole territory of the Federal Republic of Germany.

The simulation and the subsequent projection have been used to determine the effectiveness of the automated driving functions at the selected market penetration rates. The light blue area represents the number of accidents which are potentially addressable, but cannot be avoided according to the simulation results. However, the severity of these accidents possibly can be reduced by a reduction in the collision speed. In the case of a market penetration of for example 50%, 68,831 accidents are remaining in case of the Urban Robot-Taxi. The dark blue area represents the number of avoided accidents. Hence, the Urban Robot-Taxi can avoid 52,517 accidents with a market penetration of 50% within city limits. The effectiveness in the addressed domain, which represents the road classes in which the automated driving function is operating, is also indicated as a percentage. The effectiveness of the Urban Robot-Taxi is about 26% at a market penetration of 50%. When indicating the relative effectiveness, it should be noted that they relate to all accidents in the domain. Hence, accidents without passenger car involvement are included in this case as well.

The analysis shows that the automated driving functions can never avoid 100% of the accidents in the domain, since accidents without car participation are not addressed. A comparison of the number of potentially addressable accidents (blue and dark gray area) shows that the automated driving functions operating within city limits can potentially address more accidents. This is due to the fact that more accidents are occurring within city limits than outside urban areas, in particular on motorways. In a comparison of the effectiveness, it can be seen that the effectiveness of all considered automated driving functions is showing a comparable maximum. The exception is the Traffic Jam-Chauffeur due to the low speed range. With a market penetration of 100%, the automated driving functions have an effectiveness of approximately 46% to 54% as long as they are related to all registered accidents with personal injuries of the respective domain.

In conclusion, a maximum of 83% of all accidents can be avoided by the vehicle automation of passenger cars. For this purpose, a fully-automated driving function (level 5 according to [SAE (2016)]) is assumed, which operates on all sites and in all road classes without speed limitation. This function covers all driving scenarios, has no functional limitations and can also drive alcoholic and/or drug influenced users.

In addition to the analysis of the safety potentials of automated driving functions, the changes in energy demand as well as traffic efficiency induced by vehicle automation are considered as well. With

regard to the change in energy demand, the indicator “distance-related energy demand” is considered. The distance related energy demand is calculated by using a traffic simulation for five traffic densities with five different penetration rates (0%, 5%, 25%, 50% and 100% penetration of automated driving functions). The analysis shows that the distance-related energy demand can be reduced by 8% on the road class motorway at a penetration rate of 100% automated driving functions. This is mainly due to a less oscillating acceleration behaviour of the automated vehicles. The analysis of the research report “Impact of partially and highly automated driving on the capacity of the road infrastructure” [BUSCH et al. (2017)] has shown that only in the case of automated driving functions, which allow a smaller time headway as a normal driving, capacity gains on the motorway network can be seen. Only in case of a very high market share of vehicles featuring vehicle-to-vehicle communication, which allow small time headways, capacity gains will be achieved. In case of a full penetration of these systems, the capacity of the road class motorway can be increased by approx. 30%. Partially and conditionally automated vehicles (according to [SAE (2016)]), which are not featuring vehicle-to-vehicle communication, have a lessening effect on capacity [BUSCH et al. (2017)].

The capacity gains resulting from a full penetration of automated driving functions with vehicle-to-vehicle communication are leading to a reduction of the time losses by more than a half. Thus, approximately 6% of the total travel times can be

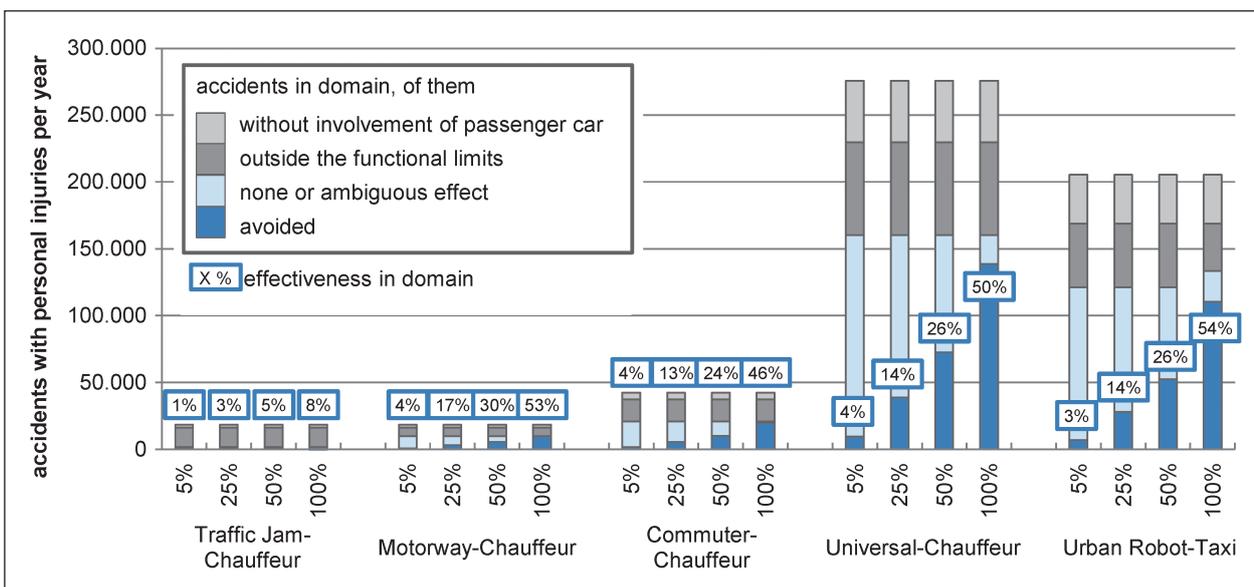


Fig. 1: Effectiveness fields and effectiveness (accidents with personal injury) of automated driving functions

saved in the motorway network, which corresponds to an economic benefit of approximately 2 billion euros [BUSCH et al. (2017)]. At this point it should be noted that this is only the reduction of the loss times resulting from an improvement in the traffic congestion.

An analysis of the potential of avoiding traffic jams due to a reduction of accidents reveals that, for example, if 20% of all traffic jams are caused by accidents, 1% to 11% of all traffic jams on German motorways can be avoided. In a literature survey no exact value for the proportion of accidents as a cause of traffic jams could be established, since the proportions vary widely due to different data bases and indicators.

Conclusions for practice

For all results of this research report it should be taken into account that they are based on numerous assumptions and partially based on data generated by traffic simulations. However, these were only implemented for motorways. Regarding the secondary road network, reasonable assumptions are still lacking for comparable traffic simulations. For future effectiveness assessment studies the authors recommend to develop (real-)data-based assessment methods. For example, a data collection of relevant traffic situations recorded in real traffic is a promising approach for effectiveness assessment, since effects which cannot be represented by simulation (such as sunlight and precipitation) can be taken into account here. Nevertheless, simulation-based approaches as a complement to (real-)data-based approaches remain indispensable, for example, to determine the effectiveness at high penetration rates of automated driving functions. In particular, there is the need to further develop models for the (reference) human driver performance in safety relevant situations.

Since mixed-traffic with human and automated controlled vehicles is the most realistic scenario in the short and medium term, the interaction of automated vehicles with human controlled vehicles requires special attention. Here, there is a need to extend and further develop the already existing methodological approaches.

Inhalt

1	Einleitung und Zielsetzung	11	3.3.4	Totwinkelassistent (BLS)	28
2	Grundlagen des automatisierten Fahrens und Betrachtungen zur Wirksamkeitsanalyse	11	3.4	Modellierung der betrachteten Fahrfunktionen	28
2.1	Gesellschaftlicher Kontext der Fahrzeugautomatisierung.	12	3.4.1	Modellierung der Algorithmik der automatisierten Fahrfunktionen	28
2.2	Klassifizierung von Systemen zur automatisierten Fahrzeugführung	12	3.4.2	Modellierung der Fahrerassistenzsysteme	29
2.3	Methoden zur Wirksamkeitsbetrachtung	13	3.4.3	Modellierung der Bremsverzögerung in kritischen Szenarien	31
2.3.1	Safety Mechanism-Methode.	13	4	Methodisches Vorgehen	31
2.3.2	Wirkfeldbetrachtung	15	4.1	Forschungsansatz zur Wirksamkeitsbetrachtung hinsichtlich der Verkehrssicherheit automatisierter Fahrfunktionen.	31
2.3.3	Resimulation von Unfällen	15	4.1.1	Beschreibung der Marktdurchdringungsszenarien	32
2.3.4	Neuronales Netzwerk.	15	4.1.2	Szenarienbasierte Identifikation der Wirkfelder	33
2.3.5	Probandenstudie	15	4.1.3	Beschreibung des Unfalländerungspotenzials durch Simulation	37
2.3.6	Feldversuch	16	4.1.4	Hochrechnung der Wirksamkeit auf nationale Ebene	44
2.3.7	Retrospektive Unfallanalyse.	16	4.1.5	Erörterung neu induzierter Unfallszenarien	45
2.3.8	Schlussfolgerung bezüglich Methoden	16	4.2	Forschungsansatz zur Wirksamkeitsbetrachtung hinsichtlich des Energiebedarfs sowie der Verkehrseffizienz	45
3	Beschreibung der analysierten automatisierten Fahrfunktionen	17	4.2.1	Wirksamkeit hinsichtlich des Energiebedarfs und der Emissionen.	45
3.1	Definition von Szenarien	17	4.2.2	Wirksamkeit hinsichtlich der Verkehrseffizienz	47
3.2	Betrachtete automatisierte Fahrfunktionen	19	5	Wirksamkeit hinsichtlich der Verkehrssicherheit automatisierter Fahrfunktionen	47
3.2.1	Stau-Chauffeur.	22	5.1	Marktdurchdringungsszenarien	47
3.2.2	Autobahn-Chauffeur.	22	5.2	Identifikation der Wirkfelder	48
3.2.3	Pendler-Chauffeur	23			
3.2.4	Universal-Chauffeur	24			
3.2.5	Urbanes Roboter-Taxi	25			
3.3	Betrachtete Fahrerassistenzsysteme (FAS)	25			
3.3.1	Auffahrwarnfunktion (FCW) und autonome Notbremse (AEB)	26			
3.3.2	Spurverlassens-Warnfunktion und Spurhaltefunktion (LDW)	27			
3.3.3	Abstandsregeltempomat (ACC)	27			

5.2.1	Identifikation auf Basis einer repräsentativen Auswahl der amtlichen Unfallstatistik	49	7 Fazit und Ausblick	87
5.2.2	Identifikation auf Basis der GIDAS-Daten	58	Literatur	89
5.3	Unfalländerungspotenzial durch Simulation auf Basis der GIDAS-Wirkfelder.	62	Bilder	93
5.3.1	Veränderung der Auftretenshäufigkeiten der Szenarien mittels Verkehrssimulation.	62	Tabellen	95
5.3.2	Veränderung der Unfallanzahl und -schwere mittels Unfallresimulation	63	Anhänge	
5.3.3	Unfalländerungspotenzial der automatisierten Fahrfunktionen auf Grundlage der GIDAS-Datenbank	63	Die Anhänge 1 bis 8 zum Bericht sind im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter:	
5.4	Hochrechnung der Wirksamkeit auf nationale Ebene	66	http://bast.opus.hbz-nrw.de abrufbar.	
5.5	Automatisierte Parkfunktionen	74		
5.6	Erörterung neu induzierter Unfallszenarien.	74		
5.7	Zusammenfassung der Wirksamkeit hinsichtlich der Verkehrssicherheit automatisierter Fahrfunktionen von Pkw	80		
6	Wirksamkeit hinsichtlich des Energiebedarfs und der Verkehrseffizienz	82		
6.1	Wirksamkeit hinsichtlich des Energiebedarfs.	82		
6.2	Wirksamkeit hinsichtlich der Verkehrseffizienz	84		
6.2.1	Wirksamkeit hinsichtlich der Kapazität von Fernstraßen.	84		
6.2.2	Stauvermeidungspotenzial durch Reduktion der Unfallzahlen	85		
6.3	Zusammenfassung der Wirksamkeit hinsichtlich des Energiebedarfs und der Verkehrseffizienz	87		

1 Einleitung und Zielsetzung

Das Ziel des vorliegenden Forschungsvorhabens ist die Untersuchung des potenziellen gesellschaftlichen Nutzens durch die zunehmende Fahrzeugautomatisierung. Dabei werden zum einen Potenziale des Sicherheitsnutzens und zum anderen Abschätzungen zur Änderung des Energiebedarfes sowie zur Steigerung der Verkehrseffizienz betrachtet. Der Schwerpunkt des Projektes liegt auf der Bestimmung der Potenziale des Sicherheitsnutzens.

Bevor die Potenziale der Pkw-Fahrzeugautomatisierung identifiziert werden können, müssen zunächst geeignete Marktdurchdringungsszenarien bestimmt werden. Dabei wird die Marktdurchdringung der Fahrzeugautomatisierung mithilfe von Analogiebetrachtungen zu bereits im Markt existierenden Fahrerassistenzsystemen durchgeführt. Das Ergebnis dieser Betrachtungen sind Marktdurchdringungsszenarien mit Angabe der Durchdringungsrate eines bestimmten Systems zu kurz- und langfristigen Zeithorizonten.

Die Analyse der Verkehrssicherheitspotenziale erfolgt auf verschiedenen Detailebenen. Zunächst werden die adressierten Unfallszenarien sowie die potenziellen Wirkfelder automatisierter Fahrfunktionen bestimmt. Zur Analyse der Sicherheitswirkung werden unfallauslösende Mechanismen identifiziert und das Vermeidungspotenzial durch die betrachteten Systeme untersucht. Hierzu werden verschiedene Szenarien, die aus detaillierten Unfalldaten abgeleitet werden, in der Simulation betrachtet.

Ausgangspunkt für die Untersuchung der Potenziale automatisierter Fahrfunktionen in beiden Themengebieten ist die in Kapitel 3 erfolgte Funktionsbeschreibung. Die betrachteten automatisierten Fahrfunktionen umfassen Fahrfunktionen der Level 3 und 4 nach [SAE (2016)].

Auf Grundlage der zuvor definierten Fahrfunktionen erfolgt anschließend die Beschreibung der durch die Funktion durchführbaren Szenarien. Die Beschreibung der Szenarien erfolgt ferner in Abhängigkeit verschiedener Straßentypen. Die berücksichtigten Straßentypen umfassen Autobahnen, Bundesstraßen, Landesstraßen, Kreisstraßen sowie Gemeindestraßen. Neben der Beschreibung der möglichen Szenarien werden auch die Umgebungsbedingungen, unter denen die berücksichtigten Fahrfunktionen operieren können, beschrieben. Dies schließt die Beschreibung von Licht- und Wit-

terungszuständen sowie Limitierungen aus Straßentwurf (z. B. Trassierungsverläufe) und Straßenbetrieb (z. B. Arbeitsstellen) ein.

Nach der Bestimmung des Wirkfeldes der betrachteten automatisierten Fahrfunktionen werden die durch die Funktionen adressierten Unfälle aus detaillierten Unfalldaten extrahiert und die Wirkung der automatisierten Fahrfunktionen in diesen simulationsbasiert betrachtet. Dabei wird neben der Änderung der Unfallschwere durch Unfallresimulation auch die Änderung der Häufigkeit des Auftretens der Unfallszenarien betrachtet. Da automatisierte Fahrfunktionen – im Gegensatz zu Systemen der aktiven Sicherheit – kontinuierlich das Verhalten des Fahrzeugs steuern, ist es sehr wahrscheinlich, dass automatisierte Fahrfunktionen nicht mehr so häufig in bestimmte Unfallszenarien (z. B. Auf-fahrtszenarien) gelangen.

Nach Bestimmung der Wirksamkeit der automatisierten Fahrfunktionen wird diese über eine Hochrechnung auf das Unfallgeschehen des gesamten Bundesgebiets abgebildet.

Aufbauend auf den Aussagen zur Verkehrssicherheit wird das Änderungspotenzial bezüglich des Energiebedarfs sowie der Verkehrseffizienz untersucht. Hierzu wird die Wirkung von automatisierten Fahrfunktionen in größeren Verkehrsszenarien bewertet. Die Untersuchungen hierzu werden ebenfalls in der Simulation durchgeführt.

Die Ergebnisse werden für verschiedene betrachtete Fahrfunktionen ermittelt und nach verschiedenen Zeithorizonten, Automatisierungsstufen und Umgebungsbedingungen gegliedert.

2 Grundlagen des automatisierten Fahrens und Betrachtungen zur Wirksamkeitsanalyse

In diesem Kapitel werden die Grundlagen der automatisierten Fahrzeugführung und der Wirksamkeitsbetrachtung dieser Systeme dargestellt. Dabei werden zunächst die allgemeinen Grundlagen der automatisierten Fahrzeugführung sowie die Klassifizierung der Systeme in Automatisierungsstufen nach [SAE (2016)] dargestellt. Anschließend werden die in der Literatur identifizierten Verfahren zur Wirksamkeitsbetrachtung der Fahrzeugautomatisierung vorgestellt.

2.1 Gesellschaftlicher Kontext der Fahrzeugautomatisierung

Trotz sinkender Unfallzahlen in Europa, speziell in Deutschland, sterben weltweit nach wie vor jährlich über 1,2 Millionen Menschen durch Verkehrsunfälle [WHO (2013)]. Aus diesem Grund hat die UN für die Jahre 2011 bis 2020 die UN-Dekade der Verkehrssicherheit ausgerufen. Die Steigerung der Verkehrssicherheit stellt somit ein wesentliches Ziel der Automobilforschung dar. Neben einer kontinuierlichen Steigerung der passiven Sicherheit spielen zunehmend aktive Sicherheitssysteme und Fahrerassistenzsysteme eine Rolle, die Fahrer in kritischen Situationen informieren, warnen, unterstützen und ggf. in die Fahrzeugführung eingreifen. Durch die kontinuierliche Weiterentwicklung der Mikroelektronik und insbesondere der Umfeldsensoren zur Situationserfassung rückt die Fahrzeugautomatisierung verstärkt in den Vordergrund aktueller Forschungsvorhaben, z. B. [KNAPP et al. (2014)]. Aktiv beworben durch Unternehmen aus der IT-Industrie wurde die Begehrlichkeit nach automatisiertem Fahren geweckt (Level 3 und höher gemäß der Definition nach [SAE (2016)]). Dies stellt die Automobilforschung vor neue Herausforderungen. Dabei ist das Spannungsdreieck zwischen Fahrer, Fahrzeug und Umfeld auf jeder Ebene zu berücksichtigen. Laufende Forschungsprojekte in Deutschland fokussieren sich bislang stark auf die technische und ergonomische/psychologische Ebene. Neben der Erarbeitung technischer Grundlagen und Anwendungen, bspw. zur Datenerfassung, Längs- und Querregelung, ergeben sich im Kontext des automatisierten Fahrens auch organisatorische Fragestellungen auf der juristischen und gesellschaftlichen Ebene. So besteht eine Hürde zur Einführung der Systeme in der Klärung rechtlicher Fragen. Darüber hinaus sind in der Einführungsphase verschiedene Verkehrskollektive, bestehend aus konventionellen Fahrzeugen und automatisiert geführten Fahrzeugen in verschiedenen Automatisierungsstufen, miteinander zu harmonisieren. Hierzu sind in Zukunft gesetzliche Bestimmungen erforderlich, die Zulassung und Funktionen automatisierter Systeme regeln. Ein erster Gesetzesentwurf zur Änderung des Straßenverkehrsgesetzes wurde von Bundestag und Bundesrat angenommen.

Der bislang überwiegend von der Technologieentwicklung getriebene Fortschritt im Bereich Fahrerassistenzsysteme/automatisiertes Fahren wird in

naher Zukunft an Grenzen gelangen, an denen ein durch Gesetzgeber, Straßenbauverwaltung und Straßenverkehrsbehörden vorgegebenes, ggf. gestuftes Einführungsszenario notwendig wird. Dieser Entwicklungsschritt wird große Ressourcen in den Bereichen Technik, Recht und Verwaltung erfordern und stellt damit eine nicht zu vernachlässigende öffentliche Investition dar.

Investitionen im öffentlichen Bereich werden üblicherweise über die volkswirtschaftlichen bzw. verkehrstechnischen Vorteile gerechtfertigt. Die Reduktion von Fahrzeitverlusten, Verkehrsunfällen, Energiebedarf, Schadstoffemissionen sowie Klima- und Flächenbelastungen stellen in derartigen Analysen die Nutzenkomponenten dar. Inwieweit das automatisierte Fahren zu gesellschaftlichen Einsparungen führt, wurde bislang nicht ausreichend untersucht.

2.2 Klassifizierung von Systemen zur automatisierten Fahrzeugführung

Die Einteilung verschiedener Fahrfunktionen kann laut [GASSER et al. (2017)] anhand von drei Funktionsprinzipien erfolgen. Demnach existieren Funktionen, die den Fahrer lediglich über Umgebungsbedingungen informieren oder vor Gefahren warnen, aber nicht in das Fahrverhalten des Fahrzeugs eingreifen. Weiterhin werden Funktionen unterschieden, die temporär in die Fahrdynamik eingreifen, um beispielsweise einen bevorstehenden Unfall zu verhindern oder dessen Folgen abzumildern. Das dritte Funktionsprinzip fasst alle Fahrfunktionen zusammen, die kontinuierlich wirken und daher über einen längeren Zeitraum Einfluss auf die Längs- und Querdynamik nehmen.

Klassifiziert werden können diese kontinuierlich wirkenden automatisierten Fahrfunktionen durch die von der Society of Automotive Engineers (SAE) definierten Automatisierungsstufen. Die Klassifikation der Automatisierungsstufen beschreibt sowohl die technische Ausgestaltung des Systems als auch die beim Fahrer verbleibenden Aufgaben [SAE (2016)].

In diesem Projekt wird auf die SAE-Definition, vgl. [SAE (2016)], zurückgegriffen. Die Klassifizierung reicht dabei vom Fahren ohne Automatisierung, bei der der Fahrer dauerhaft die Längs- und Querrführung ausführt, über assistiert, teilautomatisiert, bedingt automatisiert und hochautomatisiert bis hin zu vollautomatisiert. Eine detaillierte Darstellung der

Automatisierungsstufen erfolgt im Folgenden anhand der SAE-Norm.

- Level 0 (keine Automatisierung)
Der Fahrer führt dauerhaft (während der gesamten Fahrt) die Längs- und Querführung des Fahrzeugs aus. Kurzzeitig warnende (z. B. FCW, LDW etc.) und kurzzeitig eingreifende Systeme (z. B. AEB, ABS, ESP etc.) werden nicht als automatisierte Fahrfunktionen klassifiziert, da der Fahrer bei diesen Systemen keine bewusste Übergabe von Teilen der Fahraufgabe an das System vornimmt.
- Level 1 (Fahrerassistenz)
Das System übernimmt die Längs- oder Querführung in einem spezifischen Anwendungsfall. Der Fahrer führt dauerhaft die verbleibende Aufgabe aus und überwacht das System kontinuierlich.
- Level 2 (teilautomatisiert)
Das System übernimmt die Längs- und Querführung in einem spezifischen Anwendungsfall. Der Fahrer muss die Längs- und Querführung sowie den Verkehr dauerhaft überwachen und gegebenenfalls entscheiden, das System ein- oder auszuschalten bzw. die Fahraufgabe wieder vollständig zu übernehmen.
- Level 3 (bedingt automatisiert)
Das System übernimmt die Längs- und Querführung in einem spezifischen Anwendungsfall, erkennt Systemgrenzen und fordert den Fahrer zur Übernahme mit ausreichender Zeitreserve auf. Der Fahrer muss die Längs- und Querführung sowie den Verkehr daher nicht dauerhaft überwachen, aber jederzeit in der Lage sein, die Fahrzeugführung zu übernehmen. Im Gegensatz zu bereits in Serie erhältlichen Funktionen, bei denen der Fahrer das System permanent überwachen muss, erlaubt Level 3 somit die Durchführung von Nebenaufgaben. Daher müssen die Funktionen ab Level 3 Reaktionszeiten von mehreren Sekunden sicher und zuverlässig bewältigen können.
- Level 4 (hochautomatisiert)
Das System übernimmt die Längs- und Querführung in einem spezifischen Anwendungsfall vollständig. In diesem Fall kann das System die Fahrzeugführung auch dann fortsetzen, wenn der Fahrer einer Übernahmeaufforderung nicht (sofort) nachkommt (z. B. aufgrund von Neben-

aufgaben). Im spezifischen Anwendungsfall ist ein Fahrer zum Führen des Fahrzeugs nicht zwingend erforderlich.

- Level 5 (vollautomatisiert)
Das System übernimmt die Längs- und Querführung während der ganzen Fahrt und ist somit in der Lage, alle auftretenden Situationen eigenständig zu bewältigen. Ein Fahrer zum Führen des Fahrzeugs ist nicht zwingend erforderlich.

2.3 Methoden zur Wirksamkeitsbetrachtung

Zur Wirksamkeitsanalyse von Fahrerassistenzsystemen mit Umfeldwahrnehmung sind in der Vergangenheit unterschiedlichste Methoden verwendet worden. Gemeinsam haben die Methoden, dass Verkehrssituationen ohne Berücksichtigung des betrachteten Systems verglichen werden mit den Verkehrssituationen, in denen das System angewendet wird. Dabei werden ggf. auch Durchdringungsraten berücksichtigt.

Grundsätzlich muss zwischen retrospektiven – Betrachtungen der Wirksamkeit eines Systems nach dessen Einführung in den Markt – und prospektiven Methoden – Betrachtung der Wirksamkeit vor der Einführung des Systems in den Markt – unterschieden werden.

Diese reichen von Feldfahrstudien (FOTs), über Probandenstudien bis hin zur virtuellen Analyse mithilfe von Simulationen, vgl. [PAGE et al. (2015)]. Die wesentlichen Methoden zur Wirksamkeitsanalyse werden im Folgenden näher betrachtet und beschrieben. Der Fokus liegt auf Methoden zur Wirksamkeitsbetrachtung hinsichtlich der Verkehrssicherheit. Eine Übersicht über die in unterschiedlichen Projekten eingesetzten Methoden gibt Tabelle 2-1.

2.3.1 Safety Mechanism-Methode

Diese Methode stellt ein Rahmenwerk dar, dessen Ziel die Berücksichtigung aller Einflüsse eines Systems auf das Verkehrsgeschehen ist. Der Ansatz berücksichtigt dabei nicht nur im Fahrzeug verbaute Systeme, sondern alle intelligenten Transportsysteme (ITS) [DRASKÓCZY et al. (1998)].

Diese Methode unterteilt die Wirkung eines Systems in unterschiedliche Bereiche, sogenannte Me-

Projekt	Ebene	Quelle	Fokus	Methodik
AdaptIVe	EU	[FAHRENKROG (2014)]	Automatisiertes Fahren	Verkehrssimulation + Unfallresimulation
P.E.A.R.S.	EU	[PAGE et al. (2015)]	Aktive Sicherheit (+ automatisiertes Fahren)	Simulative Wirksamkeitsbetrachtung
interactIVe	EU	[FAHRENKROG et al. (2014a)]	Aktive Sicherheit	„9 Safety Mechanism“-Ansatz + Unfallresimulation
TRACE	EU	[KARABATSOU et al. (2006)]	Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) + aktive Sicherheit	Verschiedene (Wirkfeldbetrachtung, NN-Ansatz)
euroFOT	EU	[FABER et al. (2011)]	ADAS	Feldversuchsansatz
eIMPACT	EU	[WILMINK et al. (2008)]	ADAS	„9 Safety Mechanism“-Ansatz + Wirkfeldbetrachtung
PReVAL	EU	[SCHOLLIERS et al. (2008)]	ADAS	„9 Safety Mechanism“-Ansatz
ASSESS	EU	[DOBBERSTEIN et al. (2014)]	Aktive Sicherheit	Unfallresimulation
ASPECSS	EU	[EDWARDS et al. (2014)]	Aktive Sicherheit	Veränderung Kollisionsgeschwindigkeit auf Basis von Testszenerarien
Aktiv	D	[PFAFFENBAUER et al. (2010)]	Aktive Sicherheit	Wirkfeldbetrachtung + Unfallresimulation
Ko-FAS	D	[SEFATI (2013)]	Aktive Sicherheit	Wirkfeldbetrachtung
simTD	D	[SCHUBERT et al. (2013)]	Kooperative Systeme	Unfallresimulation

Tab. 2-1: Übersicht ausgewählter Projekte sowie die angewendete Methodik zur Wirksamkeitsbetrachtung hinsichtlich der Verkehrssicherheit

chanismen, für die die Wirkung des Systems quantifiziert wird [JOKSCH et al. (1972)]. Ein häufig verwendeter Ansatz ist der Nine-Safety-Mechanisms nach [DRASKÓCZY et al. (1998)]. Die in diesem Ansatz berücksichtigten Mechanismen sind die folgenden:

1. Direct in-car modification of the driving task (Veränderung des Unfallgeschehens, die direkt durch ein System hervorgerufen wird),
2. Direct influence by roadside applications (Veränderung des Unfallgeschehens, die durch ein System außerhalb des Fahrzeugs hervorgerufen wird),
3. Indirect modification of user behavior (Veränderung des Verhaltens der Nutzer),
4. Indirect modification of non-user behavior (Veränderungen des Verhaltens von Nutzern außerhalb des Systems),
5. Modification of interaction between users and non-users (Veränderungen bei der Interaktion von Nutzern und Nicht-Nutzern des Systems),
6. Modification of road user exposure (Veränderungen bei der zurückgelegten Fahrstrecke),

7. Modification of modal choice (Veränderungen bei der Verkehrsmittelwahl),
8. Modification of route choice (Veränderungen bei der Wahl der Route),
9. Modification of accident consequences (Veränderungen bei den Unfallfolgen).

Durch den allgemeinen Ansatz dieser Methodik werden neben den direkten Effekten auch indirekte Effekte durch ein geändertes Nutzerverhalten berücksichtigt. Ein häufiges Problem ist allerdings, dass sich die indirekten Effekte nur schwer bestimmen lassen, da die notwendigen Daten nicht vorliegen und nur schwer bestimmt werden können.

Die Nine-Safety-Mechanisms-Methode beschreibt allerdings nicht, wie die Quantifizierung der einzelnen Mechanismen erfolgen soll. Daher können verschiedene Ansätze bzw. andere Methoden (z. B. Resimulation von Unfällen zur Bestimmung der direkten Wirkung, wie in [van NOORT et al. (2012)]) zu diesem Zweck eingesetzt werden. Somit kann dieser Ansatz mit anderen Methoden kombiniert werden. Dies bedeutet im Umkehrschluss aber auch, dass Analysen mit unterschiedlicher Detailtiefe möglich sind.

2.3.2 Wirkfeldbetrachtung

Bei dieser Methode, werden die von einem System möglicherweise vermiedenen Unfälle abgeschätzt. Hierzu werden zunächst basierend auf der Systembeschreibung die adressierten Unfalltypen bestimmt. Im zweiten Schritt wird die Anzahl der Unfälle des jeweiligen Typs ermittelt. Hierzu werden i. A. nationale Unfalldatenbanken verwendet, vgl. [BUSCH (2005)]; [FROST et al. (1988)]; [KOCHERSCHIEDT (2004)]; [PROGEN (1999)].

Die Annahme, dass ein System alle Unfälle eines vom System adressierten Unfalltyps vermeidet, führt zur maximalen Abschätzung des Wirkfeldes. Um detaillierter zu bestimmen, wie viele Unfälle sich durch das betrachtete System vermeiden lassen, sollten auch Systemeinschränkungen berücksichtigt werden. Dies können beispielsweise Einschränkungen des Geschwindigkeitsbereiches oder der Wetterbedingungen, in denen das System operiert oder nicht operiert, sein. Abhängig von den berücksichtigten Einschränkungen kann es notwendig werden, detailliertere Unfalldaten zu verwenden.

2.3.3 Resimulation von Unfällen

Der Ansatz der Resimulation von Unfällen ist eine häufig angewendete Methode zur Bestimmung der Wirksamkeit eines Systems, vgl. z. B. [NEUBAUER (2012)]; [WILLE et al. (2012)]; [van NOORT et al. (2012)]. Bei dieser Methode wird die relevante Fahrsituation mit und ohne dem zu untersuchenden System simuliert [BUSCH (2005)]; [KARABATSOU et al. (2006)]. Auf Basis der durchgeführten Simulation wird durch den Vergleich der Konsequenzen – Kommt es zu einem Unfall? Wie kritisch wird eine Situation? – die Wirkung des Systems bestimmt. Die Betrachtung wird i. A. für mehrere Fahrsituationen durchgeführt. Weiterhin werden die Parameter der Fahrsituation zur besseren Absicherung gegenüber Unsicherheiten bzw. zur Berücksichtigung verschiedener Fahrerreaktionen variiert [van NOORT et al. (2012)].

Die Methodik verlangt nach einer detaillierten Beschreibung der Situation und der Bewegung der involvierten Fahrzeuge [WILLE et al. (2012)]. Dies kann prinzipiell durch im Feld aufgezeichnete Situationen bereitgestellt werden. Das übliche Vorgehen ist allerdings, dass auf Basis von detaillierten Unfalldatenbanken, wie z. B. der GIDAS-Datenbank, die Situation und die Bewegung der Fahrzeuge rekonstruiert wird. Die Rekonstruktion stellt dann die

für die Simulation der Fahrsituation notwendigen Daten bereit [WILLE et al. (2012)].

Zum Zweck der Simulation der Fahrsituation müssen die wesentlichen Komponenten des Verkehrs (Fahrer, Fahrzeug mit System und Umgebung) abgebildet werden. Zu diesem Zweck können verschiedene Simulationstools eingesetzt werden.

2.3.4 Neuronales Netzwerk

Bei diesem Ansatz wird, wie der Name bereits impliziert, die Wirkung eines Systems mithilfe eines neuronalen Netzwerkes bestimmt. Das neuronale Netzwerk verbindet dabei den Systemeinfluss auf die Eingangsdaten (z. B. Kollisionstyp, Wetterbedingungen) über mehrere Knotenpunkte mit der Wirkung des Systems bzw. mit den Ausgangsdaten, wie z. B. Verletzungsschwere [PAPPAS et al. (2008)].

Zum Anlernen und zur Parametrierung des neuronalen Netzwerkes bedarf es eines Sets an Trainingsdaten. Die Untersuchung wird dann mit einem zweiten Datenset durchgeführt [KARABATSOU et al. (2006)].

Die Herausforderung bei diesem Ansatz besteht vor allem darin, den Systemeinfluss auf die Eingangsdaten zu beschreiben (z. B. Welche Unfalltypen werden vom System adressiert). Hierzu können ggf. auch andere Methoden verwendet werden [LARSSON et al. (2012)].

2.3.5 Probandenstudie

Die Methode der Probandenstudie schließt bei der Untersuchung der Wirkung eines Systems die Betrachtung des Fahrers mit ein. Zu diesem Zweck wird ein Fahrerkollektiv im Fahrsimulator oder im kontrollierten Feld in eine Situation gebracht, in der die Wirkung des Systems untersucht werden soll [BREUER (2009)]. Abhängig vom Studiendesign absolvieren die Probanden die Situation mit und ohne System. Durch den Vergleich der Bewältigungsleistung der Probanden mit den verschiedenen Situationszuständen (z. B. ob eine Kollision erfolgreich vermieden wird) kann der Effekt des Systems beschrieben werden.

Die Probandenstudie ist im Vergleich zu den vorherigen Methoden sehr aufwändig. Daher beschränkt sich die Betrachtung meistens auf eine bzw. sehr wenige Situationen. Ferner muss berücksichtigt

werden, dass bei den Probanden ein Trainingseffekt nach dem ersten Durchfahren der Situation einsetzt, sodass häufig nur eine Situation für die Auswertung genutzt werden kann.

Ein Beispiel für die Anwendung dieser Methode ist in [SCHITTENHELM (2013)] dargestellt. In diesem Vorhaben wird die Wirksamkeit von FCW und AEB durch eine Fahrsimulatorstudie mit 110 Probanden evaluiert. Dazu wurden drei typische Auffahrsituationen untersucht, wobei ein Teil der Probanden die Situationen ohne System und der andere Teil die Situationen mit Systemen bewältigen musste.

2.3.6 Feldversuch

Die Methode des Feldversuches (Field Operation Test – FOT) untersucht die Wirkung eines Systems im realen Straßenverkehr [LARSSON et al. (2012)]. Hierzu wird eine definierte Anzahl an Fahrzeugen mit dem betrachteten System ausgerüstet und von Fahrern im Straßenverkehr für einen gewissen Zeitraum gefahren.

Da die Systeme mindestens prototypisch in die Fahrzeuge implementiert sein müssen, kann diese Methodik nicht in der frühen Entwicklungsphase eingesetzt werden. Weiterhin sind die Ausrüstung sowie der Betrieb der Fahrzeuge mit verhältnismäßig hohen Kosten verbunden [LARSSON et al. (2012)].

Zur Bestimmung der Wirkung eines Systems werden verschiedene Fahrsituationen bzw. Events ausgewertet [FABER et al. (2011)]. Bei der Betrachtung der Wirkung hinsichtlich der Verkehrssicherheit werden häufig kritische Situationen (Incidents) bzw. Beinaheunfälle (Near-Crashes) untersucht. Diese Fahrsituationen dienen als Ersatzgröße für Unfälle, da diese i. A. in nicht statistisch hinreichender Anzahl während des Feldversuches detektiert werden [BENMIMOUN et al. (2011)].

2.3.7 Retrospektive Unfallanalyse

Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten prospektiven Methoden verfolgt die retrospektive Unfallana-

lyse die Wirkung eines Systems nach dessen Markteinführung [PAGE et al. (2007)].

Ein Beispiel für die Methodik ist die Untersuchung der Wirkung des elektrischen Stabilitätsprogrammes (ESP), vgl. [FARMER (2004)]; [LANGWIEDER et al. (2004)]; [UNSELT et al. (2004)].

Bei diesen Methoden werden die Unfallzahlen für die relevanten Unfalltypen zwischen einer Gruppe von Fahrzeugen mit System und einer Gruppe ohne System verglichen [BULLETIN (2011)]. Mit der Auswahl der Gruppen ist ein Vergleich über die gesamte Fahrzeugflotte möglich. Der Vergleich kann aber auch für Untermengen der gesamten Fahrzeugflotte, wie z. B. nur für Fahrzeuge einer bestimmten Fahrzeugklasse, durchgeführt werden. Eine weitere Option ist der Vergleich für ein Fahrzeug vor und nach der Einführung des Systems. Die Wahl der Vergleichsgruppen hängt stark von dem betrachteten System, der Art der Markteinführung sowie der Durchdringungsrate des Systems ab. Eine Anwendung dieser Methode ist in [SCHITTENHELM (2013)] dargestellt. In diesem Fall wurde die Wirksamkeit eines FCW und AEB Systems durch die Analyse des Absatzes von Fahrzeug-Ersatzteilen untersucht. Da die untersuchten Systeme in erster Linie Auffahrunfälle adressieren, wurde der Absatz von Front-Stoßstangen einer identischen Fahrzeugbaureihe mit System sowie ohne System analysiert.

2.3.8 Schlussfolgerung bezüglich Methoden

Vor dem Hintergrund der in diesem Projekt zu untersuchenden Fragestellung – Abschätzung des Potenzials von noch nicht in den Markt eingeführten Systemen – müssen prospektive Methoden verwendet werden. Hierbei werden in erster Linie die Methoden der Wirkfeldbetrachtung sowie der Resimulation von Unfällen verwendet. Ein allgemeiner Ansatz zur Wirksamkeitsbetrachtung mittels Simulation ist in der P.E.A.R.S.-Initiative definiert worden [PAGE et al. (2015)], siehe Bild 2-1.

Dieser sieht zunächst die Definition bzw. Identifikation des Wirkfeldes der zu untersuchenden Funktion

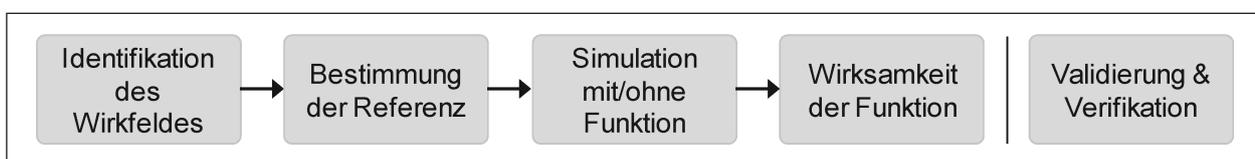


Bild 2-1: Prozess für die prospektive Wirksamkeitsbetrachtung von Fahrerassistenzsystemen mit Umfeldwahrnehmung, vgl. [PAGE et al. (2015)]

vor. Anschließend wird die Referenz bestimmt, zu der die Funktion verglichen wird. In der Regel ist dies die menschliche Leistungsfähigkeit. Im nächsten Schritt wird die zu untersuchende Funktion simulativ mit der definierten Referenz in relevanten Szenarien verglichen. Die Ergebnisse dieses Vergleiches im gesamten Wirkfeld, d. h. in allen durch die Funktion adressierten Szenarien, liefern schließlich die Wirksamkeit der betrachteten Funktionen. Abschließend wird die Integrität der Wirksamkeit durch eine Validierung und Verifikation sichergestellt.

Die Ansätze der Probandenstudie sowie des Feldversuches erscheinen aufgrund des notwendigen Ressourceneinsatzes für dieses Forschungsvorhaben als wenig geeignet. In Bezug auf die Safety-Mechanism-Methode muss berücksichtigt werden, dass diese eher ein Rahmenwerk ist. Die dort genannten Mechanismen sind zu berücksichtigen. Allerdings muss davon ausgegangen werden, dass für viele Mechanismen – insbesondere die indirekten Effekte – aufgrund fehlender Daten und Erfahrungen (z. B. Nutzerverhalten) mit automatisierten Fahrfunktionen keine Aussage zum aktuellen Stand möglich ist. Bei der Bestimmung der direkten Effekte werden dagegen häufig die bereits oben genannten Methoden der Wirkfeldbetrachtung sowie der Resimulation genutzt.

3 Beschreibung der analysierten automatisierten Fahrfunktionen

In diesem Kapitel werden die automatisierten Fahrfunktionen beschrieben, die zur Bestimmung des potenziellen Nutzens von Fahrzeugautomatisierung betrachtet werden. Wie schon zuvor aufgeführt, werden die betrachteten automatisierten Fahrfunktionen über die von ihnen adressierten Szenarien beschrieben. Zur Definition der relevanten Szenarien sollen sowohl die Ansätze zur Klassifikation von Situationen aus der Literatur genutzt als auch eine systematische Betrachtung des Fahrprozesses durchgeführt werden. Der Fahrablauf einer typischen Fahrt ist in Bild 3-1 dargestellt.

Neben der Beschreibung der Szenarien werden in diesem Kapitel die betrachteten automatisierten Fahrfunktionen und Fahrerassistenzsysteme sowie die Modellierung der Algorithmik der Systeme beschrieben.

3.1 Definition von Szenarien

Für die Wirkfeldbetrachtung und Resimulation der Unfälle wird im Rahmen dieses Projektes ein szenariobasierter Ansatz gewählt. Die Funktionsumfänge der einzelnen zu betrachtenden Funktionen werden daher in Szenarien betrachtet. Um die unbegrenzte Anzahl von möglichen Szenarien einzugrenzen, müssen diese zunächst klassifiziert werden. Der hier gewählte Ansatz zur Identifikation der Szenarien ist zweistufig: Zunächst wird der Stand der Technik analysiert. Im zweiten Schritt wird eine normale Fahrt systematisch hinsichtlich auftretender Szenarien untersucht.

Grundsätzlich muss beachtet werden, dass jedes Szenario unter verschiedenen Bedingungen durchgeführt werden kann. Diese Bedingungen können ggf. das Szenario in seiner Ausführung beeinflussen. Zu beachtende Bedingungen sind der Umweltzustand (Wetter, Straßenzustand, Tageszeit etc.), die infrastrukturellen Umgebungsbedingungen (Straßentyp, Radius, Geschwindigkeitsbeschränkungen, Bebauung etc.) sowie der Zustand des Fahrers und Fahrzeuges.

In der Literatur existieren bereits unterschiedliche Klassifizierungssysteme, die im Folgenden vorgestellt werden. Dabei wird zwischen der Klassifikation von Verkehrssituationen gemäß Umwelt- und Infrastrukturbedingungen und der Klassifikation auf Basis der erforderlichen Fahraufgaben und Szenarien der jeweiligen Situation unterschieden.

Eine Klassifikation von Verkehrssituationen ist in [von BENDA (1977)] beschrieben. Hierbei handelt es sich um eine Klassifikation auf Grundlage von Umwelt- und Infrastrukturbedingungen. Um für den Menschen relevante Merkmale von Situationen zu bestimmen, wurde ein Versuch durchgeführt aus dem die relevanten Merkmale mit ihren jeweiligen Ausprägungen abgeleitet werden konnten. Der Schwerpunkt liegt hier auf der Infrastruktur, den Wetter- und Sichtbedingungen sowie den Verkehrsbedingungen.

Auf Grundlage der zuvor genannten Arbeit wurden weitere Klassifikationen von Verkehrssituationen erarbeitet, z. B. das in [FASTENMEIER (1995)] beschriebene Klassifikationsverfahren, bei dem die Zahl der Situationen weiter reduziert wird. Im Ansatz von [REICHART (2001)] wurde das Verfahren von FASTENMEIER ohne Veränderungen zur situationsspezifischen Analyse der menschlichen

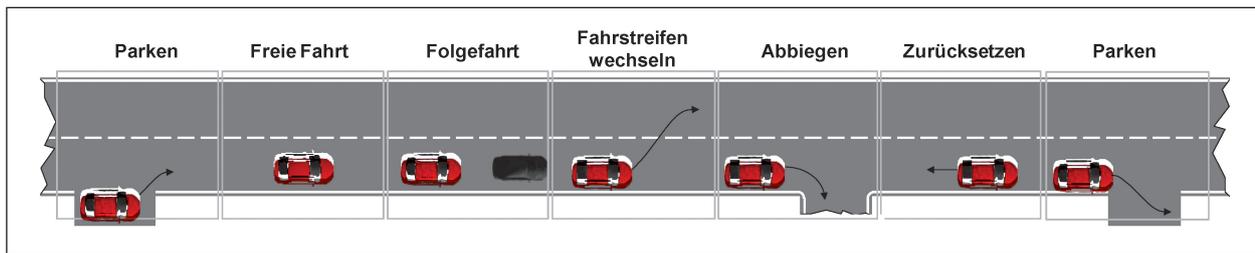


Bild 3-1: Szenarienklassifikation anhand des Fahrprozesses

Zuverlässigkeit beim Führen von Kraftfahrzeugen übernommen.

Neben der Klassifikation von Verkehrssituationen gemäß Umwelt- und Infrastrukturbedingungen kann eine Klassifikation der Situationen aufgrund von Szenarien durchgeführt werden.

Dabei ist ein Szenario nach [DOMSCH (2008)] die Beschreibung der Menge an Aufgaben und Handlungen, die den (Relativ-)Bewegungszustand bzw. die (Relativ-)Position des Fahrzeuges bestimmen (z. B. Abbiegen, Fahrstreifenwechsel).

Eine Klassifikation von Situationen anhand von Szenarien ist in [CHALOUPIKA et al. (1998)] beschrieben. Hier werden 18 Fahrscenarien definiert, die von verschiedenen Verkehrsteilnehmern (z. B. Pkw oder Fußgängern) ausgeführt werden können. Umgebungs- und Umweltbedingungen werden allerdings nicht berücksichtigt.

Eine weitere Klassifikation aufgrund elementarer Fahrscenarien automatisierter Fahrzeuge wird in [NAGEL (1994)] beschrieben. Hier werden 17 Fahrscenarien erfasst, die von der Bewegung im Straßenverkehr bis zum Parkvorgang am Fahrtenende reichen. Umgebungs- und Umweltbedingungen werden auch hier nicht berücksichtigt.

Auf Grundlage der von NAGEL beschriebenen Liste wird in [VOLLRATH et al. (2005)] eine Klassifikation mit 14 identifizierten Fahrscenarien als Indikator für die Belastung des Fahrers entwickelt. Ähnlich wie bei VOLLRATH wird auch in [VERWEY (2000)] die Beanspruchung des Fahrers untersucht. Hervorzuheben ist hier die Berücksichtigung von infrastrukturellen Einflüssen.

Im Rahmen der Identifikation von Referenzszenarien zur Bewertung von Fahrerassistenzsystemen der aktiven Sicherheit wurden in [EBNER (2014)] neun verschiedene Fahrscenarien identifiziert. Diese wurden mit Umgebungs- und Umweltbedingungen in Szenarien zusammengefasst.

Neben der Klassifikation der Bewegungskonstellation der beteiligten Verkehrsteilnehmer werden hier auch Umgebungs- und Umweltbedingungen berücksichtigt. Beispielfhaft kann der Unfalltypenkatalog des Gesamtverbandes der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV) genannt werden, der unter anderem in der Unfalldatenbank der Bundesanstalt für Straßenwesen verwendet wird, vgl. [GDV (1998)].

In Tabelle 3-1 werden alle zuvor genannten Fahrscenarien kurz dargestellt.

Es ist davon auszugehen, dass die Geschwindigkeit zum Beginn und zum Ende der Fahrt Null ist. Dementsprechend muss die Fahrt mit einem Ausparkvorgang beginnen. Daran schließen sich Situationen an, in denen das Ego-Fahrzeug auf der Straße entweder mit oder ohne umgebenden Verkehr fährt. Während der Fahrt kann es zu Fahrstreifenwechseln und Abbiegeszenarien in Abhängigkeit der gewählten Route kommen. Am Ende der Fahrt wird das Fahrzeug wieder geparkt. Dieses kann auch das Rückwärtsfahren bzw. Zurücksetzen einschließen.

Auf dieser Grundlage ergeben sich für das weitere Vorgehen die folgenden Szenarien:

- Fahrt ohne Beeinflussung durch Vorausfahrende: Ein Fahrzeug folgt den Fahrstreifenmarkierungen ohne Beeinflussung durch ein vorausfahrendes Fahrzeug;
- Annäherung an ein stehendes Objekt: Ein Fahrzeug fährt auf ein stehendes Objekt zu, dass sich auf dem Fahrstreifen befindet;
- Annäherung an ein sich lateral zur Fahrbahn bewegendes Objekt: Ein Fahrzeug fährt auf ein sich lateral bewegendes Objekt (z. B. Fußgänger) zu;
- Annäherung an ein Vorderfahrzeug: Ein Fahrzeug fährt auf ein sich langsamer bewegendes Vorderfahrzeug auf;

Fahrszenario	Reichart	Chaloupka	Nagel	Vollrath	Verwey	Ebner	GDV
Quellen	[REICHART (2001)]	[CHALOUPKA et al. (1998)]	[NAGEL (1994)]	[VOLLRATH et al. (2005)]	[VERWEY (2000)]	[EBNER (2014)]	[GDV (1998)]
Freie Fahrt	•	•	•			•	•
Reaktion auf Hindernis	•	•					•
Auffahren/ Annäherung			•				•
Folgen	•		•			•	•
Überholen	•	•	•	•			•
Abbiegen	•	•	•		•	•	•
Kreuzen	•	•	•	•	•	•	•
Fahrstreifenwechsel	•	•	•	•		•	•
Wenden	•		•	•		•	•
Rückwärts fahren	•		•	•		•	•
Anhalten/ Stand			•	•			•
Anfahren/ Weiterfahren		•	•	•			•
Einparken			•	•		•	•
Ausparken			•	•		•	•
Kurvenfahrt		•			•		•

Tab. 3-1: Szenarienklassifikationen aus der Literatur basierend auf [EBNER (2014)]

- Fahren im Stau: Ein Fahrzeug fährt auf eine stehende bzw. sich langsam bewegende Fahrzeugkolonne auf;
- Einscheren eines anderen Fahrzeugs: Ein Fahrzeug möchte in den Fahrstreifen eines anderen Fahrzeugs wechseln. Dabei bewegt sich das einscherende Fahrzeug langsamer als das passive Fahrzeug;
- Einfacher Fahrstreifenwechsel: Ein Fahrzeug verlässt den eigenen Fahrstreifen und wechselt auf einen benachbarten Fahrstreifen;
- Überholen (Gegenverkehr): Ein Fahrzeug folgt dem eigenen Fahrstreifen während ein Fahrzeug der Gegenfahrbahn auf den Fahrstreifen des ersten Fahrzeugs wechselt und später wieder einscheren möchte;
- Einbiegen/Abbiegen: Ein Fahrzeug biegt an einer Kreuzung ein oder ab, während sich ein zweites Fahrzeug mit potenziellem Konflikt im Knotenpunktbereich befindet;
- Kreuzen: Ein Fahrzeug kreuzt einen Knotenpunkt, während sich ein zweites Fahrzeug mit potenziellem Konflikt im Knotenpunkt befindet;
- Wenden: Ein Fahrzeug wendet auf der Straße, um in eine andere Richtung zu fahren;
- Parken.

Auf Grundlage dieser Szenarien werden die zu untersuchenden Funktionen beschrieben.

3.2 Betrachtete automatisierte Fahrfunktionen

Zur Analyse des Potenzials automatisierter Fahrfunktionen werden diese basierend auf dem aktuellen Stand und hinsichtlich ihres Funktionsumfangs (die durch die Funktion abgedeckten Szenarien) sowie ihrer technischen Ausprägung und Limitierung beschrieben. Die Fahrfunktionen werden hierzu basierend auf dem aktuellen Stand einzeln erläutert.

In diesem Zusammenhang sind fünf verschiedene automatisierte Fahrfunktionen der Automatisierungsstufen 3 und 4 definiert. Die einzelnen zu betrachtenden automatisierten Fahrfunktionen sind:

- Stau-Chauffeur,
- Autobahn-Chauffeur,

- Pendlers-Chauffeur,
- Universal-Chauffeur,
- Urbanes Roboter-Taxi.

Ein Überblick über die untersuchten automatisierten Fahrfunktionen und die adressierten Szenarien ist in Tabelle 3-2 gegeben. Neben den automatisierten Fahrfunktionen sind die zusätzlich durch die Fahrerassistenzpakete adressierten Szenarien mit FAS gekennzeichnet.

Neben den adressierten Szenarien weisen die automatisierten Fahrfunktionen allerdings weitere Beschränkungen auf. Diese bestehen zum einen aus der Straßenart, die die Domäne der jeweiligen Funktionen definiert. Zum anderen ist der Operationsbereich der Funktionen auch durch eine maximale Geschwindigkeit begrenzt. Hinsichtlich der Straßenart wäre theoretisch eine Unterscheidung in Autobahnen und autobahnähnliche Straßen, Landstraßen mit eindeutiger Fahrstreifenzuordnung durch Fahrstreifenbegrenzungen oder Leitlinien und Landstraßen ohne Leitlinien zur Trennung der Fahrtrichtungen sinnvoll. Da diese Differenzierung üblicherweise nicht vorgehalten wird, erfolgt an dieser Stelle ersatzweise eine Bezug auf die Widmung und damit die Straßenklasse. Die adressierten Straßenklassen sowie die Höchstgeschwindigkeiten sind in Tabelle 3-3 dargestellt.

Weitere Einschränkungen der automatisierten Fahrfunktionen sind durch die Sensorsichtbereiche gegeben, die in Tabelle 3-4 dargestellt sind. Darüber hinaus wird angenommen, dass alle beschriebenen Funktionen der Automatisierungsstufe 3 unter folgenden Umweltbedingungen nicht arbeiten:

- Starker Niederschlag (Regen und Schnee),
- Nebel.

Weiterhin wird im Rahmen der Betrachtungen davon ausgegangen, dass folgende Straßenbedingungen nicht von Funktionen der Automatisierungsstufe 3 adressiert werden:

- Glatteis,
- Arbeitsstellen,
- Keine Fahrstreifenmarkierungen.

Es ist zu beachten, dass die zuvor aufgeführten Einschränkungen nur für die aufgeführten automatisierten Fahrfunktionen gelten, nicht jedoch für die zusätzlich betrachteten Fahrerassistenzsysteme. Die Funktionsdefinitionen der Fahrerassistenzsysteme sind in Kapitel 3.3 zu finden.

Die betrachteten automatisierten Fahrfunktionen sind mit Automatisierungsstufe, Sensorerfassungsbereich, Funktionsgrenzen und abgedeckten Szenarien in den Kapiteln 3.2.1 bis 3.2.5 aufgeführt.

Nr.		1	2	3	4	5
Name		Stau-Chauffeur	Autobahn-Chauffeur	Pendler-Chauffeur	Universal-Chauffeur	Urbanes Roboter-Taxi
Fahrzeugart		Pkw	Pkw	Pkw	Pkw	Pkw
Automatisierungsstufe		3	3	3	3	4
Szenarien	Fahrt ohne Beeinflussung durch Vorderfahrzeug	x	x	x	x	x
	Annäherung an ein stehendes Objekt	x	x	x	x	x
	Annäherung an ein sich lateral zur Fahrbahn bewegendes Objekt	FAS	FAS	x	x	x
	Annäherung an ein Vorderfahrzeug	x	x	x	x	x
	Fahren im Stau	x	x	x	x	x
	Einscheren eines anderen Fahrzeuges	x	x	x	x	x
	Einfacher FSWE		x	x	x	x
	Überholen (Gegenverkehr)					
	Einbiegen/Abbiegen				x	x
	Kreuzen				x	x
	Wenden					x

Tab. 3-2: Betrachtete automatisierte Fahrfunktionen mit abgedeckten Szenarien

Nr.		1	2	3	4	5	
Name		Stau-Chauffeur	Autobahn-Chauffeur	Pendler-Chauffeur	Universal-Chauffeur	Urbanes Roboter-Taxi	
Fahrzeugart		Pkw	Pkw	Pkw	Pkw	Pkw	
Automatisierungsstufe		3	3	3	3	4	
Straßenklasse mit maximaler Geschwindigkeit	außerorts	Autobahnen	60	130	130	160	
		Bundesstraßen	FAS	FAS	100	100	
		Landesstraßen	FAS	FAS	FAS	100	
		Kreisstraßen	FAS	FAS	FAS		
		Gemeindestraßen oder andere Straßen	FAS	FAS	FAS		
	innerorts	Bundesstraßen	FAS	FAS	FAS	50	(50)
		Landesstraßen	FAS	FAS	FAS	50	50
		Kreisstraßen	FAS	FAS	FAS	50	50
		Gemeindestraßen oder andere Straßen	FAS	FAS	FAS	50	50

Tab. 3-3: Straßenklassen der betrachteten automatisierten Fahrfunktionen mit Angabe der maximalen Geschwindigkeit (in km/h)

Nr.		1	2	3	4	5	
Name		Stau-Chauffeur	Autobahn-Chauffeur	Pendler-Chauffeur	Universal-Chauffeur	Urbanes Roboter-Taxi	
Fahrzeugart		Pkw	Pkw	Pkw	Pkw	Pkw	
Automatisierungsstufe		3	3	3	3	4	
Sensorreichweite	Vorne (fern)	Longitudinal	200 m	200 m	200 m	200 m	250 m
	Vorne (fern)	Lateral	10 m	10 m	10 m	10 m	20 m
	Vorne (fern)	Öffnungswinkel	20°	20°	20°	20°	30°
	Vorne (mittel/nah)	Longitudinal	80 m	80 m	80 m	80 m	100 m
	Vorne (mittel/nah)	Lateral	20 m				
	Vorne (mittel/nah)	Öffnungswinkel	60°	60°	60°	60°	80°
	Seite (fern)	Lateral	-	-	-	80 m	80 m
	Seite (fern)	Öffnungswinkel	-	-	-	20°	60°
	Seite (nah)	Lateral	10 m	10 m	10 m	10 m	15 m
	Seite (nah)	Öffnungswinkel	Gesamte Fahrzeugbreite				
	Hinten (links)	Longitudinal	200 m	200 m	200 m	200 m	100 m
	Hinten (links)	Lateral	10 m	10 m	10 m	10 m	20 m
	Hinten (links)	Öffnungswinkel	20°	20°	20°	20°	80°
	Hinten (rechts)	Longitudinal	200 m	200 m	200 m	200 m	100 m
	Hinten (rechts)	Lateral	10 m	10 m	10 m	10 m	20 m
Hinten (rechts)	Öffnungswinkel	20°	20°	20°	20°	80°	
Weitere Einschränkungen		Nicht in Baustellen, bei Straßenglätte oder starker Sichtweiteinschränkung				-	

Tab. 3-4: Sensorsichtbereiche und weitere Einschränkungen der automatisierten Fahrfunktionen

3.2.1 Stau-Chauffeur

Parameter	Ausprägung
Bezeichnung	Stau-Chauffeur
Beschreibung	Funktion, die Folgefahrt im Stau realisiert.
Automatisierungsstufe	3
Sensorerfassungsbereich	
Szenarien	<ul style="list-style-type: none"> • Fahrt ohne Beeinflussung durch Vorderfahrzeug, • Annäherung an ein stehendes Objekt, • Annäherung an ein Vorderfahrzeug, • Fahren im Stau, • Einscheren eines anderen Fahrzeuges.
Straßenklasse und Geschwindigkeitsbereich	<ul style="list-style-type: none"> • Autobahnen: 0 – 60 km/h
Funktionsgrenzen	<ul style="list-style-type: none"> • Umweltbedingungen: alle, außer starker Niederschlag (Regen und Schnee) und Nebel, • Straßenbedingungen: kein Glatteis, keine Baustellen.

Tab. 3-5: Übersicht über die Funktionen des Stau-Chauffeurs

3.2.2 Autobahn-Chauffeur

Parameter	Ausprägung
Bezeichnung	Autobahn-Chauffeur
Beschreibung	Funktion, die eine automatisierte Autobahnfahrt realisiert.
Automatisierungsstufe	3
Sensorerfassungsbereich	
Szenarien	<ul style="list-style-type: none"> • Fahrt ohne Beeinflussung durch Vorderfahrzeug, • Annäherung an ein stehendes Objekt, • Annäherung an ein Vorderfahrzeug, • Fahren im Stau, • Einscheren eines anderen Fahrzeuges, • einfacher Fahrstreifenwechsel.
Straßenklasse und Geschwindigkeitsbereich	<ul style="list-style-type: none"> • Autobahnen: 0 – 130 km/h
Funktionsgrenzen	<ul style="list-style-type: none"> • Umweltbedingungen: alle, außer starker Niederschlag (Regen und Schnee) und Nebel, • Straßenbedingungen: kein Glatteis, keine Baustellen.

Tab. 3-6: Übersicht über die Funktionen des Autobahn-Chauffeurs

3.2.3 Pendler-Chauffeur

Parameter	Ausprägung
Bezeichnung	Pendler-Chauffeur
Beschreibung	Funktion, die eine automatisierte Fahrt auf Autobahnen und Bundesstraßen realisiert.
Automatisierungsstufe	3
Sensorerfassungsbereich	<p>Das Diagramm zeigt ein zentrales Fahrzeug mit vier Sensoren. Die Sensoren nach vorne und hinten haben eine Reichweite von 10 m und einen Winkel von 20°. Die Sensoren nach links und rechts haben eine Reichweite von 200 m und einen Winkel von 20°. Ein Pfeil unter dem Fahrzeug zeigt die Fahrtrichtung an.</p>
Szenarien	<ul style="list-style-type: none"> • Fahrt ohne Beeinflussung durch Vorderfahrzeug, • Annäherung an ein stehendes Objekt, • Annäherung an ein sich lateral zur Fahrbahn bewegendes Objekt, • Annäherung an ein Vorderfahrzeug, • Fahren im Stau, • Einscheren eines anderen Fahrzeuges, • einfacher Fahrstreifenwechsel.
Straßenklasse und Geschwindigkeitsbereich	<ul style="list-style-type: none"> • Autobahnen: 0 – 130 km/h, • Bundesstraßen (außerorts): 0 – 100 km/h.
Funktionsgrenzen	<ul style="list-style-type: none"> • Umweltbedingungen: alle, außer starker Niederschlag (Regen und Schnee) und Nebel, • Straßenbedingungen: kein Glatteis, keine Baustellen.

Tab. 3-7: Übersicht über die Funktionen des Pendler-Chauffeurs

3.2.4 Universal-Chauffeur

Parameter	Ausprägung
Bezeichnung	Universal-Chauffeur
Beschreibung	Funktion, die eine automatisierte Fahrt auf Autobahnen, Bundesstraßen und Stadtstraßen (Hauptverkehrsadern, Innenstadt mit Wohnvierteln) realisiert.
Automatisierungsstufe	3
Sensorerfassungsbereich	
Szenarien	<ul style="list-style-type: none"> • Fahrt ohne Beeinflussung durch Vorderfahrzeug, • Annäherung an ein stehendes Objekt, • Annäherung an ein sich lateral zur Fahrbahn bewegendes Objekt, • Annäherung an ein Vorderfahrzeug, • Fahren im Stau, • Einbiegen/Abbiegen, • Kreuzen.
Straßenklasse und Geschwindigkeitsbereich	<ul style="list-style-type: none"> • Autobahnen: 0 – 160 km/h, • Bundesstraßen <ul style="list-style-type: none"> - außerorts: 0 – 100 km/h, - innerorts: 0 – 50 km/h. • Landesstraßen <ul style="list-style-type: none"> - außerorts: 0 – 100 km/h, - innerorts: 0 – 50 km/h. • Kreisstraßen (innerorts): 0 – 50 km/h, • Gemeindestraßen und andere Straßen (innerorts): 0 – 50 km/h.
Funktionsgrenzen	<ul style="list-style-type: none"> • Umweltbedingungen: alle, außer starker Niederschlag (Regen und Schnee) und Nebel, • Straßenbedingungen: kein Glatteis, keine Baustellen.

Tab. 3-8: Übersicht über die Funktionen des Universal-Chauffeurs

3.2.5 Urbanes Roboter-Taxi

Parameter	Ausprägung
Bezeichnung	Urbanes Roboter-Taxi
Beschreibung	Funktion, die eine automatisierte Fahrt im urbanen Umfeld auf Stadtstraßen (inkl. Wohnvierteln) realisiert.
Automatisierungsstufe	4
Sensorerfassungsbereich	
Szenarien	<ul style="list-style-type: none"> • Fahrt ohne Beeinflussung durch Vorderfahrzeug, • Annäherung an ein stehendes Objekt, • Annäherung an ein sich lateral zur Fahrbahn bewegendes Objekt, • Annäherung an ein Vorderfahrzeug, • Fahren im Stau, • Einscheren eines anderen Fahrzeuges, • einfacher Fahrstreifenwechsel, • Einbiegen/Abbiegen, • Kreuzen, • Wenden.
Straßenklasse und Geschwindigkeitsbereich	<ul style="list-style-type: none"> • Bundesstraßen (innerorts): 0 – 50 km/h, • Landesstraßen (innerorts): 0 – 50 km/h, • Kreisstraßen (innerorts): 0 – 50 km/h, • Gemeindestraßen und andere Straßen (innerorts): 0 – 50 km/h.
Funktionsgrenzen	Keine

Tab. 3-9: Übersicht über die Funktionen des Urbanen Roboter-Taxis

3.3 Betrachtete Fahrerassistenzsysteme (FAS)

Wie schon bei der Beschreibung der automatisierten Fahrfunktionen dargestellt, werden zusätzlich auch Fahrerassistenzsysteme der Automatisierungsstufe 1 betrachtet. Diese werden in einem FAS-Paket zusammengefasst und einzelnen automatisierten Fahrfunktionen, wie dem Stau-Chauffeur, Autobahn-Chauffeur und Pendler-Chauffeur, zugeordnet. Denn neben der unfallvermeidenden Wirkung der jeweiligen automatisierten Fahrfunktionen ist eine solche Wirkung auch von Fahrerassistenzsystemen zu erwarten, die zusätzlich zu den automatisierten Fahrfunktionen wirken, z. B. bei Auffahrtszenarien in urbanen Umgebungen. Es werden die folgenden Fahrerassistenzsysteme betrachtet:

- Auffahrwarnfunktion (FCW) und autonome Notbremse (AEB),
- Spurverlassens-Warnfunktion und Spurhaltefunktion (LDW),
- Totwinkelassistent (BLS),
- Abstandsregeltempomat (ACC).

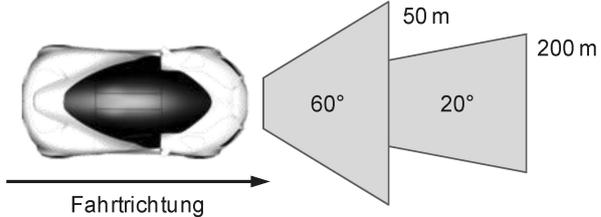
Diese Fahrerassistenzsysteme werden zu FAS-Paketen zusammengefasst und den automatisierten Fahrfunktionen zugeordnet. Es werden daher zusätzlich die folgenden Fahrerassistenzpakete betrachtet:

- FAS-Paket des Stau-Chauffeurs,
- FAS-Paket des Autobahn-Chauffeurs,
- FAS-Paket des Pendler-Chauffeurs.

Die FAS-Pakete wirken dabei auf allen Straßenklassen außerhalb der Wirkfelder des Stau-, Autobahn-, oder Pendler-Chauffeurs. Dies bedeutet, dass die FAS-Pakete auch auf Autobahnen, allerdings über den Geschwindigkeitsbereichen der automatisierten Fahrfunktionen operieren. Die von den FAS-Paketen adressierten Szenarien entsprechen denen der jeweiligen automatisierten Fahrfunktionen inklusive der Szenarien, die in der Übersicht mit FAS gekennzeichnet sind. Eine Übersicht der durch die Funktionen adressierten Szenarien ist in Tabelle 3-2 dargestellt.

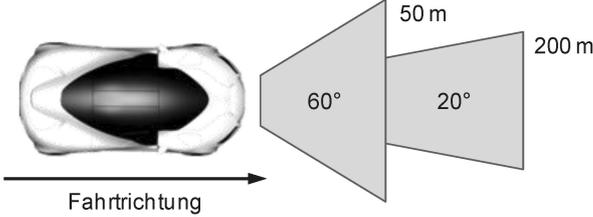
Einen Überblick über die betrachteten Fahrerassistenzsysteme geben die folgenden Tabellen. Sie haben nach oben keine Geschwindigkeitsbeschränkungen.

3.3.1 Auffahrwarnfunktion (FCW) und autonome Notbremse (AEB)

Parameter	Ausprägung
Bezeichnung	Auffahrwarnfunktion (FCW) und autonome Notbremse (AEB)
Beschreibung	Funktion gibt eine Warnung bei einer drohenden Kollision aus. Der Fahrer reagiert mit einer stochastischen Reaktionszeit auf die Warnung. Bei der autonomen Notbremsfunktion führt das System ein Kollisionsvermeidungsmanöver aus.
Automatisierungsstufe	1
Sensorerfassungsbereich	
Szenarien	Szenarien, die von der entsprechenden automatisierten Fahrfunktion adressiert werden.
Straßenklasse	<ul style="list-style-type: none"> • Autobahnen, • Bundesstraßen, • Landesstraßen, • Kreisstraßen, • Gemeindestraßen und andere Straßen.
Funktionsgrenzen	Keine

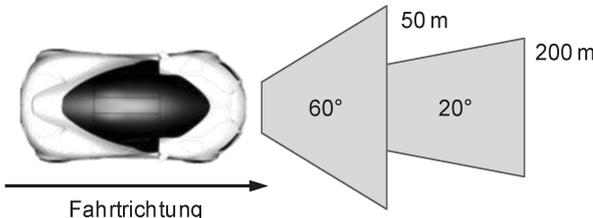
Tab. 3-10: Übersicht: Auffahrwarnfunktion (FCW) und autonome Notbremse (AEB)

3.3.2 Spurverlassens-Warnfunktion und Spurhaltefunktion (LDW)

Parameter	Ausprägung
Bezeichnung	Spurverlassens-Warnfunktion und Spurhaltefunktion (LDW)
Beschreibung	Funktion gibt eine Warnung bei Verlassen der Spur aus. Der Fahrer reagiert mit einer stochastischen Reaktionszeit auf die Warnung. Bei der Spurhaltefunktion übernimmt das System die Querführung.
Automatisierungsstufe	1
Sensorerfassungsbereich	
Szenarien	Szenarien, die von der entsprechenden automatisierten Fahrfunktion adressiert werden.
Straßenklasse	<ul style="list-style-type: none"> • Autobahnen, • Bundesstraßen, • Landesstraßen, • Kreisstraßen, • Gemeindestraßen und andere Straßen.
Funktionsgrenzen	Keine

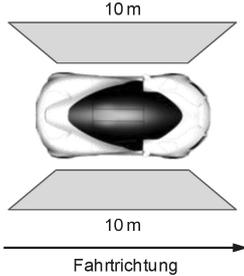
Tab. 3-11: Übersicht: Spurverlassens-Warnfunktion und Spurhaltefunktion (LDW)

3.3.3 Abstandsregeltempomat (ACC)

Parameter	Ausprägung
Bezeichnung	Abstandsregeltempomat (ACC)
Beschreibung	Funktion hält automatisch eine eingestellte Zeitlücke zu dem vorausfahrenden Fahrzeug. Die Funktion arbeitet in einem Geschwindigkeitsbereich von 0 – 180 km/h.
Automatisierungsstufe	1
Sensorerfassungsbereich	
Szenarien	Szenarien, die von der entsprechenden automatisierten Fahrfunktion adressiert werden.
Straßenklasse	<ul style="list-style-type: none"> • Autobahnen, • Bundesstraßen, • Landesstraßen, • Kreisstraßen, • Gemeindestraßen und andere Straßen.
Funktionsgrenzen	Keine

Tab. 3-12: Übersicht: Abstandsregeltempomat (ACC)

3.3.4 Totwinkelassistent (BLS)

Parameter	Ausprägung
Bezeichnung	Totwinkelassistent (BLS)
Beschreibung	Funktion detektiert Fahrzeuge, die sich im toten Winkel des Fahrers des Ego-Fahrzeugs befinden und gibt eine Warnung aus. Der Fahrer reagiert mit einer stochastischen Reaktionszeit auf die Warnung.
Automatisierungsstufe	1
Sensorerfassungsbereich	
Szenarien	Szenarien, die von der entsprechenden automatisierten Fahrfunktion adressiert werden.
Straßenklasse	<ul style="list-style-type: none"> • Autobahnen, • Bundesstraßen, • Landesstraßen, • Kreisstraßen, • Gemeindestraßen und andere Straßen.
Funktionsgrenzen	Keine

Tab. 3-13: Übersicht: Totwinkelassistent (BLS)

3.4 Modellierung der betrachteten Fahrfunktionen

Da die Wirksamkeit der betrachteten automatisierten Fahrfunktionen und Fahrerassistenzsysteme durch Verwendung von Simulationen ermittelt wird, werden im Folgenden die den Funktionen zugrunde liegenden Parameter vorgestellt. Dabei wird zwischen den automatisierten Fahrfunktionen und den Fahrerassistenzsystemen unterschieden. Die aufgeführten Parameter sind auf Basis der Definitionen aus [BUSCH et al. (2017)] sowie auf Grundlage von Expertenwissen entstanden.

3.4.1 Modellierung der Algorithmik der automatisierten Fahrfunktionen

Die Wirksamkeit von automatisierten Fahrfunktionen hängt neben der verwendeten Sensorik maßgeblich von der eingesetzten Algorithmik ab. Da diese Funktionen – im Gegensatz zu Systemen der aktiven Sicherheit – kontinuierlich aktiv sind, führt dies auch zu einer Änderung des Auftretens bestimmter Verkehrsszenarien. Dabei sind diese Änderungen im Verkehrsgeschehen maßgeblich auf die Verhaltensentscheidung dieser Funktionen

zurückzuführen, die im Vergleich zur menschlichen Fahrerpopulation unterschiedlich sein kann. So ist eine Reduktion der Fahrstreifenwechsellagen oder auch eine Steigerung des Szenarios Einschleichen eines anderen Fahrzeuges denkbar. Im weiteren Verlauf werden die im Folgenden dargestellten Parameter der Algorithmik hinsichtlich der Verhaltensentscheidung auf Verkehrsebene verwendet. Dabei wird zwischen dem Längsverhalten und dem Verhalten für notwendige und normale Fahrstreifenwechsel unterschieden. Das Längsverhalten ist in Tabelle 3-14 dargestellt, das Fahrstreifenwechselverhalten in Tabelle 3-15 und Tabelle 3-16.

Neben dem Verhalten der automatisierten Fahrfunktion auf Verkehrsebene, das zu einer Änderung der Häufigkeiten bestimmter Verkehrsszenarien führen kann, ist das Verhalten der automatisierten Fahrfunktionen in kritischen Situationen von Bedeutung. Ein besonderer Vorteil der Fahrzeugautomatisierung ist hier, dass die Reaktionszeiten im Vergleich zu menschlichen Fahrern verkürzt sind. Dies führt zu einer unfallmindernden Wirkung in den entsprechenden Szenarien. Sollte die automatisierte Fahrfunktion in eine kritische Situation geraten, führt diese ein sogenanntes risikominimales Manöver durch. Ziel dieses Manövers ist es, das Fahrzeug in einen

Parameter	Erläuterung	Wert
Stillstandsabstand	Abstand zwischen stehenden Fahrzeugen	2 m
Zeitlücke	Zeitlücke zum Vorderfahrzeug	1,4 s
Reaktion auf Vorderfahrzeug	Reaktionsbeginn auf langsames Vorderfahrzeug	-8 s
Längs-Oszillation in der Folgefahrt	Kontinuierliche Variation des Abstandsverhaltens	keine
Stillstandsbeschleunigung	Wunschbeschleunigung aus dem Stillstand	3,5 m/s ²
Wunschbeschleunigung 80 km/h	Wunschbeschleunigung bei 80 km/h	1,5 m/s ²

Tab. 3-14: Längsverhalten der automatisierten Fahrfunktion auf Verkehrsebene

Parameter	Erläuterung	Wert	
Grundverhalten	-	Rechtsfahrgebot	
Notwendiger FSWE	Maximale Verzögerung (eigene)	Maximale Verzögerung für FSWE aufgrund der vorgegebenen Routen für das eigene überholende Fahrzeug	-4 m/s ²
	Maximale Verzögerung (Folgefahrzeug)	Obergrenzen der Verzögerung für das Folgefahrzeug bei einem FSWE	-3 m/s ²
	Akzeptierte Verzögerung (eigene)	Untergrenzen der Verzögerung für das eigene Fahrzeug bei einem FSWE	-1 m/s ²
	Akzeptierte Verzögerung (Folgefahrzeug)	Untergrenzen der Verzögerung für das Folgefahrzeug bei einem FSWE	-0,75 m/s ²
Minimum Nettoweglücke (vorne/hinten)	Mindestabstand, der nach einem FSWE zwischen zwei Fahrzeugen mindestens vorhanden sein muss	1 m	

Tab. 3-15: Querverhalten der automatisierten Fahrfunktion für notwendige Fahrstreifenwechsel auf Verkehrsebene

Parameter	Erläuterung	Wert
Auf langsameren Fahrstreifen, wenn Kollisionszeit mindestens	Mindestabstand in Sekunden, der zu einem Vorderfahrzeug auf dem langsameren Fahrstreifen vorhanden sein muss, damit ein überholendes Fahrzeug auf den langsameren Fahrstreifen wechselt	8 s
Faktor für reduzierten Sicherheitsabstand	Abstandsfaktor, der beim FSWE ausreichend ist	0,6
Maximalverzögerung für kooperatives Bremsen	Maximale Verzögerung, die Fahrer wählen würden, um einen anderen Fahrer einsichern zu lassen	-3 m/s ²
Kooperativer FSWE	Fahrer wechselt Fahrstreifen, um anderen Fahrer einsichern zu lassen	Ja
Maximum Geschwindigkeitsdifferenz für kooperative FSWE	Maximale Geschwindigkeitsdifferenz bei der ein kooperativer FSWE noch durchgeführt wird	10,8 km/h

Tab. 3-16: Querverhalten für Fahrstreifenwechsel der automatisierten Fahrfunktion auf Verkehrsebene

unkritischen Zustand zu führen, in dem die Geschwindigkeit reduziert wird. Dies wird über eine Zielbremsung realisiert, die ab einer Time-to-Collision $< TTC_{krit} = 2,5$ s ausgeführt wird. Die notwendige Längsbeschleunigung $a_{notwendig}$ zur Vermeidung der Kollision wird dabei durch den in Gleichung 3-1 beschriebenen Zusammenhang berechnet:

$$a_{notwendig} = - \frac{v_{rel}^2}{2(d_{rel} - d_{Ziel})} \quad (\text{Gl. 3-1})$$

Wobei v_{rel} die Relativgeschwindigkeit, d_{rel} die aktuelle Relativedistanz und d_{Ziel} die angestrebte Zieldistanz ist.

3.4.2 Modellierung der Fahrerassistenzsysteme

Wie bereits aufgeführt, werden neben den automatisierten Fahrfunktionen auch Fahrerassistenzsysteme betrachtet. Hierbei wird hinsichtlich der Algorithmik zwischen der Auffahrwarnfunktion (FCW) und autonomen Notbremse (AEB), der Spurverlassens-Warnfunktion und Spurhaltefunktion (LDW), dem Totwinkelassistent (BLS) und dem Abstandsregeltempomat (ACC) unterschieden.

Auffahrwarnfunktion (FCW) und autonome Notbremse (AEB)

Hinsichtlich der Modellierung der Auffahrwarnfunktion (FCW) und autonomen Notbremse (AEB) in der Simulation wird ein mehrstufiges Warn- und Auslösekonzept verwendet. Dabei erfolgt zunächst eine Warnung (FCW) des Fahrers bei Unterschreiten der in Bild 3-2 dargestellten Auslöseschwellen. Daraufhin wird die auf die Warnung folgende Fahrerreaktion wie in Tabelle 3-17 dargestellt in Reaktionszeit und -stärke stochastisch modelliert.

Sollte das Fahrermodell bis zu den in Bild 3-2 definierten TTC-Schwellenwerten nicht auf die Warnung reagieren, führt die Funktion eine Teilbremsung mit einer Verzögerung von $a_x = -0,3 \text{ g}$ aus. Sollte dies nicht ausreichen, um die Kollision zu vermeiden, sodass die in Bild 3-2 dargestellten TTC-Auslöse-

	Mittelwert	Standardabweichung
Reaktionszeit	0,95 s	0,5 s
Eingriffsstärke	-7,5 m/s ²	0,5 m/s ²

Tab. 3-17: Fahrerparameter für FCW/AEB Modell

schwellen für die Vollbremsung unterschritten werden, führt das System anschließend eine Vollbremsung durch.

Abstandsregeltempomat (ACC)

Weiterhin wird auch der Abstandsregeltempomat untersucht (ACC). Dieses System übernimmt während der Fahrt die Aufgabe der Längsregelung und kann daher eine definierte Zeitlücke t_{ZL} regeln. Dabei kann die Höchstgeschwindigkeit der Funktion vom Fahrer selbst gewählt werden. Vor diesem Hintergrund ist insbesondere die gewählte Zeitlücke dieser Funktion von Bedeutung, für die im Folgenden $t_{ZL} = 1,4 \text{ s}$ gewählt worden ist. Alle weiteren Parameter dieser Funktion sind in Tabelle 3-18 zu erkennen.

Spurverlassens-Warnfunktion und Spurhaltefunktion (LDW)

Die Spurverlassens-Warnfunktion wird in der Regel über eine Monokamera realisiert, die die Fahrstreifenmarkierungen erfasst und beim unbeabsichtigten Überschreiten dieser ein akustisches oder hap-

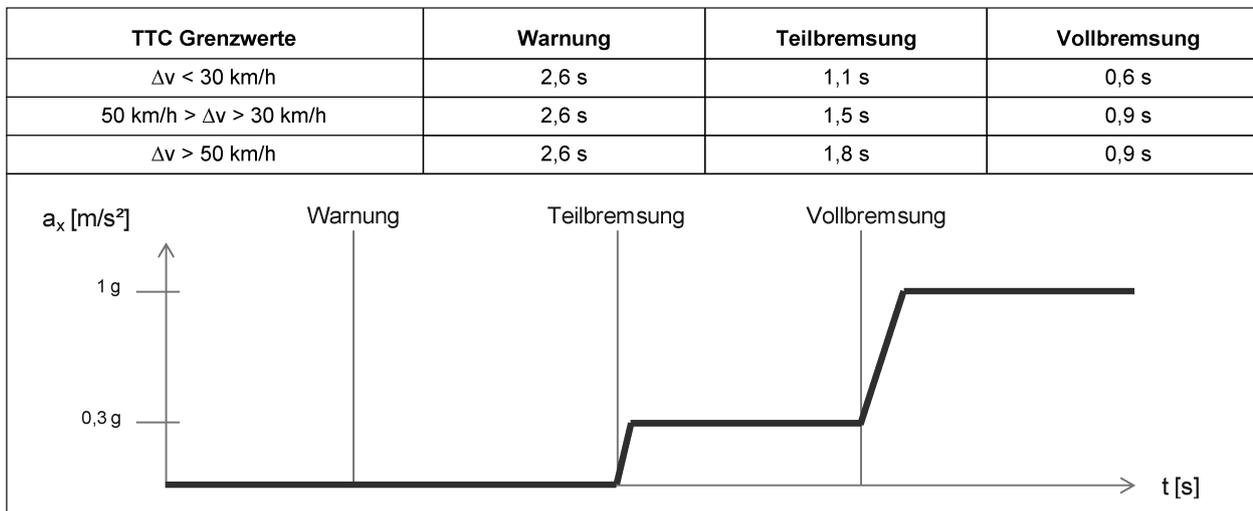


Bild 3-2: Auslöseschwellen der Auffahrwarnfunktion (FCW) und der autonomen Notbremse (AEB)

Parameter	Erläuterung	Wert
Stillstandsabstand	Abstand zwischen stehenden Fahrzeugen	2 m
Zeitlücke	Zeitlücke zum Vorderfahrzeug	1,4 s
Reaktion auf Vorderfahrzeug	Reaktionsbeginn auf langsames Vorderfahrzeug	-8 s
Längs-Oszillation in der Fahrgasse	Kontinuierliche Variation des Abstandsverhaltens	keine
Stillstandsbeschleunigung	Wunschbeschleunigung aus dem Stillstand	3,5 m/s ²
Wunschbeschleunigung 80 km/h	Wunschbeschleunigung bei 80 km/h	1,5 m/s ²

Tab. 3-18: Parametrierung des Abstandsregeltempomaten (ACC) für das FAS-Paket

tisches Warnsignal ausgibt. Die Spurhaltefunktion (LDW) hingegen führt eine Querregelung des Fahrzeugs auf die Fahrstreifenmitte aus. Bei Betrachtung dieser Funktionen als Teil des FAS-Paketes wird im Rahmen dieses Projektes davon ausgegangen, dass die Funktion alle Fahrnfälle, d. h. alle Unfälle des Szenarios Fahrt ohne Beeinflussung durch Vorderfahrzeug, vermeiden kann.

Totwinkelassistent (BLS)

Der Totwinkelassistent (BLS) als Teil des FAS-Paketes ist in der Lage, den Fahrer beim Fahrstreifenwechseln zu unterstützen. Mittels Radarsensor, Kamera oder Laserscanner werden bei Betätigung des Fahrtrichtungsanzeigers die Fahrzeuge auf dem Nachbarfahrstreifen beobachtet. Sollte eine mögliche kritische Situation prädiziert werden, wird der Fahrer durch ein Warnsignal auf die Situation aufmerksam gemacht. Im Rahmen dieses Projektes wird davon ausgegangen, dass durch diese Funktion alle Unfälle des Szenarios Fahrstreifenwechsel vermieden werden können.

3.4.3 Modellierung der Bremsverzögerung in kritischen Szenarien

Die Dynamik des Bremssystems der betrachteten Fahrzeuge ist mit Latenzen behaftet. Daher wird ein linearer Aufbau der Bremsverzögerung auf die maximale Verzögerung von $a_{x,max} = -9,81 \text{ ms}^{-2}$ über einem Zeitraum von $t_{\text{Aufbau}} = 250 \text{ ms}$ vorgesehen. Der Zusammenhang ist in Bild 3-3 dargestellt.

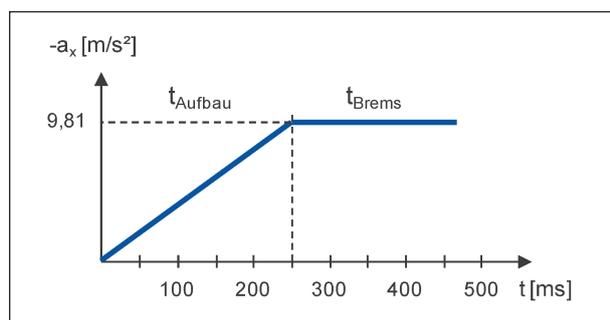


Bild 3-3: Modellierung der Aktordynamik für die Fahrsituationsimulation

4 Methodisches Vorgehen

In diesem Kapitel wird die methodische Vorgehensweise dargestellt, mit der die Potenziale der Fahrzeugautomatisierung hinsichtlich der Verkehrssicherheit sowie des Energiebedarfs und der Verkehrseffizienz identifiziert werden. Dabei wird zunächst der Forschungsansatz zur Wirksamkeitsbetrachtung hinsichtlich der Verkehrssicherheit dargestellt. Anschließend wird der Forschungsansatz zur Identifizierung der Potenziale hinsichtlich des Energiebedarfs und der Verkehrseffizienz vorgestellt.

4.1 Forschungsansatz zur Wirksamkeitsbetrachtung hinsichtlich der Verkehrssicherheit automatisierter Fahrfunktionen

Im ersten Schritt der Potenzialabschätzung hinsichtlich des Sicherheitsnutzens für automatisierte Funktionen werden zunächst in Kapitel 4.1.1 Marktdurchdringungsszenarien für die betrachteten Fahrfunktionen entwickelt. Hierzu werden auf Basis von Analogiebetrachtungen zu existierenden Fahrerassistenzsystemen (FAS) Szenarien zur Marktdurchdringung für einen kurzzeitigen und einen langfristigen Betrachtungshorizont beschrieben. Auf Grundlage dieser Betrachtung werden Marktdurchdringungsszenarien festgelegt, die anschließend detaillierter betrachtet werden.

Anschließend werden die Wirkfelder für verschiedene Schadensformen (Unfälle mit Personenschaden und schwerwiegende Unfälle mit Sachschaden) bestimmt, siehe Kapitel 4.1.2. Diese dienen zur Einschränkung der zu untersuchenden Unfälle. In diesen Wirkfeldern, d. h. in den von den betrachteten Funktionen adressierten Unfällen, wird daraufhin das Unfalländerungspotenzial der automatisierten Fahrfunktionen beschrieben. In diesem Zusammenhang wird neben der durch die automatisierten Fahrfunktionen induzierten Änderung der Wirkung in den Szenarien auch die Änderung der Auftretenshäufigkeiten betrachtet. Da automatisierte Fahrfunktionen – im Gegensatz zu Systemen der aktiven Sicherheit – kontinuierlich aktiv sind, ist es wahrscheinlich, dass die Auftretenshäufigkeiten bestimmter Unfallszenarien (z. B. Auffahrszenarien) reduziert werden. Im Gegenzug ist es allerdings auch denkbar, dass andere Unfallszenarien häufiger auftreten werden. Anschließend erfolgt eine Hochrechnung der Wirksamkeit der Funktionen auf

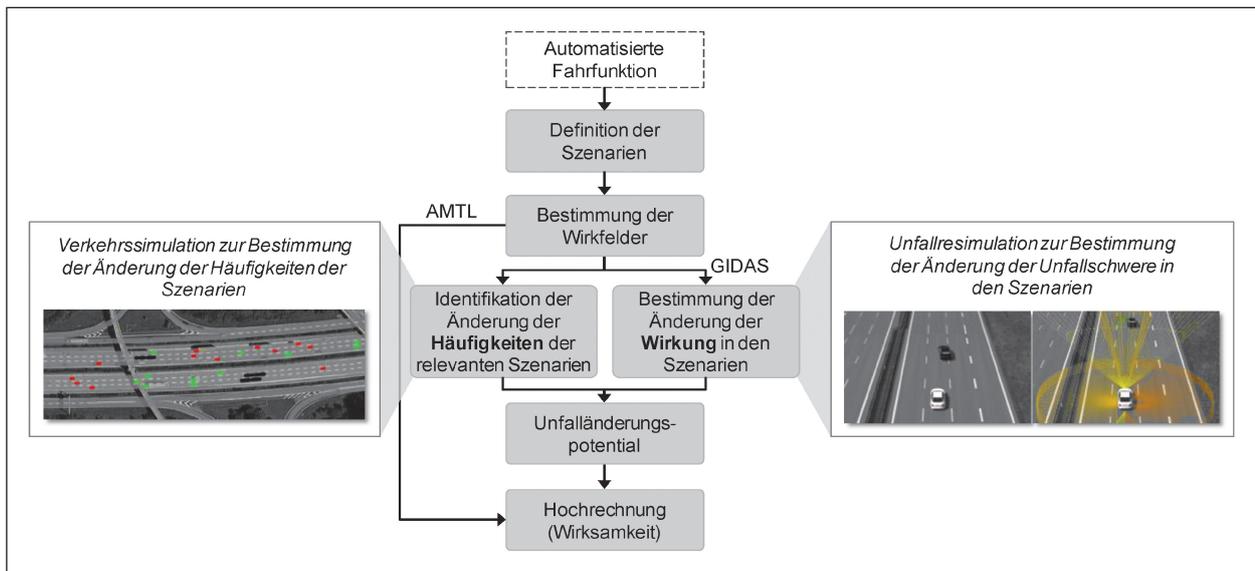


Bild 4-1: Methodisches Vorgehen zur Wirksamkeitsbetrachtung hinsichtlich der Verkehrssicherheit

nationale Ebene. Auf Grundlage von Simulationen – die die Betrachtung der positiven Effekte eines Systems zum Ziel haben – kann das zukünftige Unfallgeschehen basierend auf dem heutigen Unfallgeschehen quantifiziert werden. Es ist jedoch auch eine negative Veränderung des Unfallgeschehens durch automatisierte Fahrfunktionen vorstellbar (Entstehen neuer Unfallmechanismen). Der Identifikation und qualitativen Beschreibung dieser Unfälle bzw. Mechanismen widmet sich Kapitel 4.1.5. In diesem Zusammenhang wird ein typischer Fahrtverlauf sowie die darin auftretenden Szenarien ähnlich einer Gefahren- und Risikoanalyse systematisch betrachtet und hinsichtlich möglicher Risiken in Bezug auf Unfälle durch automatisierte Fahrfunktionen bewertet. In Bild 4-1 sind die resultierende methodische Vorgehensweise und die einzelnen Arbeitsschritte für den Aspekt der Verkehrssicherheit dargestellt.

4.1.1 Beschreibung der Marktdurchdringungsszenarien

Neben der technischen Wirksamkeit hängt der Einfluss automatisierter Fahrsysteme auf die Verkehrssicherheit auch von der Marktdurchdringung der Systeme bzw. ihrer Nutzung ab.

Analog dem Vorgehen in [BUSCH et al. (2017)] wird für die Prognose der Marktdurchdringung ein Ansatz gewählt, der auf der historischen Entwicklung der Durchdringungsraten von bereits verfügbaren Assistenzsystemen beruht. Ausgehend von den in Kapitel 3.2 beschriebenen Fahrfunktionen werden vergleichbare Systeme im Markt identifiziert. Dies

sind in erster Linie Fahrerassistenzsysteme (FAS). Basierend auf einer Analogiebetrachtung zu FAS erfolgt die Entwicklung von Prognosen zur Marktdurchdringung automatisierter Fahrfunktionen.

Das Ergebnis dieses Arbeitsschrittes ist eine Beschreibung verschiedener Marktdurchdringungsszenarien für die genannten Zeithorizonte.

Das Vorgehen baut dabei auf drei Schritten auf:

1. Analyse zum Pkw-Bestand in Deutschland,
2. Analyse der Marktdurchdringung bereits in den Markt eingeführter Systeme,
3. Berechnung der Marktdurchdringungsraten für unterschiedliche Fälle der Markteinführung automatisierter Fahrfunktionen.

Die Datenbasis für die Untersuchungen bilden zunächst die Zulassungszahlen des Kraftfahrt-Bundesamtes (KBA) nach Fahrzeugalter aus dem Jahr 2015 [KBA (2015)]. Auf Basis dieser Daten werden der Ausgangszustand (zugelassene Anzahl der Pkw) sowie die jeweilige Veränderung der Fahrzeuganzahl abhängig vom Fahrzeugalter bestimmt. Um diese zu bestimmen, wird zunächst die Reduktion der Fahrzeuge in jedem Jahr für jedes Fahrzeugalter (es wird ein Fahrzeugalter bis zu 20 Jahren berücksichtigt) über die vergangenen zwölf Jahre auf Basis der obengenannten Statistik des KBA bestimmt. Anschließend wird der Medianwert über die jährliche Reduktion mit gleichem Fahrzeugalter bestimmt. Die ermittelte Reduktion der Anzahl der Pkw während eines Jahres in Abhängigkeit des Alters

wird im dritten Schritt zur Prädiktion der Fahrzeugbestandes benötigt.

Im zweiten Schritt wird die Markteinführung von verschiedenen Fahrzeugsystemen im Markt betrachtet. Hierzu werden die Ergebnisse der folgenden Studien betrachtet:

- Marktdurchdringung von Fahrzeugsicherheitsystemen (FE 82.582) [FOLLMER et al. (2015)],
- Marktdurchdringung von Fahrzeugsicherheitsystemen (FE 82.0625) [GRUSCHWITZ et al. (2017)].

Beide Studien haben auf Basis von Kundenbefragungen die Marktdurchdringungsraten verschiedener Fahrzeugsysteme in den Jahren 2013 und 2015 untersucht. Neben diesen Daten wird auch das Jahr der Markteinführung der Systeme berücksichtigt.

Auf Grundlage dieser drei Wertepaare aus Marktdurchdringungsraten in den Jahren 2013 und 2015 sowie dem Jahr der Markteinführung wird mittels des Verfahrens der logistischen Regression die Marktdurchdringung verschiedener Systeme modelliert. Das Verfahren der logistischen Regression zur Prädiktion der Marktdurchdringungsraten ist bereits in den Studien des Highway Loss Data Institute [HLDI (2012)] und [HLDI (2014)] zur Analyse der Marktdurchdringung von Fahrzeugsystemen in den USA eingesetzt worden. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass eine höhere Anzahl an Datenpunkten zur Prädiktion der Verläufe wünschenswert wäre, um die Genauigkeit der Modelle zu steigern. Die mithilfe dieses Vorgehens für die betrachteten Systeme bestimmten Marktdurchdringungsraten werden in einem abschließenden Schritt in jährliche Einbauraten für die neuzugelassenen Fahrzeuge umgerechnet.

Im dritten und letzten Schritt erfolgt die Berechnung der Marktdurchdringungsraten für verschiedene Szenarien. Hierbei werden die Ergebnisse der beiden vorangegangenen Schritte genutzt und die Fahrzeugflotte für die nächsten 35 Jahre – bei einem Start in 2015 wäre dies 2050 – prädiziert. Die Fahrzeugflotte lässt sich aufteilen in Fahrzeuge, die mit einer automatisierten Fahrfunktion ausgestattet sind, und Fahrzeuge ohne dieses System. Zum Startzeitpunkt beträgt der Anteil der ausgestatteten Fahrzeuge 0 %.

Die Anzahl der jährlich neu zugelassenen Fahrzeuge ergibt sich aus der Differenz des Gesamtfahr-

zeugbestandes sowie der Anzahl der Fahrzeuge, die im Laufe des Jahres ausscheiden. Bezüglich der Entwicklung des Gesamtfahrzeugbestandes müssen Annahmen getroffen werden. Die in diesem Projekt getroffene Annahme ist, dass der Pkw-Bestand in den nächsten Jahren konstant bleibt. Prinzipiell ist aber auch eine Berücksichtigung einer Zunahme des gesamten Pkw-Bestandes, wie es in den letzten Jahren mit einer durchschnittlichen Steigerung von 1 % der Fall gewesen ist [KBA (2015)], möglich.

Bei den neu zugelassenen Fahrzeugen wird jeweils ein Anteil mit System und ein Anteil ohne das System berücksichtigt. Der Anteil der Fahrzeuge wird auf Basis der im zweiten Schritt berechneten Einbauraten bestimmt. Die Marktdurchdringungsrate ergibt sich für ein Jahr durch die Division der Fahrzeuge, die mit dem System ausgestattet sind, und der Anzahl aller Fahrzeuge.

4.1.2 Szenarienbasierte Identifikation der Wirkfelder

In diesem Kapitel wird die Methodik zur Identifizierung der Wirkfelder je Fahrfunktion erläutert. Das Wirkfeld je Fahrfunktion wird nach einem äquivalenten Vorgehen für zwei unterschiedliche Datengrundlagen ermittelt:

- amtliche Unfallstatistik,
- GIDAS-Datenbank.

Es ist grundsätzlich zwischen dem Wirkfeld auf Basis der amtlichen Unfalldaten und dem Wirkfeld auf Basis der GIDAS-Daten zu unterscheiden.

Das Wirkfeld auf Basis der amtlichen Unfalldaten dient zur Identifikation und Quantifizierung des Wirkfeldes der untersuchten Fahrfunktionen sowie der Hochrechnung der Wirksamkeit auf das deutsche Unfallgeschehen. Eine Übersicht über das Vorgehen gibt Bild 4-2.

Die Bestimmung des Wirkfeldes auf Basis der GIDAS-Datenbank liefert die Eingangsdaten in die Simulation in der die Unfalländerungspotenziale je funktionsabhängigem Szenario und unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Marktdurchdringungsraten bestimmt werden. Die Ermittlung dieses Wirkfeldes wird nach einem äquivalenten Vorgehen wie die Ermittlung des Wirkfeldes auf Basis der amtlichen Unfalldaten durchgeführt (vgl. Bild 4-2).

Auf Basis der amtlichen Unfallstatistik

Die Methodik sieht vor, zunächst auf Grundlage der szenarienbasierten Beschreibung der automatisierten Fahrfunktion die relevanten Unfalltypen zu identifizieren. Das hierdurch entstandene Wirkfeld der untersuchten automatisierten Fahrfunktion wird anschließend durch die Betrachtung des Operationsbereiches der Funktion weiter eingeschränkt. Als Ergebnis entsteht das Wirkfeld der untersuchten Fahrfunktionen.

Als Grundlage für die Ermittlung dienen

- die Systembeschreibungen der ausgewählten automatisierten Fahrfunktionen,
- die Deskription der Szenarien und
- die Unfalldaten der amtlichen Unfallstatistik.

Aufbauend auf der vorbereitenden Funktionsauswahl erfolgt die Bestimmung potenzieller Wirkfelder je betrachteter Fahrfunktion. Dafür werden in der Voranalyse für jedes Szenario die adressierten Unfalltypen identifiziert. Die Unfalltypen werden als Überlagerungskenngröße herangezogen, da sie den Verkehrsvorgang bzw. die Konfliktsituation beschreiben, aus denen ein Verkehrsunfall vorhergegangen ist. Die Unfalltypen werden in Form der dreistelligen Unfalltypen aus dem Merkblatt zur Örtlichen Unfalluntersuchung in Unfallkommissionen (M UKO, 2012) berücksichtigt.

Für das Szenario Fahrt ohne Beeinflussung durch Vorderfahrzeug lassen sich beispielsweise die Unfalltypen 101 und 102 zuordnen (siehe Bild 4-3).

Das Fahrzeug folgt ohne jegliche äußerliche Beeinflussung durch sonstige Fahrzeuge dem Fahrtverlauf. Der Unfall wurde durch den Verlust der Kontrolle über das Fahrzeug aufgrund von Besonderheiten des Querschnitts oder der Längsneigung (Kurve im Fall von Typen 101 und 102) verursacht, ohne dass andere Verkehrsteilnehmer dazu beigetragen haben.

Dem Szenario Annäherung an ein Vorderfahrzeug lassen sich die Unfalltypen 601, 602, 603 zuordnen (siehe Bild 4-4). Das Fahrzeug nähert sich einem vorausfahrenden zweiten Fahrzeug an. Der Unfall im Längsverkehr wurde ausgelöst durch einen Konflikt zwischen den sich in gleicher Richtung bewegenden Fahrzeugen.

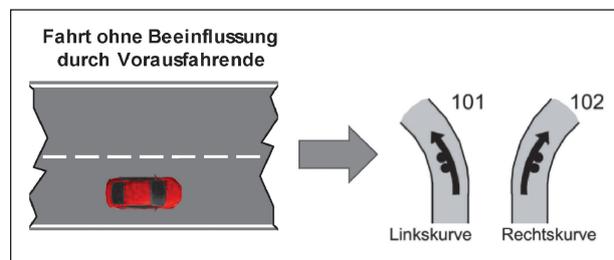


Bild 4-3: Beispiel 1 für Zuordnung Unfalltyp zu den Szenarien

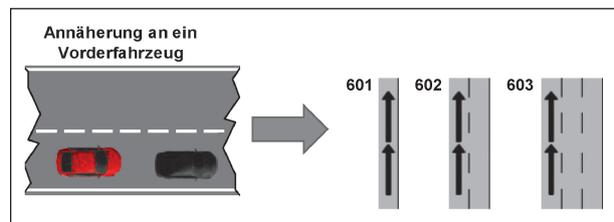


Bild 4-4: Beispiel 2 für Zuordnung Unfalltyp zu den Szenarien

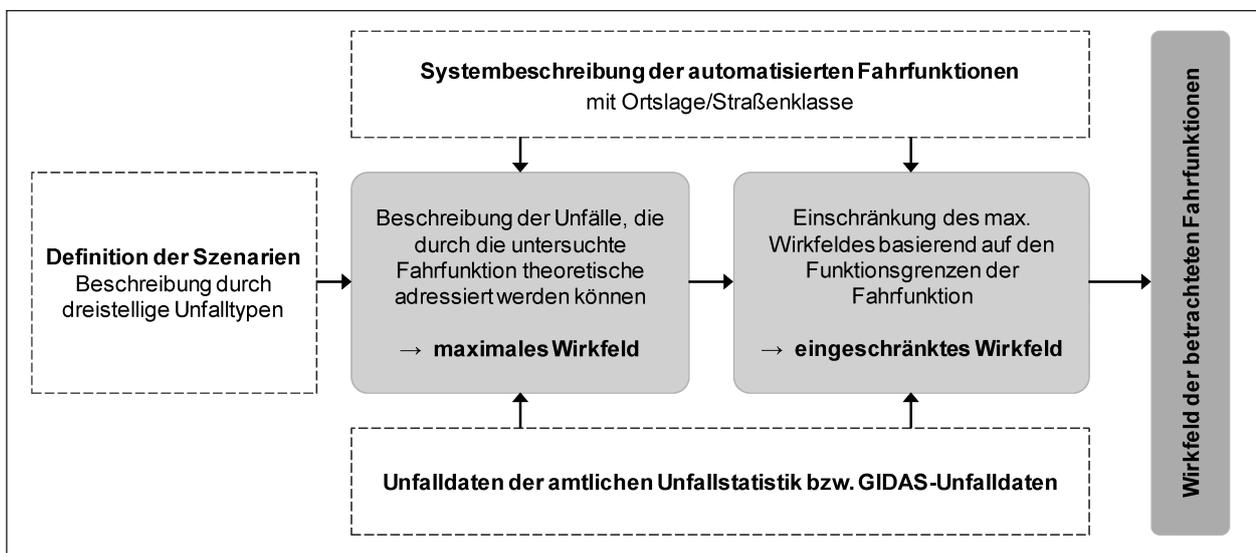


Bild 4-2: Vorgehen zur Identifikation der Wirkfelder

Aus Tabelle 4-1 lassen sich alle relevanten Unfalltypen der verschiedenen Szenarien ableiten.

Wie beschrieben, sind die Szenarien durch die dreistelligen Unfalltypen definiert. Die dreistelligen Unfalltypen liegen nicht für alle Unfälle der gesamten Bundesrepublik Deutschland vor, sondern nur für die Unfälle aus den fünf Bundesländern Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, Saarland und Sachsen-Anhalt. Aus diesem Grund werden die Wirkfelder zunächst auf Basis des Unfallgeschehens in diesen fünf Bundesländern ermittelt. In Kapitel 5.2.1 wird überprüft, ob die Unfall-

struktur dieser fünf Bundesländer für die Unfallstruktur Deutschlands repräsentativ ist.

Unter der Annahme, dass die Fahrfunktionen ohne Einschränkungen operieren können, erfolgt eine erste Quantifizierung der Wirkpotenziale, indem die Unfalltypen mit den Auftretenshäufigkeiten aus dem Datenbestand der amtlichen Straßenverkehrsunfallstatistik abgeglichen werden. Das Ergebnis ist das maximale Wirkfeld, d. h. die maximale Anzahl der Unfälle, die durch die untersuchten automatisierten Fahrfunktionen theoretisch adressiert werden können.

Szenario	Relevante Unfalltypen (dreistellig)
Fahrt ohne Beeinflussung durch Vorausfahrende	101, 102, 111, 112, 121, 122, 123, 131, 132, 141, 151, 152, 153, 161, 162, 163, 171, 172, 173, 181, 182, 183, 651, 681, 682.
Annäherung an ein stehendes Objekt	363, 364, 501, 502, 511, 512, 581, 582, 583, 584, 671, 672, 673, 674, 731, 732, 741, 742.
Annäherung an ein sich lateral zur Fahrbahn bewegendes Objekt	203, 221, 222, 223, 224, 225, 241, 242, 243, 244, 245, 272, 273, 274, 275, 282, 283, 284, 285, 341, 342, 343, 344, 361, 362, 371, 372, 373, 374, 401, 402, 403, 404, 405, 411, 412, 413, 414, 421, 422, 423, 424, 431, 432, 433, 434, 435, 436, 441, 442, 443, 444, 451, 452, 453, 454, 455, 461, 462, 463, 464, 465, 471, 472, 473, 481, 482, 483, 484, 491, 492, 493, 494, 751, 752, 753.
Annäherung an ein Vorderfahrzeug	201, 202, 231, 232, 601, 602, 603, 604, 621, 622, 623, 624.
Fahren im Stau	611, 612, 613, 614.
Einscheren eines anderen Fahrzeuges	204, 233, 631, 632, 634, 635, 641, 642, 644, 645, 646.
Einfacher Fahrstreifenwechsel	305, 315, 325, 335, 533, 534, 633, 643.
Überholen (Gegenverkehr)	521, 531, 532, 652, 661, 662, 663, 664.
Einbiegen/Abbiegen	211, 212, 213, 214, 215, 261, 281, 302, 303, 304, 306, 312, 313, 314, 322, 332, 351, 354, 591, 592, 683.
Kreuzen	251, 321, 323, 324, 326, 331, 333, 334, 252, 353, 355, 262, 271, 286, 301, 311, 352, 593, 594.
Wenden	721, 722, 723, 724.
Parken	541, 542, 543, 551, 552, 553, 554, 561, 562, 571, 572, 701, 702, 703.
Rückwärtsfahrt	711, 712, 713, 714, 715.
Körperliches Unvermögen	761, 762, 763.
Technischer Mangel	771, 772, 773, 774, 775.

Tab. 4-1: Zuordnung Szenarien und Unfalltypen

An dieser Stelle wird bereits die der Fahrfunktion entsprechende Ortslage und Straßenklasse berücksichtigt. Ebenfalls werden nur Unfälle unter Beteiligung von mindestens einem Pkw betrachtet.

Aufgrund der steigenden Komplexität von Unfällen mit mehr als zwei Beteiligten werden in der sich anschließenden Simulation nur Unfälle mit maximal zwei Beteiligten simuliert. Daher werden die Wirkfelder für Unfälle mit maximal zwei Beteiligten ausgewiesen. Für Unfälle mit mehr als zwei Beteiligten wird die Annahme getroffen, dass diese Unfälle durch die Vermeidung der ersten Kollision ebenfalls vermieden werden können. Aus diesem Grund werden die Wirkfelder auch ohne Begrenzung der Anzahl der Beteiligten ermittelt. Hier gilt die Eingrenzung, dass mindestens ein Pkw unter den beiden ersten Beteiligten beteiligt sein muss. Folglich werden die Wirkfelder sowohl auf Basis aller Unfälle ohne Begrenzung der Beteiligtenzahl als auch auf Basis der Unfälle mit maximal zwei Beteiligten ermittelt.

Aus der Beschreibung der Fahrfunktionen wird zudem deutlich, dass die Fahrfunktionen in Abhängigkeit des Automatisierungsgrades nicht unter allen Umfeldbedingungen operieren können. Daher muss zur Identifikation und Quantifizierung der Wirkfelder in einem weiteren Schritt der Operationsbereich der betrachteten Fahrfunktion berücksichtigt werden. Es ergibt sich eine Einschränkung des maximalen Wirkfelds basierend auf dem Operationsbereich der Funktion. Der Operationsbereich der automatisierten Fahrfunktionen wird durch folgende Merkmale charakterisiert:

- Ortslage/Straßenklasse und Geschwindigkeitsbereich,
- Szenarien,
- Funktionsgrenzen.

Die Ortslage/Straßenklasse findet bereits bei der Berechnung des maximalen Wirkfeldes Beachtung. Zu den Funktionsgrenzen zählen Einschränkungen der Umweltbedingungen, wie starke Sichtweitereinschränkungen aufgrund von starkem Regen oder Nebel, und Einschränkungen der Straßenbedingungen, wie Glatteis und Baustellen. Beispielsweise können bestimmte Fahrfunktionen der Automatisierungsstufe 3 nicht in Baustellenbereichen operieren. Dadurch ergibt sich eine um alle Baustellenszenarien reduzierte Anzahl an vermeidbaren Unfällen dieser Fahrfunktion. Die zur Einschrän-

kung der Wirkfelder herangezogenen Unfallmerkmale der amtlichen Unfallstatistik werden in Kapitel 5.2.1 näher erläutert.

Neben den beschriebenen Einschränkungen aufgrund der Fahrfunktionsgrenzen können keine Unfälle verhindert werden, bei denen der Hauptverursacher alkoholisiert und/oder unter Einwirkung sonstiger berauschender Mittel stand. Diese Einschränkungen sind darauf zurückzuführen, dass automatisierte Fahrfunktionen laut Herstellerbeschreibung nur von nicht alkoholisierten und nicht unter Drogen stehenden Personen geführt werden dürfen. Weiterhin können keine Unfälle mit technischen Mängeln adressiert werden. Die zur Einschränkung der Wirkfelder herangezogenen Unfallmerkmale der amtlichen Unfallstatistik werden in Kapitel 5.2.1 näher erläutert.

Als Resultat der Wirkfeldbetrachtung steht eine Matrix der potenziellen Wirkfelder bereit, aus der ersichtlich ist, wie viele Unfälle potenziell unter bestimmten Umgebungsbedingungen durch die Automatisierung einzelner Fahraufgaben vermieden werden können.

Es ist anzumerken, dass die potenziellen Wirkfelder auf Basis des Unfallgeschehens in fünf Bundesländern berechnet werden. Es wird anschließend geprüft, ob die Unfallstruktur dieser Bundesländer für die Unfallstruktur der Bundesrepublik Deutschland repräsentativ ist.

Ermittlung auf Basis der GIDAS-Daten

Die Ermittlung der Wirkfelder auf Basis der GIDAS-Daten erfolgt nach einem äquivalenten Vorgehen und hat zum Ziel, die Eingangsdaten für die in Kapitel 4.1.3 beschriebenen Simulationen zu quantifizieren.

An dieser Stelle wird zunächst GIDAS, ein im Juli 1999 initiiertes Kooperationsprojekt der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) und der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e. V. (FAT), vorgestellt. Innerhalb des GIDAS-Projekts werden Unfälle mit Personenschaden in den Regionen Hannover und Dresden durch jeweils ein professionell geschultes Unfallaufnahmeteam aufgenommen und in eine Datenbank eingepflegt. Die Unfälle werden täglich in jeweils zwei sechsständigen Zeitintervallen aufgenommen, wobei die Zeitintervalle wochenweise variiert werden. In den beiden Regionen ist jeweils ein Unfallaufnahmeteam im Einsatz, das

aus einem Koordinator, einem Mediziner und zwei Technikern besteht. Dem Team stehen zum Erreichen des Unfallortes zwei Fahrzeuge zur Verfügung. Das Fahrzeug mit dem Mediziner kann bei Bedarf Verletzte in einem Rettungswagen ins Krankenhaus begleiten. Die Techniker untersuchen währenddessen Unfallort und -fahrzeug. Zur Unfallaufnahme werden verschiedene Methoden verwendet. Beobachtungen dienen dazu, Unfallmerkmale (z. B. Zahl der Beteiligten, Zahl der Verletzten, Art der Fahrzeugschäden) sowie begleitende Merkmale (z. B. Wetter, Umgebung, Fahrzeugdaten) festzustellen und zu dokumentieren. Am Unfallort oder auch später können Messungen durchgeführt werden, um z. B. die Profiltiefe der Reifen oder die Deformationstiefe zu bestimmen. In einem Rating-Verfahren wird z. B. der MAIS-Wert (Maximum Abbreviated Injury Scale) festgelegt. Weitere Informationen werden durch die analytische Auswertung der Unfallakten und Arztberichte erlangt [GIDAS (2015)]. Durch die enge Zusammenarbeit mit der Polizei, den Rettungskräften und den Krankenhäusern können nachträgliche Informationen ergänzt werden. Darüber hinaus werden mündliche Befragungen der Unfallbeteiligten durchgeführt, um Daten wie z. B. die Unfallursache herzuleiten. Auf diese Art und Weise werden durch das Unfallaufnahme-Team in jeder der beiden Regionen etwa 1.000 Unfälle pro Jahr erfasst [ZLOCKI et al. (2007)].

Das Vorgehen zur Quantifizierung der Wirkfelder auf Basis der GIDAS-Daten erfolgt nach demselben Vorgehen wie die Quantifizierung der Wirkfelder auf Basis der amtlichen Unfalldaten. Da in die GIDAS-Datenbank jedoch nur Unfälle mit Personenschaden aufgenommen werden, bezieht sich das Wirkfeld auf Unfälle mit Personenschaden. Folglich werden die Unfalländerungspotenziale, die aus der Simulation hervorgehen, nur auf Basis dieser Unfallkategorien ermittelt. Jedoch gibt es keine Anhaltspunkte zu der Annahme, dass ein Transfer der Unfalländerungspotenziale, die auf Basis von Unfällen mit Personenschaden ermittelt wurden, nicht auf schwerwiegende Unfälle mit Sachschaden bezogen werden können.

Weiterhin werden nur Unfälle mit Pkw-Beteiligung untersucht.

Wie beschrieben, steigt der Simulationsaufwand mit zunehmender Komplexität der Unfälle. Aus diesem Grund werden nur Unfälle mit maximal zwei Beteiligten in den Simulationen untersucht. Unter der Annahme, dass durch die Vermeidung der ers-

ten Kollision die folgenden Kollisionen und somit der gesamte Unfall mit mehr als zwei Beteiligten vermieden bzw. die Unfallfolgen dieses Unfalls reduziert werden können, können die Unfalländerungspotenziale, die aus Kapitel 5.3 hervorgehen, auch auf Unfälle mit mehr als zwei Beteiligten bezogen werden.

Weiterhin wird das Wirkfeld je Automatisierungslevel mit den Funktionsgrenzen der automatisierten Fahrfunktion sowie mit den fahrer- und fahrzeugbezogenen Grenzen eingeschränkt.

Aus den Funktionsbeschreibungen wird deutlich, dass neben den beschriebenen Funktionsgrenzen der Operationsbereich durch den Geschwindigkeitsbereich der Fahrfunktion eingeschränkt wird. Im Vergleich zur amtlichen Unfallstatistik ist der Detaillierungsgrad der GIDAS-Datenbank ausgeprägter, was eine geschwindigkeitsabhängige Einschränkung des Wirkfeldes erlaubt. Daher wird das Wirkfeld mit den in den Funktionsbeschreibungen vermerkten Geschwindigkeitsbereichen weiter eingeschränkt.

Die auf Basis der GIDAS-Datenbank ermittelten Wirkfelder stellen die Eingangsdaten für die Simulationen dar. Auf Basis dieser Unfälle werden die Unfalländerungspotenziale in diesen Wirkfeldern ermittelt.

4.1.3 Beschreibung des Unfalländerungspotenzials durch Simulation

Auf Basis der Ergebnisse im ersten Arbeitsschritt erfolgt im zweiten Arbeitsschritt eine detaillierte Untersuchung des Unfalländerungspotenzials der betrachteten automatisierten Fahrfunktionen.

Die Grundlage für die Untersuchung des Unfalländerungspotenzials bilden die zuvor eingeführten Szenarien. Während bei Wirksamkeitsbetrachtungen von aktiven Sicherheitssystemen lediglich eine Resimulation der aus GIDAS parametrisierten Szenarien durchgeführt wird, wird für die Wirksamkeitsbetrachtung von automatisierten Fahrfunktionen eine andere Vorgehensweise gewählt. Dabei muss bei der Wirksamkeitsbetrachtung von automatisierten Fahrfunktionen insbesondere deren Einfluss auf das gesamte Verkehrsgeschehen betrachtet und modelliert werden, da diese im Gegensatz zu aktiven Sicherheitssystemen kontinuierlich und nicht nur zu einzelnen Zeitpunkten aktiv sind. Daher wird im Folgenden neben der Änderung der Unfall-

schwere in den einzelnen Szenarien auch die Änderung deren Häufigkeit betrachtet. Die Vorgehensweise lässt sich dabei für die Autobahnen auf folgende zwei Ebenen aufteilen:

1. Verkehrssimulation zur Identifizierung der Änderung der Auftretenshäufigkeit: Hier werden mittels einer Verkehrssimulation die betrachteten Szenarien klassifiziert. Das Ziel der Verkehrssimulation ist eine Identifizierung der Änderung der Häufigkeiten der definierten Szenarien bei definierten Durchdringungsraten von automatisierten Fahrzeugen im Vergleich zum manuellen Fahren.
2. Unfallresimulation zur Bestimmung der Änderung der Unfallschwere: hier werden die kritischen Szenarien mit den GIDAS-Kollisionsparametern parametrisiert und mit stochastischer Variation zur Abbildung der Unsicherheiten resimuliert. Ein Vergleich von automatisierter Fahrfunktion und menschlichen Fahrerverhalten in den kritischen Szenarien liefert die Änderung der Unfallschwere pro Szenario.

Das gesamte Unfalländerungspotenzial E der automatisierten Fahrfunktionen wird schließlich aus den Änderungen der Häufigkeiten $\Delta f(S_i)$ der relevanten Szenarien S_i sowie aus der Änderung der durch das betrachtete System induzierten Wirkung $\Delta I(S_i)$ in den Szenarien S_i bestimmt. Die Wirkung wird dabei durch die Indikatoren Kollisionen oder Verletzungsrisiko charakterisiert. Schließlich wird das gesamte Unfalländerungspotenzial E durch Summation der Multiplikation der Änderungen der Wirkung $\Delta I(S_i)$ in den einzelnen Situationen mit den Änderungen der Auftretenshäufigkeiten $\Delta f(S_i)$ eines Szenarios S_i ermittelt, vgl. Gleichung 4-1:

$$E = \sum_{i=1}^n I_{Referenz,i} \cdot f_{Referenz,i} (\Delta I(S_i) \cdot \Delta f(S_i) - 1) \quad \text{Gl. 4-1}$$

Für Land- und Stadtstraßen werden aufgrund der fehlenden Verkehrssimulation die Häufigkeiten vereinfachend den jeweiligen Durchdringungsraten gleichgesetzt.

Verkehrssimulation für Autobahnen zur Bestimmung der Änderung der Auftretenshäufigkeiten der Szenarien

Da automatisierte Fahrfunktionen im Gegensatz zu aktiven Sicherheitssystemen kontinuierlich aktiv sind, ist von einer Beeinflussung des Verkehrsge-

schehens durch diese Funktionen auszugehen. Insbesondere stellt sich daher die Frage, wie sich die Häufigkeit der einzelnen Szenarien, wie z. B. Fahrstreifenwechsel oder Einscheren eines anderen Fahrzeugs, in Abhängigkeit der Durchdringung von automatisierten Fahrzeugen und der Verkehrsstärke ändert.

Eine geeignete Vorgehensweise wäre zunächst mit einem Feldversuch Änderungen in der Häufigkeit relevanter Szenarien zu identifizieren, vgl. [FABER et al. (2011)]. Da ein Feldversuch mit automatisierten Fahrzeugen verschiedener Durchdringungsraten aufgrund der begrenzten Ressourcen nicht realisiert werden kann, ist eine simulative Untersuchung der Änderungen der Häufigkeiten eine geeignete Alternative. Wie schon in [FAHRENKROG et al. (2014b)] beschrieben, wird daher eine Verkehrssimulation zur Darstellung des Verkehrsgeschehens verwendet. Um die Betrachtung möglichst realitätsnah zu gestalten, werden sogenannte Verkehrsszenarien betrachtet. Diese bestehen aus einem Ausschnitt aus dem Straßennetz sowie einer Vielzahl von Fahrzeugen mit unterschiedlichen Fahrern. Da die Szenarien für die Unfallresimulation mit Situationsparametern aus der GIDAS-Datenbank parametrisiert werden und diese Daten aus den Regionen Hannover und Dresden stammen, ist ein 26 km langer Abschnitt der BAB A 2 im Raum Hannover inklusive aller Auffahrten und Autobahnkreuze für die Verkehrssimulation ausgewählt worden. Dieser ist in Bild 4-5 (links) dargestellt. Weiterhin ist ebenfalls in Bild 4-5 (rechts) die detaillierte Abbildung des Autobahnkreuzes Hannover-Ost zu sehen.

Um das Verkehrsgeschehen auf dem betrachteten Abschnitt möglichst realistisch abzubilden, werden mehrere Verkehrsszenarien definiert, die mit unterschiedlichen Verkehrsstärken und zulässigen Höchstgeschwindigkeiten parametrisiert sind.

Die durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärken werden auf deutschen Autobahnen und außerörtlichen Bundesstraßen mithilfe von automatischen Zählstellen [BAST (2017)] ermittelt. Als Grundlage für die Bestimmung der Verkehrsstärken in der Verkehrssimulation dient die Dauerzählstelle Hannover-Ost (Nr. 3433). Dort sind 2014 summiert in beiden Richtungen durchschnittlich 83.128 Kraftfahrzeuge (davon 17.384 Schwerverkehr) pro Tag gezählt worden. Die zu simulierenden Verkehrsstärken werden, wie in Bild 4-6 dargestellt, aus der Dauerlinie aller Stundenwerte eines Jahres ermit-



Bild 4-5: Verkehrsszenario BAB-A 2 Region Hannover (links) und Ausschnitt AK Hannover-Ost (rechts) (Quelle: VISSIM)

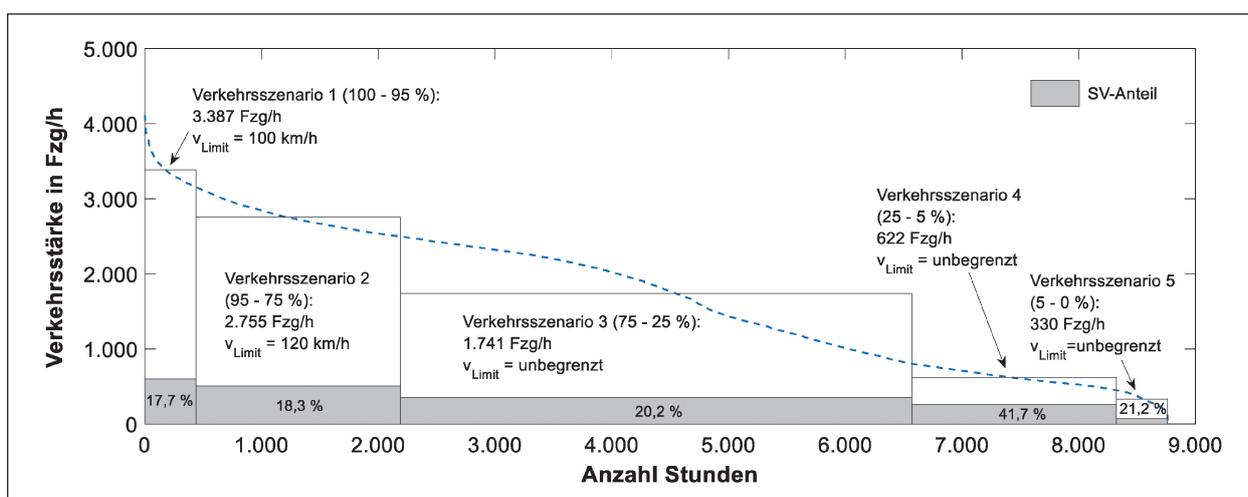


Bild 4-6: Identifizierung der Verkehrsszenarien anhand von Daten der Dauerzählstelle Hannover-Ost

Verkehrsszenario	Verkehrsstärke [Fzg/h]	Geschw.-Begrenzung [km/h]
1	3.387	100
2	2.755	120
3	1.741	unbegrenzt
4	622	unbegrenzt
5	330	unbegrenzt

Tab. 4-2: Verkehrsstärken und Parameter

telt. Beispielsweise ergibt sich die Verkehrsstärke von Szenario 1 aus den 5 % höchstbelasteten Stunden eines Jahres.

Da das betrachtete Streckennetz durchgehend mit einer Streckenbeeinflussungsanlage ausgestattet ist, werden auch die zulässigen Höchstgeschwindigkeiten für die einzelnen Verkehrsszenarien in der Simulation berücksichtigt. Diese werden in Abhängigkeit der Verkehrsstärke des Verkehrsszenarios über Kalibrierungsergebnisse für eine HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs aus [GEISTEFELDT (2017)] ermittelt. Die resultierenden Ver-

kehrsszenarien sind in Tabelle 4-2 zusammengefasst.

Auf dem beschriebenen Verkehrsabschnitt werden folgende Durchdringungsraten der automatisierten Fahrzeuge simuliert:

- 0 %,
- 5 % und 7,5 % Durchdringung FAS,
- 25 %,
- 50 %,
- 100 %.

Die größte Herausforderung beim Erstellen der Simulationen ist die richtige Beschreibung der Fahrerpopulation. In diesem Zusammenhang wird auf eine VISSIM-Fahrerpopulation aus [GEISTEFELDT (2017)] zurückgegriffen, die den Verkehrsablauf auf Autobahnen beschreibt. Dabei ist zu beachten, dass die Fahrermodelle in den Verkehrssimulationen grundsätzlich nicht zur Bewältigung von kritischen Fahrsituationen entwickelt worden sind. Die im weiteren Verlauf dargestellte Unfallresimulation

Interaktions- typ	Szenario induziert durch	Beteiligter
1	Mensch	Mensch
2	Mensch	aF
3	aF	Mensch
4	aF	aF

Tab. 4-3: Interaktionstypen in Szenarien

auf Szenarioebene erlaubt dagegen die Verwendung von Fahrermodellen, die auf diese Situationen angepasst sind und somit das Fahrerverhalten in kritischen Situationen besser beschreiben.

Aus den Verkehrssimulationen werden die Änderungen der Häufigkeiten der einzelnen Szenarien in Abhängigkeit der Durchdringungsrate ermittelt. Folgende Szenarien werden betrachtet:

- Annäherung an ein Vorderfahrzeug,
- Einscheren eines anderen Fahrzeugs,
- Fahrstreifenwechsel.

Neben den Häufigkeitsänderungen der einzelnen Szenarien liefert die Verkehrssimulation auch eine Aussage dazu, ob automatisierte Fahrfunktionen (aF) und/oder menschliche Fahrer an den Szenarien beteiligt sind. Dabei wird zwischen dem Verkehrsteilnehmer, der das Szenario induziert und dem beteiligten Verkehrsteilnehmer unterschieden. Bei Betrachtung des Szenarios Einscheren eines anderen Fahrzeugs wird z. B. das Szenario durch das einscherende Fahrzeug induziert während das Fahrzeug auf dem Zielfahrstreifen nur beteiligt ist. Daher wird zwischen den in Tabelle 4-3 dargestellten Interaktionstypen unterschieden.

Bei der Verkehrssimulation auf der Autobahn wird die Häufigkeit dieser Interaktionstypen erfasst und bei der Berechnung der Wirksamkeit berücksichtigt. Für alle anderen Straßenklassen wird aufgrund der fehlenden Verkehrssimulation angenommen, dass die Interaktionstypen entsprechend ihrem Anteil im Verkehr verteilt sind.

Unfallresimulation der Szenarien zur Bestimmung der Änderung der Unfallschwere

Während durch die Verkehrssimulation die Änderungen der Häufigkeiten der einzelnen Szenarien bestimmt werden, wird bei der Unfallresimulation die Änderung der Unfallschwere untersucht. Im Gegensatz zur Verkehrssimulation ist die Unfallresimu-

Simulations- konfiguration	Interaktions- typ	Szenario induziert durch	Beteiligter
1	1	Mensch	Mensch
2	2	Mensch	aF

Tab. 4-4: Simulationskonfigurationen der Szenarien

lation in der Lage, alle für die Bestimmung der Unfallschwere relevanten Aspekte abzubilden, d. h. insbesondere auch die Fahrerreaktion in kritischen Situationen sowie die Umfeldwahrnehmung der automatisierten Fahrfunktionen.

Dabei werden die Szenarien mit den entsprechenden Situationsparametern aus GIDAS simuliert. In diesem Fall werden die im Wirkfeld der automatisierten Fahrfunktionen liegenden GIDAS-Fälle wie in Kapitel 2.1.1 beschrieben den jeweiligen Szenarien zugeordnet. Anschließend wird jeder relevante GIDAS-Fall eines Szenarios simuliert. Ähnlich wie in [KATES et al. (2010)] werden die aus den GIDAS-Daten extrahierten Situationsparameter eines jeden Falles stochastisch mittels der Monte-Carlo-Methode variiert und so synthetisch neue Situationen erzeugt. Es wird allerdings nur die Ausgangsgeschwindigkeit V_0 des Unfallverursachers mit einer Standardabweichung von $\sigma_v = 2 \text{ ms}^{-1}$ variiert. Unter Berücksichtigung der Interaktionstypen aus Tabelle 4-3 werden die in Tabelle 4-4 aufgezeigten Simulationskonfigurationen betrachtet.

Dabei werden im Folgenden die Interaktionstypen 3 und 4 nicht weiter betrachtet, da davon ausgegangen wird, dass automatisierte Fahrzeuge keine kritischen Szenarien induzieren.

Vor diesem Hintergrund ist eine Simulationsumgebung konzipiert worden, die die Änderung der Unfallschwere der unterschiedlichen Simulationskonfigurationen abbilden kann. Insbesondere liegt der Fokus der Szenariosimulation auf der Abbildung des Verhaltens aller Verkehrsteilnehmer in kritischen Situationen. Dabei stellt die Simulationskonfiguration 1 (Fahrer-Fahrer) das Referenzverhalten dar. Das Umfeld, insbesondere die infrastrukturellen Gegebenheiten, wie z. B. der Kurvenradius, oder auch Wetterbedingungen können in der Simulation dargestellt werden.

In den darauffolgenden Schritten wird die Wirkung der automatisierten Fahrfunktion im generierten Szenario bestimmt. Zunächst wird hier bei der Simulationskonfiguration 2 ein durch einen menschlichen Fahrer induziertes Szenario untersucht, bei

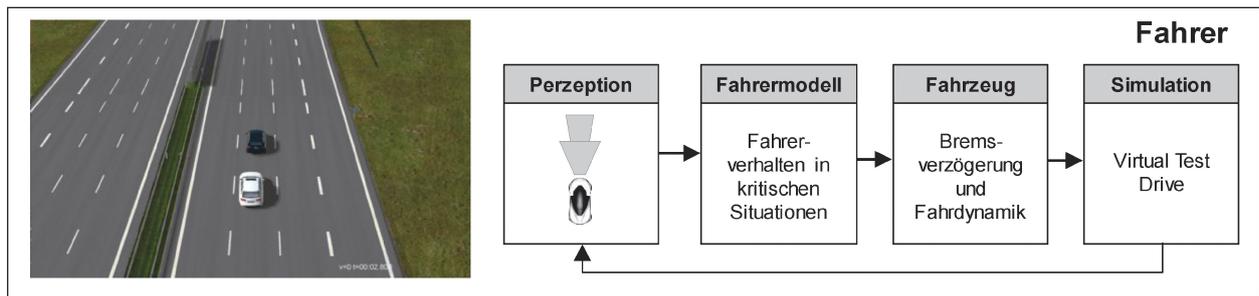


Bild 4-7: Unfallresimulation des Szenarios Annäherung an ein Vorderfahrzeug der Simulationskonfiguration 1 (Fahrer-Fahrer)

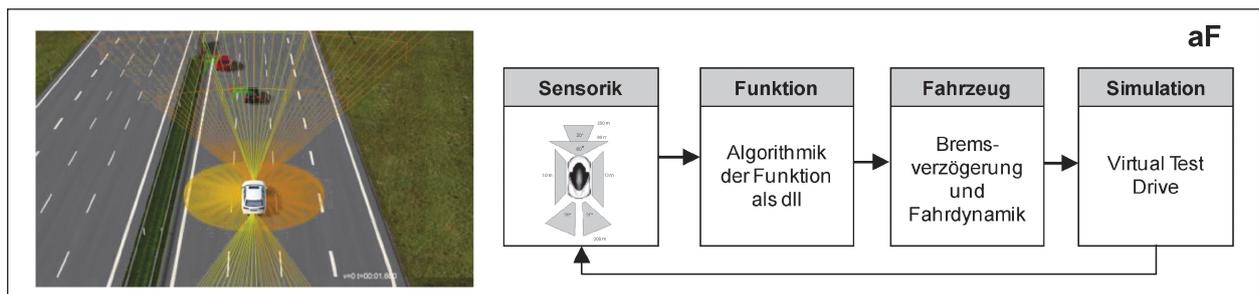


Bild 4-8: Unfallresimulation des Szenarios Annäherung an ein Vorderfahrzeug der Simulationskonfiguration 2 (aF – Fahrer)

der die automatisierte Fahrfunktion beteiligt ist. Im weiteren Vorgehen wird die Simulationskonfiguration 3 untersucht, bei der das Szenario durch die automatisierte Fahrfunktion induziert wird und bei der ein menschlicher Fahrer beteiligt ist.

Um die Simulationen möglichst realistisch zu halten, wird die generische Wirkkette der automatisierten Fahrfunktion, bestehend aus Wahrnehmung, Planung und Handlung, simulativ in einer Software-in-the-Loop-Umgebung nachgebildet. Ferner wird das Fahrerverhalten der weiteren Teilnehmer durch Modelle dargestellt. In Bild 4-7 und Bild 4-8 ist beispielhaft die Visualisierung von relevanten Szenarien durch die Umfeldsimulation dargestellt.

Die Unfallresimulation der relevanten Situationen wird durch eine Kombination von drei Entwicklungs- und Simulationswerkzeugen realisiert. Dabei wird die Generierung der Szenarien aus den GIDAS-Fällen in MATLAB realisiert. Die hier generierten Szenarien werden zunächst in einer Szenariobeschreibung gespeichert und können von nachfolgenden Werkzeugen eingelesen werden.

Die Einbindung und Software-in-the-Loop-Simulation der automatisierten Fahrfunktion wird mit dem Entwicklungswerkzeug ADTF (Automotive Data and Time-Triggered Framework) realisiert. Dabei eignet sich ADTF insbesondere zur Software-in-the-Loop-Simulation der zu untersuchenden automatisierten Fahrfunktion, da bereits alle notwen-

digen Kommunikationsschnittstellen zu anderen Werkzeugen, wie z. B. Virtual Test Drive, vorhanden sind. Für die Simulation der generierten Szenarien wird Virtual Test Drive genutzt. Durch die Abbildung einzelner Fahrermodelle, Sensormodelle sowie durch die Einbindung der Funktion mit ADTF kann die Interaktion aller Situationsteilnehmer in der relevanten Situation simulativ dargestellt werden.

Die Wirkung der automatisierten Fahrfunktion im Szenario wird über die Ausgangsgrößen bzw. Indikatoren der zuvor beschriebenen Unfallresimulation beschrieben. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, alle mikroskopischen kinematischen Größen, wie z. B. die Geschwindigkeiten zum Kollisionszeitpunkt und die minimale Time-to-Collision, bis zum Zeitpunkt der Kollision aufzuzeichnen und auszuwerten. Die Wirksamkeit der automatisierten Fahrfunktion in der betrachteten Situation ergibt sich aus der Differenz der Indikatoren der Bewertungsmetrik, z. B. Änderung des Anteils der Wahrscheinlichkeit von mindestens Schwerverletzten nach der Kollision MAIS2+ oder Anzahl der Kollisionen.

Menschliches Fahrerverhalten in relevanten Szenarien

Wie bereits erwähnt, wird die Änderung der Unfallschwere durch Wirkung der automatisierten Fahrfunktionen durch eine Unfallresimulation der rele-

Szenario	Bremsreaktionszeit
Annäherung an ein stehendes Objekt	0,95 s
Annäherung an ein sich lateral zur Fahrbahn bewegendes Objekt	
Annäherung an ein Vorderfahrzeug	0,95 s
Fahren im Stau	
Einscheren eines anderen Fahrzeuges	
Einfacher FSWE	0,71 s
Überholen (Gegenverkehr)	
Einbiegen/Abbiegen	0,40 s
Kreuzen	

Tab. 4-5: Bremsreaktionszeiten für Szenarien

vanten Szenarien bestimmt. Eine entscheidende Rolle spielt in diesem Zusammenhang die Modellierung der Fahrerreaktion. Zwar liegt diese für die ursprüngliche Situation vor, allerdings kann es durch die stochastische Variation der Szenarien zu einer Änderung der Kritikalität und somit zu einer Änderung der Fahrerreaktion kommen. Im Folgenden wird daher das Modell für die Beschreibung des Fahrerverhaltens in kritischen Szenarien dargestellt.

Dabei wird das Fahrerverhalten in kritischen Szenarien durch die Reaktionszeit und die Reaktionsstärke beschrieben, vgl. [McRUER et al. (1959)]. Vereinfachend wird zudem davon ausgegangen, dass der Fahrer ein Bremsmanöver zur Vermeidung der Kollision und kein Ausweichmanöver durchführt. Die verwendeten Reaktionszeiten stammen dabei aus Versuchen mit einem dynamischen Fahrsimulator. Nach [SCHITTENHELM (2006)] werden die Reaktionszeiten für die unterschiedlichen Szenarien differenziert. Es ergeben sich die in Tabelle 4-5 dargestellten Bremsreaktionszeiten.

Das Fahrerverhalten in relevanten Situationen setzt sich neben der Reaktionszeit auch aus der Reaktionsstärke zusammen. Um eine möglichst realistische Abbildung dieser zu garantieren, wird im Folgenden eine Modellierung auf Grundlage von Feldtests gewählt. Nach [FAHRENKROG (2016)] kann diese über den in Bild 4-9 dargestellten Zusammenhang von Längsbeschleunigung zur TTC zum Reaktionszeitpunkt beschrieben werden.

Die Validierung des Modells für das Fahrerverhalten in kritischen Szenarien erfolgt durch Simulation aller vom Autobahn-Chauffeur adressierten Szenarien. Als Vergleichsgröße wurde die relative Kollisionsrelativgeschwindigkeit ausgewählt, da mit die-

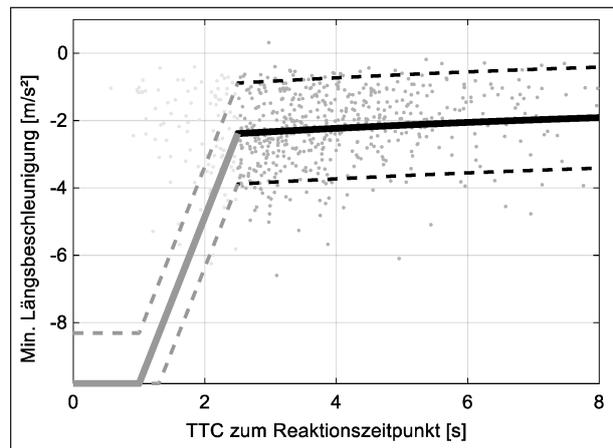


Bild 4-9: Reaktionsstärken in kritischen Situationen, vgl. [FAHRENKROG (2016)]

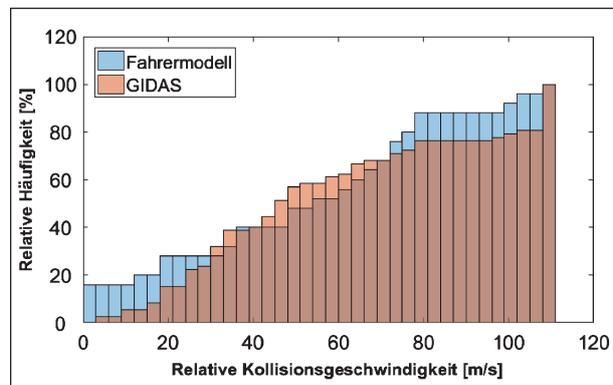


Bild 4-10: Kollisionsrelativgeschwindigkeiten aus Fahrermodell und GIDAS

ser anschließend auch die Wahrscheinlichkeit einer MAIS2+ Verletzung berechnet wird und daher eine Aussage über die Wirksamkeit der betrachteten Funktion darstellt. Die Kollisionsrelativgeschwindigkeiten aus Simulation und GIDAS sind in Bild 4-10 dargestellt. Zur Bewertung der Abweichung von Simulation und GIDAS-Daten wird die durch die Simulation erhaltene Kollisionsrelativgeschwindigkeit mit dem in GIDAS erfassten Wert verglichen und ausgewertet. Als Indikatoren dienen die relative Änderung des Mittelwertes $\Delta\mu_{\text{vrel}}$ und der Standardabweichung $\Delta\sigma_{\text{vrel}}$. Hinsichtlich der Abweichung des Mittelwertes wurde ein Wert von $\Delta\mu_{\text{vrel}} = -5,1\%$ und hinsichtlich der Abweichung der Standardabweichung wurde ein Wert von $\Delta\sigma_{\text{vrel}} = 3,5\%$ ermittelt.

Bestimmung der Unfallfolgen mithilfe von Verletzungsrisikofunktionen

Neben den vorgestellten Werkzeugen, die vornehmlich die Phase vor einem Unfall (Pre-Crash-

Phase) adressieren, gibt es auch verschiedene Werkzeuge, die das Verhalten sowie ggf. entstehende Beschädigungen bzw. Verletzungen beteiligter Fahrzeuge und Personen in den Phasen nach der Pre-Crash-Phase beschreiben. Die Spanne an Werkzeugen reicht von vereinfachten statistischen Modellen, die auf Basis weniger Eingangsdaten die Folgen eines Unfalls bestimmen, bis zur detaillierten Simulation des Unfallverlaufes in der Unfall- und Auslaufphase.

Vertreter der statistischen Modelle sind typischerweise Verletzungsrisikokurven (Injury-Risk-Funktionen). In der Vergangenheit sind verschiedene Verletzungsrisikokurven für unterschiedliche Unfalltypen und Verletzungsgrade entwickelt worden, siehe [HANNAWALD et al. (2004)]. Basis dieser Modelle ist die Analyse von Zusammenhängen zwischen den Ausgangsparametern eines Unfalls und den Unfallfolgen hinsichtlich der entstandenen Personenschäden. Ein häufig gewählter Eingangsparameter ist die vektorielle Änderung der Geschwindigkeit. Als Ausgabegröße wird meist die Wahrscheinlichkeit für eine bestimmte Verletzungsschwere angegeben, wobei sich die Klassifizierung der Verletzungsschweren durchaus unterscheiden kann.

Um die Änderung der Verletzungsschwere durch automatisierte Fahrfunktionen zu bestimmen, wurde für jedes Szenario eine Verletzungsrisikofunktion, die einem logistischen Ansatz folgt, festgelegt, siehe Gleichung 4-2:

$$p(x) = \frac{1}{1 + e^{(a-B \cdot x)}} \quad \text{Gl. 4-2}$$

Es wird auf bestehende Verletzungsrisikofunktionen aus der Literatur zurückgegriffen, wobei die Abbreviated Injury Scale (AIS) als Maß für die Verletzungsschwere dient (siehe Tabelle 4-6). In diesem Vorhaben wird die AIS-Stufe auf MAIS2+ festgelegt.

AIS-Code	AIS-Verletzungsschwere
0	Unverletzt
1	Gering
2	Ernsthaft
3	Schwer
4	Sehr Schwer
5	Kritisch
6	Maximal (nicht behandelbar)
9	Nicht genauer angegeben

Tab. 4-6: Abbreviated Injury Scale (AIS)

Bei mehreren verletzten Personen wird die verletzte Person mit der größten AIS-Stufe durch den maximalen AIS-Wert (MAIS-Wert) erfasst.

Als unabhängige Variable dient bei Fzg.-Fzg.-Kollisionen die Differenzgeschwindigkeit beider Kollisionsgegner v_{diff} zum Kollisionszeitpunkt unter Einbeziehung des Kollisionswinkels.

Bei Fzg.-Fußgänger-Kollisionen wird angenommen, dass die sich im Fahrzeug befindenden Personen keinem Verletzungsrisiko ausgesetzt sind und dass die Geschwindigkeit des Fußgängers vernachlässigbar ist und somit die Geschwindigkeit des Fahrzeugs beim Aufprall des Fußgängers die Differenzgeschwindigkeit darstellt.

In dem von den Bundesministerien für Wirtschaft und Technologie, für Bildung und Forschung sowie für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung geförderten Projekt simTD wurde auf Basis von Realunfällen der GIDAS-Datenbank eine Wirksamkeitsuntersuchung für ausgewählte simTD-Systeme, u. a. der Querverkehrsassistent, durchgeführt [SCHUBERT et al. (2013)]. Zur Bewertung der Unfallfolgenminderung wurde auf der Grundlage von GIDAS-Daten eine Verletzungsrisikofunktion in Abhängigkeit von v_{diff} für einen Front-/Heckanprall ermittelt (siehe Tabelle 4-7). Mithilfe dieser Funktion ist es möglich, für jede am Unfall beteiligte Person die Wahrscheinlichkeit, eine MAIS2+ Verletzung zu erleiden, zu ermitteln. Diese Funktion hängt zusätzlich davon ab, ob das Fahrzeug an der Front (Front/Heck = 1) oder am Heck (Front/Heck = 0) einen Aufprall erlitten hat, siehe Gleichung 4-3.

$$p = \frac{1}{1 + e^{-(-6,03 + 1,05 \cdot \frac{Front}{Heck} + 0,04 \cdot v_{diff})}} \quad \text{Gl. 4-3}$$

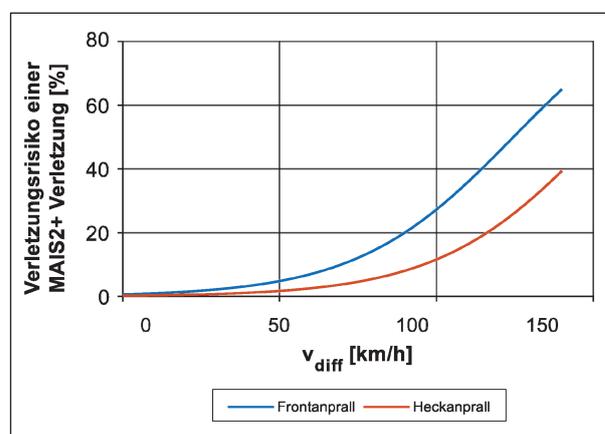


Bild 4-11: Verletzungsrisikofunktion für Front- und Heckanprall [SCHUBERT et al. (2013)]

Für orthogonale Kollisionen mit Querverkehr ist mithilfe der Formel zur Berechnung der Differenzgeschwindigkeit die Risikofunktion in Gleichung 4-4 für eine Verletzung mit MAIS2+ anzuwenden.

$$p = \frac{1}{1 + e^{-(-4,98+0,04 \cdot v_{diff})}} \quad \text{Gl. 4-4}$$

Die entsprechende grafische Darstellung ist in Bild 4-12 zu sehen.

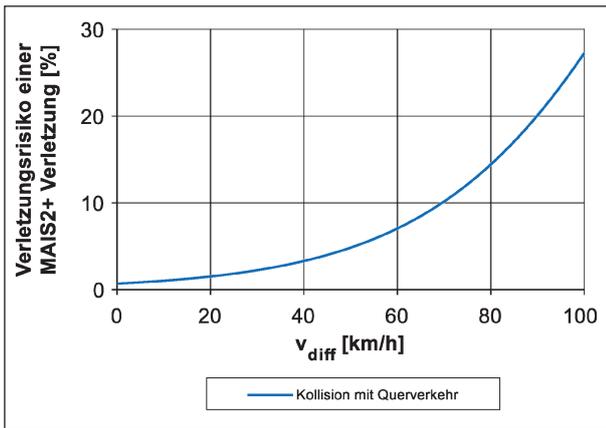


Bild 4-12: Verletzungsrisikofunktion für Kollisionen mit Querverkehr [SCHUBERT et al. (2013)]

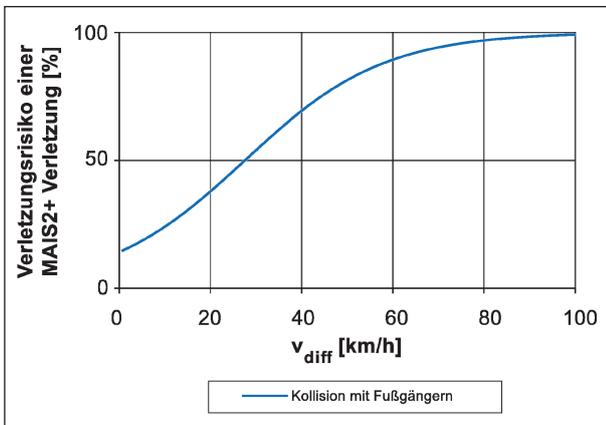


Bild 4-13: Verletzungsrisikofunktion für Kollisionen zwischen Fahrzeug und Fußgänger [HANNAWALD et al. (2004)]

Für Fahrzeug-Fußgänger-Kollisionen haben [HANNAWALD et al. (2004)] auf Grundlage der GIDAS-Daten Verletzungsrisikofunktionen in Abhängigkeit der Kollisionsgeschwindigkeit ermittelt (siehe Tabelle 4-7). Sie veröffentlichten jedoch keine expliziten Formeln, sondern veranschaulichten die Beziehung nur anhand von Kurven. In dem Projekt interactive (Accident avoidance by active intervention for Intelligent Vehicles) wurde die Risikofunktion einer Verletzung mit MAIS2+ anhand der von [HANNAWALD et al. (2004)] veröffentlichten Abbildung geschätzt [LARSSON et al. (2012)], siehe Gleichung 4-5.

$$p = \frac{1}{1 + e^{-(-1,8025+0,0655 \cdot v)}} \quad \text{Gl. 4-5}$$

Es wird angenommen, dass die Unfälle des Szenarios Fahrt ohne Beeinflussung durch Vorderfahrzeug durch automatisierte Fahrfunktionen vermeidbar sind. Daher sind für Unfälle dieses Szenarios keine Verletzungsrisikofunktionen zu bestimmen. Die Zuordnung der Verletzungsrisikofunktionen zu den Szenarien ist in Tabelle 4-7 dargestellt.

4.1.4 Hochrechnung der Wirksamkeit auf nationale Ebene

Ergebnis der Simulation ist nicht lediglich das Unfalländerungspotenzial je Fahrfunktion, sondern vielmehr das Unfalländerungspotenzial je funktionsabhängiger Ortslage bzw. Straßenklasse, je funktionsabhängigem Geschwindigkeitsbereich und Szenario sowie je Durchdringungsrate. Dieses Unfalländerungspotenzial bezieht sich auf das GIDAS-Wirkfeld.

Im Unterschied zum auf den amtlichen Unfalldaten identifizierten Wirkfeld wird das GIDAS-Wirkfeld mit einem zusätzlichen Merkmal, der Ausgangsgeschwindigkeit der ersten Kollision des Unfalls, wei-

Kollisionstyp	Front-/Heckaufprall	Orthogonale Kollision mit Querverkehr	Fahrzeug-Fußgänger-Kollisionen
Berechnungsvorschrift	$p = \frac{1}{1 + e^{-(-6,03+1,05 \cdot \frac{Front}{Heck} + 0,04 \cdot v_{diff})}}$	$p = \frac{1}{1 + e^{-(-4,98+0,04 \cdot v_{diff})}}$	$p = \frac{1}{1 + e^{-(-1,8025+0,0655 \cdot v)}}$
Quelle	[SCHUBERT et al. (2013)]	[SCHUBERT et al. (2013)]	[HANNAWALD et al. (2004)]
Relevante Szenarien	<ul style="list-style-type: none"> • Annäherung an ein stehendes Objekt, • Annäherung an ein Vorderfahrzeug, • Fahren im Stau, • Einscheren eines anderen Fahrzeugs, • einfacher Fahrstreifenwechsel, • Überholen. 	<ul style="list-style-type: none"> • Abbiegen/Einbiegen, • Kreuzen. 	<ul style="list-style-type: none"> • Annäherung an ein sich lateral zur Fahrbahn bewegendes Objekt

Tab. 4-7: Zuordnung der Verletzungsrisikofunktionen für die entsprechenden Szenarien

ter eingeschränkt. Um das Unfalländerungspotenzial im GIDAS-Wirkfeld auf das amtliche Wirkfeld zu beziehen, ist diese geschwindigkeitsabhängige Einschränkung zu berücksichtigen. Diese wird je nach fahrfunktionsabhängiger Ortslage bzw. Straßenklasse und je funktionsabhängigem Szenario quantifiziert.

Da das amtliche Wirkfeld auf Basis des Unfallgeschehens in fünf Bundesländern, die den dreistelligen Unfalltypen führen, ermittelt wird und somit die maximal vermeidbaren Unfälle in diesen fünf Bundesländern ermittelt werden, sind in einem abschließenden Schritt die maximal vermeidbaren Unfälle in Gesamtdeutschland mittels einer Hochrechnung zu quantifizieren. Diese Hochrechnung findet in Abhängigkeit der Ortslage bzw. Straßenklasse statt.

4.1.5 Erörterung neu induzierter Unfallszenarien

Schließlich erfolgt die Erörterung neu induzierter Unfallszenarien. Im Gegensatz zum vorherigen Vorgehen, in dem vorrangig die positiven Effekte eines Systems betrachtet werden, befasst sich dieser Arbeitspunkt auch mit den negativen Effekten einer automatisierten Fahrfunktion. Ein häufig genanntes Beispiel sind Situationen, in denen der Fahrer die Kontrolle über das Fahrzeug vom System unerwartet übernehmen muss. Mit Blick auf die betrachteten Automatisierungsstufen würde diese Situation vor allem für automatisierte Fahrfunktionen des Levels 3 eine Herausforderung darstellen.

Ausgangspunkt ist die systematische Analyse typischer (automatisierter) Fahrten. Dazu wird zunächst der Ablauf normaler Fahrten auf verschiedenen Straßentypen beschrieben. Dies schließt die Identifizierung und Beschreibung der innerhalb der Fahrt auftretenden Szenarien ein. Die neu induzierten Unfälle werden, ähnlich dem Vorgehen bei einer Gefahren- und Risikoanalyse, hiervon ausgehend bestimmt.

Im zweiten Schritt werden die Fahrten bzw. Szenarien hinsichtlich einer möglichen Überschreitung von Systemgrenzen untersucht. Dies erfolgt auf Grundlage der Beschreibung der relevanten Umgebungsbedingungen.

Im dritten Schritt erfolgt ein Vergleich zwischen den Szenarien der definierten Fahrten und den Szenarien, die durch die Funktion abgedeckt werden. Abschließend werden die identifizierten problema-

tischen Szenarien und Umgebungszustände hinsichtlich ihrer Auftretenshäufigkeiten und möglicher Konsequenzen überschlägig bewertet.

Auf Basis dieser Bewertung erfolgt die finale Beschreibung der durch die betrachteten automatisierten Fahrfunktionen neu indizierten Unfallszenarien, womit die Beschreibung des potenziellen Sicherheitsnutzens von automatisierten Fahrfunktionen der Level 3 bis 5 vervollständigt wird.

4.2 Forschungsansatz zur Wirksamkeitsbetrachtung hinsichtlich des Energiebedarfs sowie der Verkehrseffizienz

Neben der Betrachtung der Verkehrssicherheit werden die Veränderungen des Energiebedarfs sowie der Verkehrseffizienz durch die automatisierten Fahrfunktionen untersucht. Dabei wird zunächst die Wirksamkeit hinsichtlich des Energiebedarfs dargestellt, wobei die Wirksamkeit in identifizierten Verkehrsszenarien mit verschiedenen Durchdringungsraten der zu untersuchenden Systeme durch eine Verkehrssimulation ermittelt wird. Die Potenziale hinsichtlich der Verkehrseffizienz werden dagegen auf Grundlage einer Literaturrecherche bestimmt. Ferner werden bei der Identifikation der Potenziale hinsichtlich der Verkehrseffizienz auch die Ergebnisse aus den Potenzialen hinsichtlich der Verkehrssicherheit berücksichtigt, die vor allem im Hinblick auf die Veränderung der Stausituation durch ein verändertes Unfallgeschehen relevant sind.

4.2.1 Wirksamkeit hinsichtlich des Energiebedarfs und der Emissionen

Ähnlich der in [FAHRENKROG et al. (2017)] gewählten Vorgehensweise erfolgt die Wirksamkeitsbestimmung hinsichtlich des Energiebedarfs durch eine Verkehrssimulation.

Dabei werden zunächst relevante Verkehrsszenarien identifiziert, die anschließend in der Simulation betrachtet werden. Analog zum Vorgehen bei der Untersuchung der Verkehrssicherheit wird auch in diesem Fall der Abschnitt der BAB A2 im Raum Hannover mit den gleichen Verkehrsszenarien bewertet. Demzufolge beziehen sich die Ergebnisse ausschließlich auf die Straßenklasse Bundesautobahn. Die Definition der Szenarien sowie die verwendeten Verkehrsstärken sind in Kapitel 4.1.3 zu finden.

Die Wirkung der automatisierten Fahrfunktion wird anschließend – analog zum Vorgehen bei der Sicherheitsbetrachtung – abhängig von der Durchdringungsrate der automatisierten Fahrfunktionen analysiert. Es werden folgende Durchdringungs-raten berücksichtigt:

- 0 %,
- 5 %,
- 25 %,
- 50 %,
- 100 %.

Die Simulation der Verkehrsszenarien liefert anschließend die Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverläufe der manuell- sowie automatisiert gesteuerten Fahrzeuge. Aus diesen werden die entsprechenden Indikatoren berechnet. Hinsichtlich der Änderung des Energiebedarfs durch automatisierte Fahrfunktionen wird in diesem Zusammenhang der streckenbezogene Energieverbrauch ESB berechnet. Dieser wird auf Grundlage der Fahrwiderstandsgleichung nach [MITSCHKE et al. (2004)] wie folgt bestimmt:

$$\frac{E_{ges}}{s} = F_{ges} = F_{Luft} + F_{Roll} + F_{Beschl.} \quad \text{Gl. 4-6}$$

Wobei die Anteile resultierend aus Luft-, Roll- und Beschleunigungswiderstand durch die folgenden Gleichungen definiert werden:

$$F_{Luft} = 0,5 \cdot c_w \cdot A \cdot \rho_{Luft} \cdot v^2 \quad \text{Gl. 4-7}$$

Der Luftwiderstand F_{Luft} setzt sich zusammen aus dem Luftwiderstandsbeiwert c_w , der Querspanfläche A des Fahrzeugs, der Dichte der Luft ρ_{Luft} sowie der Fahrzeuggeschwindigkeit v . Der Rollwiderstand F_{Roll} berechnet sich aus dem Rollwiderstandsbeiwert f_{Roll} , der Masse des Fahrzeugs m_{Fzg} sowie der Zuladung m_{zu} und der Erdbeschleunigung g , siehe Gleichung 4-8.

$$F_{Roll} = f_{Roll} \cdot (m_{Fzg} + m_{zu}) \cdot g \quad \text{Gl. 4-8}$$

Der Beschleunigungswiderstand F_{Beschl} setzt sich neben den Massen aus dem Massenfaktor e_i sowie der aktuellen Fahrzeugbeschleunigung a zusammen, siehe Gleichung 4-9.

$$F_{Beschl.} = (e_i \cdot m_{Fzg} + m_{zu}) \cdot a \quad \text{Gl. 4-9}$$

Insbesondere ist bei Verwendung des streckenbezogenen Energieverbrauchs zu berücksichtigen,

dass in diesem Fall die Energie an der Reifenauflstandsfläche, also noch vor der Energiewandlungs-maschine bilanziert wird. Energiewandlungsverluste, die durch den Wirkungsgrad der verwendeten Energiewandlungsmaschinen auftreten, werden daher bei dieser Betrachtung nicht berücksichtigt.

Vor diesem Hintergrund wird neben dem streckenbezogenen Energieverbrauch zudem die durch automatisierte Fahrfunktionen induzierte Änderung des Kraftstoffverbrauchs betrachtet. Grundsätzlich sind für eine solche Betrachtung die auf Motorprüfständen aufgezeichneten Motor- bzw. Emissionskennfelder notwendig. Da diese in der Simulation nicht abgebildet werden können, wird eine vereinfachte Betrachtung über den spezifischen Kraftstoffverbrauch b_e und die Dichte ρ_{KS} des verwendeten Kraftstoffes durchgeführt. Dabei ist aus Gleichung 4-10 ersichtlich, dass der streckenbezogene Kraftstoffverbrauch unter der Annahme eines konstanten spezifischen Kraftstoffverbrauches b_e proportional zur Fahrwiderstandskraft F_{ges} und damit auch zum streckenbezogenen Energiebedarf E_{ges}/s ist.

$$B_S = \frac{b_e \cdot P_{ges}}{\rho_{KS} \cdot v} = \frac{b_e \cdot F_{ges}}{\rho_{KS}} \sim \frac{E_{ges}}{s} \quad \text{Gl. 4-10}$$

Für diese Untersuchung ist der in Bild 4-14 dargestellte Pkw-Bestand in Deutschland nach Kraftstoffarten (Stand: 1. Januar 2017) zugrunde gelegt worden, vgl. [KBA (2017a)].

Neben der Änderung des Energiebedarfs durch automatisierte Fahrfunktionen wird zudem die Änderung der Kohlenstoffdioxid-Emissionen (CO₂) durch automatisierte Fahrfunktionen betrachtet. Diese werden bei angenommener stöchiometrischer Verbrennung proportional zum Kraftstoffverbrauch be-

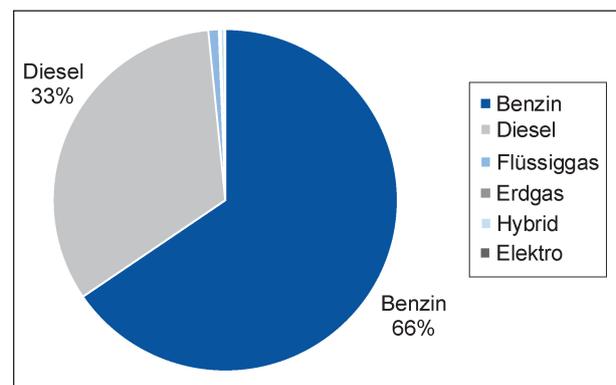


Bild 4-14: Pkw-Bestand in Deutschland nach Kraftstoffarten (Stand: 1. Januar 2017), vgl. [KBA (2017a)]

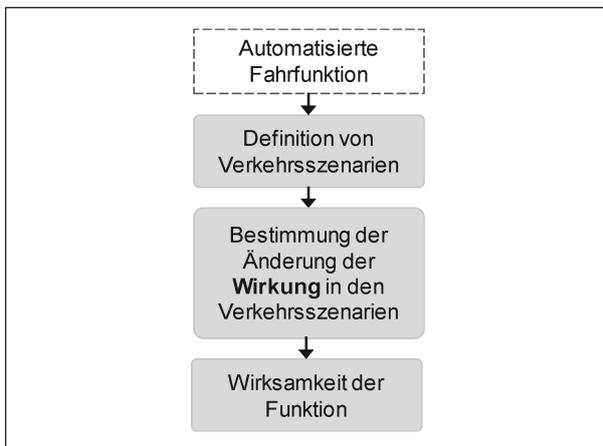


Bild 4-15: Methodisches Vorgehen zur Wirksamkeitsbetrachtung hinsichtlich des Energiebedarfs

rechnet. Das gesamte methodische Vorgehen zur Ermittlung der Änderung des Energiebedarfs und der Emissionen ist in Bild 4-15 dargestellt.

4.2.2 Wirksamkeit hinsichtlich der Verkehrseffizienz

Im Rahmen dieses Projektes findet eine Literaturanalyse zur Ermittlung der Auswirkungen des automatisierten Fahrens auf die Kapazität von Straßen statt. Dabei wird insbesondere das Projekt Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur [BUSCH et al. (2017)] vorgestellt.

Zur Ermittlung des Stauvermeidungspotenzials durch die Reduktion der Unfallzahlen wird zunächst im Rahmen einer Literaturanalyse der Anteil an Staus aufgrund von Unfällen identifiziert. Zusammen mit der in diesem Forschungsvorhaben ermittelten Wirksamkeit von automatisierten Fahrfunktionen auf die Verkehrssicherheit wird das Stauvermeidungspotenzial durch die Reduktion von Unfallzahlen abgeschätzt.

5 Wirksamkeit hinsichtlich der Verkehrssicherheit automatisierter Fahrfunktionen

In Kapitel 5.1 werden die auf Grundlage der in Kapitel 4.1 vorgestellten Methodik zur Bestimmung des Unfalländerungspotenzials ermittelten Ergebnisse vorgestellt. Dazu werden zunächst die identifizierten Marktdurchdringungsszenarien der automatisierten Fahrfunktionen aufgezeigt. Daraufhin wer-

den die Wirkfelder der betrachteten automatisierten Fahrfunktionen und anschließend die durch den gewählten Simulationsansatz ermittelte Unfalländerungspotenzial der automatisierten Fahrfunktionen in den Wirkfeldern dargestellt. In den darauffolgenden Kapiteln werden zudem mögliche neu-induzierte Unfälle und auf Grundlage der zuvor ermittelten Ergebnisse schließlich die gesamte Wirksamkeit auf nationaler Ebene vorgestellt.

5.1 Marktdurchdringungsszenarien

Basierend auf der im Kapitel 4.1.1 beschriebenen Vorgehensweise werden zwecks der Bestimmung der Marktdurchdringungsrates von automatisierten Fahrfunktionen sechs verschiedene Szenarien betrachtet. Diese Szenarien sind:

1. Vollausrüstung: Es wird angenommen, dass nach der Markteinführung jedes Fahrzeug mit einem entsprechenden System ausgestattet wird. Dies ist ein rein theoretisches Szenario, das nur zur Abschätzung der maximal möglichen Marktdurchdringung betrachtet wird.
2. Markteinführungskurve vergleichbar mit der Entwicklung bei Einführung des Airbags,
3. Markteinführungskurve vergleichbar mit der Entwicklung bei Einführung des adaptiven Abstandsregeltempomats (ACC),
4. Markteinführungskurve vergleichbar mit der Entwicklung bei Einführung des elektronischen Stabilitätsprogramms (ESP),
5. Markteinführungskurve vergleichbar mit der Entwicklung bei Einführung der Auffahr-Warnfunktion (FCW),
6. Markteinführungskurve vergleichbar mit der Entwicklung bei Einführung der Spurverlassen-Warnfunktion (LDW).

Grundlage der Modelle zur Prädiktion der Marktdurchdringung der einzelnen Systeme sind die Ergebnisse der Studien [FOLLMER et al. (2015)] und [GRUSCHWITZ et al. (2017)] (siehe Tabelle 5-1).

Die Marktdurchdringungsrates für die fünf Szenarien über der Zeit sind in Bild 5-1 dargestellt.

Die höchste bzw. schnellste Marktdurchdringung ist für das elektronische Stabilitätsprogramm (ESP) bestimmt worden. Dagegen erfolgt die Marktdurchdringung für den einer automatisierten Fahrfunktion

technisch deutlich ähnlicheren Abstandsregeltem-pomaten (ACC) deutlich langsamer. Wird das aktu-ell zu beobachtende Interesse der Gesellschaft an automatisierten Fahrfunktionen zugrunde ge-legt, so erscheint ein ähnlicher Verlauf wie beim ESP auch für automatisierte Fahrfunktionen durch-aus möglich. Aber selbst das würde bedeuten, dass nach der Markteinführung in einem Zeitraum von zehn Jahren maximal eine Marktdurchdringung von 10 % erreicht werden kann. Danach würde die Marktdurchdringung stark ansteigen, sodass diese in den folgenden fünf Jahren 40 % erreichen könn-te. Würde die aktuelle Aufmerksamkeit für die The-matik automatisiertes Fahren zurückgehen, ist eher eine Entwicklung wie bei der Spurverlassens-Warn-funktion (LDW) oder einer Auffahr-Warnfunktion (FCW) zu erwarten.

Neben der freiwilligen Einführung von automatisier-ten Systemen kann auch eine verpflichtende Ein-führung für Neufahrzeuge betrachtet werden. Als Basis für diese Betrachtung wird das Szenario ver-gleichbar Airbag genommen.

Basierend auf den durchgeführten Betrachtungen und den untersuchten Szenarien werden folgende Marktdurchdringungsraten für die weitere Betrach-tung ausgewählt:

- 5 % Marktdurchdringung,
- 25 % Marktdurchdringung,
- 50 % Marktdurchdringung,
- 100 % Marktdurchdringung.

Aufgrund des hohen gesellschaftlichen Interesses an automatisierten Fahrfunktionen wird für die Marktdurchdringung ein Verlauf ähnlich dem ESP angenommen. Für den Fall einer Markteinführung im Jahr 2020 ergibt sich daraus eine Marktdurch-dringung von 50 % im Jahr 2035.

System	Markt-einführung	Marktdurchdringungsrate	
		2013	2015
Airbag	1981	98 %	98 %
ACC	1999	3 %	5 %
ESP	1995	68 %	73 %
FCW	2003	2 %	4 %
LDW	2007	1 %	2 %

Tab. 5-1: Übersicht Eingangsdaten für Marktdurchdringungs-szenarien auf Basis von [FOLLMER et al. (2015)]; [GRUSCHWITZ et al. (2017)]

5.2 Identifikation der Wirkfelder

Ziel dieses Kapitels ist die Identifizierung und Quan-tifizierung der Wirkfelder je Fahrfunktion nach der in Kapitel 4.1.1 erläuterten Methodik auf Basis der

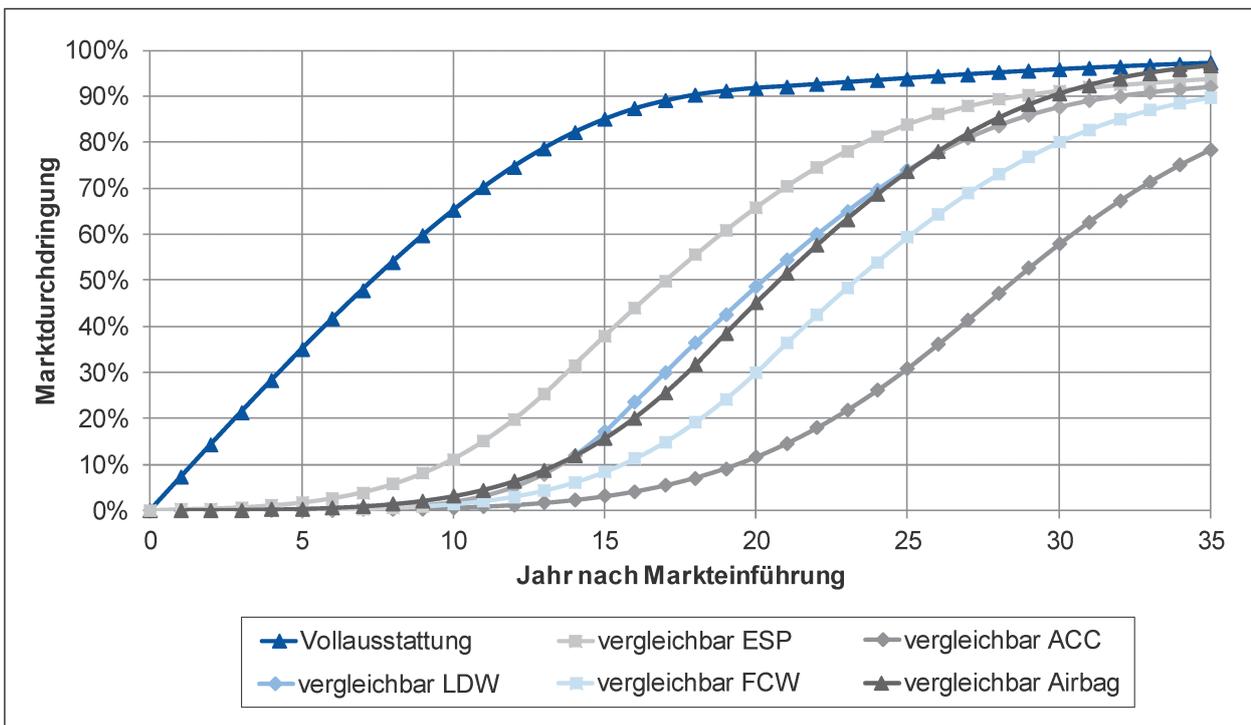


Bild 5-1: Marktdurchdringungsrate für sechs verschiedene Szenarien

amtlichen Unfalldaten (vgl. Kapitel 5.2.1) als auch auf Basis der GIDAS-Daten (vgl. Kapitel 5.2.2).

Zunächst wird in Kapitel 5.2.1 die amtliche Datengrundlage zur Ermittlung der Wirkfelder vorgestellt. Da die von den Fahrfunktionen beherrschbaren Szenarien durch den dreistelligen Unfalltypen definiert sind, können nur Unfalldaten aus den Bundesländern untersucht werden, die den dreistelligen Unfalltypen führen. Aufgrund dieser Einschränkung wird zunächst das Unfallgeschehen aus dieser Stichprobe analysiert und daraufhin untersucht, ob die Stichprobe für das Unfallgeschehen in Deutschland repräsentativ ist. Anschließend wird anhand des Beispiels des Autobahn-Chauffeurs die Ermittlung der Wirkfelder erläutert. Abschließend werden die Wirkfelder aller betrachteter Fahrfunktionen sowie FAS-Pakete vorgestellt.

In Kapitel 5.2.2 wird die GIDAS-Datengrundlage erläutert, anhand des Autobahn-Chauffeurs das Vorgehen zur Ermittlung der Wirkfelder veranschaulicht und abschließend die Wirkfelder aller betrachteten automatisierten Fahrfunktionen sowie der FAS-Pakete vorgestellt.

5.2.1 Identifikation auf Basis einer repräsentativen Auswahl der amtlichen Unfallstatistik

Im Folgenden wird die Identifikation der Wirkfelder auf Basis der amtlichen Unfallstatistik erläutert.

Datengrundlage

Als Datengrundlage für die Bestimmung der Wirkfelder dienen die Unfälle mit Personenschaden sowie die schwerwiegenden Unfälle mit Sachschaden der Jahre 2012 bis 2014. Ein entsprechender anonymisierter Datensatz aus dem Datenbestand der amtlichen Straßenverkehrsunfallstatistik wurde von der BASt für Forschungszwecke zur Verfügung gestellt.

Das Wirkfeld der Fahrfunktionen wird einmal auf Grundlage der Unfälle mit Personenschaden U(P) und einmal auf Grundlage der Unfälle mit Personenschaden sowie der schwerwiegenden Unfälle mit Sachschaden U(P) + U(SS) berechnet. Da die GIDAS-Datenbank als Datenbasis für die Ermittlung des Unfalländerungspotenzials mittels der Simulationen dient, ist diese Differenzierung auf das Erhebungskriterium von mindestens einer verletzten Person in der GIDAS-Datenbank zurückzuführen.

Im weiteren Verlauf des Berichts werden aus Gründen der Einheitlichkeit die Wirkfelder und alle Analysen für die Unfälle mit Personenschaden untersucht. Äquivalente Auswertungen auf Basis der Unfälle mit Personenschaden und der schwerwiegenden Unfälle mit Sachschaden befinden sich im Anhang 3.

Des Weiteren werden in diesem Projekt nur Unfälle unter Pkw-Beteiligung betrachtet.

Aufgrund der enormen Komplexität von Unfällen mit mehr als zwei Beteiligten werden nur Unfälle mit maximal zwei Beteiligten simuliert (vgl. Kapitel 5.3). Aus diesem Grund werden die Wirkfelder sowohl unter Berücksichtigung einer maximalen Verkehrsbeteiligung von zwei Beteiligten als auch ohne diese Einschränkung ermittelt. Jedoch muss unter den ersten beiden Beteiligten mindestens ein Pkw sein.

Da die von der Fahrfunktion beherrschbaren Szenarien durch die dreistelligen Unfalltypen definiert sind, werden die Wirkfelder auf Basis der Unfälle berechnet, die sich in den fünf Bundesländern ereigneten, die den dreistelligen Unfalltypen führen. Daher ergibt sich eine Aufteilung der Bundesländer in die Bundesländer, die den dreistelligen Unfalltypen führen und in diejenigen Bundesländer, die den dreistelligen Unfalltypen nicht führen. Folgende Bundesländer führen den dreistelligen Unfalltypen:

- Niedersachsen,
- Nordrhein-Westfalen,
- Rheinland-Pfalz,
- Saarland,
- Sachsen-Anhalt.

Die Datengrundlage – Unfälle mit Personenschaden sowie schwerwiegende Unfälle mit Sachschaden unter Pkw-Beteiligung zwischen 2012 und 2014 – basiert auf einer Sonderauswertung der Bundesanstalt für Straßenwesen.

Einschränkung der Datengrundlage auf Länder mit dreistelligem Unfalltyp

Da die dreistelligen Unfalltypen nur für fünf Bundesländer vorliegen, muss untersucht werden, ob die Unfallstruktur der fünf Bundesländer für die Unfallstruktur der Bundesrepublik Deutschland repräsentativ ist. Um diese Frage zu beantworten, wird über

den einstelligen Unfalltypen, der bundesweit einheitlich ist, untersucht, ob eine Verzerrung der Stichprobe (Unfälle der fünf Bundesländer, die den dreistelligen Unfalltypen führen) bezüglich der Grundgesamtheit (Unfälle in Deutschland) vorliegt. Dies wird in Abhängigkeit der Ortslage überprüft. Da die Unfälle der fünf Bundesländer eine Teilmenge der Unfälle von Gesamtdeutschland darstellen und daher ein Vergleich der fünf Bundesländer zu Deutschland das Ergebnis verfälschen würde, wird an dieser Stelle die Unfallstruktur der fünf Bundesländer mit der Unfallstruktur der verbleibenden Bundesländer, d. h. die Unfälle Deutschlands exklusive der Unfälle der fünf Bundesländer, gegenübergestellt. Als Datenbasis dienen die Unfälle mit Personenschaden unter Beteiligung von Pkw der Jahre 2012 bis 2014. Im Anhang 4 sind die äquivalenten Verteilungen mit der Datenbasis Unfälle mit Personenschaden sowie die schwerwiegenden Unfälle mit Sachschaden unter Beteiligung von Pkw der Jahre 2012 bis 2014 dargestellt.

Tabelle 5-2 zeigt die Verteilung der einstelligen Unfalltypen in der Grundgesamtheit und in der Stichprobe für alle Ortslagen insgesamt. Tabelle 5-3 bis Tabelle 5-5 zeigen die Verteilungen sowie deren Gewichtung in Abhängigkeit der Ortslage.

Die Verteilung der Unfälle auf die drei Ortslagen – innerorts, außerorts (ohne BAB) und BAB sind in den fünf Bundesländern und in den verbleibenden Bundesländern annähernd gleich verteilt.

Die relativen Anteile sind bei den je nach Ortslage am häufigsten auftretenden Unfalltypen in einer gleichen Größenordnung. Beispielsweise sind auf Bundesautobahnen Fahrnfälle und Unfälle im Längsverkehr die am häufigsten auftretenden Unfalltypen. Diese Unfälle machen in Summe sowohl in den fünf Bundesländern als auch in verbleibenden Bundesländern einen Anteil von über 85 % aller Unfälle auf Bundesautobahnen in der jeweiligen Stichprobe aus. Obwohl auf den ersten Blick der relative Anteil der Unfälle im Längsverkehr in den

Unfalltyp	Verbleibende Bundesländer		Unfälle der fünf Bundesländer (dreistelliger Unfalltyp)	
	Anzahl	Anteil	Anzahl	Anteil
Fahrnfall	61.971	14,3 %	40.240	13,7 %
Abbiegeunfall	63.850	14,7 %	49.777	16,9 %
Einbiegen-/Kreuzen-Unfall	110.534	25,5 %	74.225	25,2 %
Überschreiten-Unfall	21.491	5,0 %	15.665	5,3 %
Unfall durch ruhenden Verkehr	13.633	3,1 %	12.687	4,3 %
Unfall im Längsverkehr	122.790	28,3 %	75.192	25,5 %
Sonstiger Unfall	39.791	9,2 %	26.726	9,1 %
Insgesamt	434.060	100,0 %	294.512	100,0 %
Anteil gesamt	100,0 %		100,0 %	

Tab. 5-2: Unfalltypenverteilung für die Unfallstruktur der fünf Bundesländer sowie für die verbleibenden Bundesländer 2012 bis 2014 – U(P) für alle Ortslagen

Unfalltyp	Verbleibende Bundesländer		Unfälle der fünf Bundesländer (dreistelliger Unfalltyp)	
	Anzahl	Anteil	Anzahl	Anteil
Fahrnfall	18.624	6,3 %	13.299	6,6 %
Abbiegeunfall	51.899	17,7 %	39.288	19,4 %
Einbiegen-/Kreuzen-Unfall	89.730	30,6 %	59.177	29,2 %
Überschreiten-Unfall	20.801	7,1 %	15.025	7,4 %
Unfall durch ruhenden Verkehr	13.189	4,5 %	12.182	6,0 %
Unfall im Längsverkehr	70.621	24,1 %	44.004	21,7 %
Sonstiger Unfall	28.558	9,7 %	19.611	9,7 %
Insgesamt	293.422	100,0 %	202.586	100,0 %
Anteil innerorts	67,6 %		68,8 %	

Tab. 5-3: Unfalltypenverteilung für die Unfallstruktur der fünf Bundesländer sowie für die verbleibenden Bundesländer 2012 bis 2014 – U(P) für Ortslage innerorts

Unfalltyp	Verbleibende Bundesländer		Unfälle der fünf Bundesländer (dreistelliger Unfalltyp)	
	Anzahl	Anteil	Anzahl	Anteil
Fahrunfall	35.819	32,4 %	21.922	30,3 %
Abbiegeunfall	11.881	10,8 %	10.368	14,3 %
Einbiegen-/Kreuzen-Unfall	20.248	18,3 %	14.604	20,2 %
Überschreiten-Unfall	626	0,6 %	599	0,8 %
Unfall durch ruhenden Verkehr	371	0,3 %	486	0,7 %
Unfall im Längsverkehr	33.002	29,9 %	19.179	26,5 %
Sonstiger Unfall	8.538	7,7 %	5.234	7,2 %
Insgesamt	110.485	100,0 %	72.392	100,0 %
Anteil innerorts	25,5 %		24,6 %	

Tab. 5-4: Unfalltypenverteilung für die Unfallstruktur der fünf Bundesländer sowie für die verbleibenden Bundesländer 2012 bis 2014 – U(P) für Ortslage außerorts ohne BAB

Unfalltyp	Verbleibende Bundesländer		Unfälle der fünf Bundesländer (dreistelliger Unfalltyp)	
	Anzahl	Anteil	Anzahl	Anteil
Fahrunfall	7.528	25,0 %	5.019	25,7 %
Abbiegeunfall	70	0,2 %	121	0,6 %
Einbiegen-/Kreuzen-Unfall	556	1,8 %	444	2,3 %
Überschreiten-Unfall	64	0,2 %	41	0,2 %
Unfall durch ruhenden Verkehr	73	0,2 %	19	0,1 %
Unfall im Längsverkehr	19.167	63,6 %	12.009	61,5 %
Sonstiger Unfall	2.695	8,9 %	1.881	9,6 %
Insgesamt	30.153	100,0 %	19.534	100,0 %
Anteil innerorts	6,9 %		6,6 %	

Tab. 5-5: Unfalltypenverteilung für die Unfallstruktur der fünf Bundesländer sowie für die verbleibenden Bundesländer 2012 bis 2014 – U(P) für Ortslage BAB

fünf Bundesländern mit nur 61,5 % im Vergleich zu dem Anteil dieses Unfalltyps in den verbleibenden Bundesländern mit 63,5 % geringer erscheint, ist die Wirkung dieses Unterschiedes aufgrund der Größe dieses Anteils gering. Wird der Quotient aus den beiden relativen Anteilen gebildet ($63,3/61,5=1,03$) ist erkennbar, dass die Abweichung gering ist. Die relativen Anteile dieser beiden Unfalltypen sind folglich in den beiden Stichproben annähernd gleich. Bei den je nach Ortslage selten auftretenden Unfalltypen kann es hingegen zu deutlichen Abweichungen in der Größenordnung des Quotienten der relativen Anteile kommen. Beispielsweise liegt der relative Anteil der Abbiegeunfälle auf Bundesautobahnen in den fünf Bundesländern bei 0,6 % und in den verbleibenden Bundesländern bei 0,2 %. Jedoch hat diese Abweichung einen minimalen Einfluss auf das Gesamtergebnis, da die Unfälle dieses Unfalltyps einen geringen Anteil am Unfallgeschehen auf Bundesautobahnen in der jeweiligen Stichprobe haben.

Unter Berücksichtigung der Verzerrung der Stichprobe kann davon ausgegangen werden, dass die Unfallstruktur der fünf Bundesländer für die Unfallstruktur der Bundesrepublik Deutschland repräsentativ ist.

Für die im Anhang 4 äquivalenten Verteilungen mit der Datenbasis Unfälle mit Personenschaden und schwerwiegende Unfälle mit Sachschaden unter Beteiligung von Pkw der Jahre 2012 bis 2014 kann diese Aussage ebenfalls getroffen werden. Es kann festgehalten werden, dass die Unfallstruktur der fünf Bundesländer repräsentativ für die Unfallstruktur in den verbleibenden Bundesländern bzw. in ganz Deutschland ist.

Folglich können die Wirkfelder, die mithilfe der Unfälle aus den fünf Bundesländern, die den dreistelligen Unfalltypen führen, berechnet wurden, als maßgebend angesehen werden.

Diese Aussage werden auch bestätigt durch Tabelle A-17 bis Tabelle A-32 im Anhang 3, die jeweils in ei-

ner Matrix die Verteilungen der Unfallarten und der einstelligen Unfalltypen sowie die Korrelationen zwischen diesen Kenngrößen für das Unfallgeschehen der fünf Bundesländer sowie der verbleibenden Bundesländer darstellen.

Im Anhang 3 sind die Matrizen sowohl für die

- Unfälle mit Personenschaden und die schwerwiegenden Unfälle mit Sachschaden (Tabelle A-17 bis Tabelle A-24) als auch
- für die Unfälle mit Personenschaden (Tabelle A-25 bis Tabelle A-32)

unter Beteiligung von Pkw der Jahre 2012 bis 2014 in Abhängigkeit der Ortslage für die beiden Stichproben enthalten.

Die Untersuchungen zeigen, dass die Unfallstruktur der fünf Bundesländer für die Unfallstruktur der verbleibenden Bundesländer bzw. für Deutschland repräsentativ ist.

Ermittlung der Wirkfelder der automatisierten Fahrfunktionen

Anhand des Autobahn-Chauffeurs, der nur auf Bundesautobahnen operiert, wird die Vorgehensweise zur Reduktion der Wirkfelder erläutert (siehe Tabelle 5-6). Als Datengrundlage dienen die Unfälle mit Personenschaden in den fünf Bundesländern zwischen 2012 bis 2014. Die Eingrenzungen bauen aufeinander auf und werden daher nicht in jedem Schritt wiederholt erwähnt. Im grau hinterlegten Raster sind beispielhaft für das Szenario Fahrt ohne Beeinflussung durch Vorderfahrzeug die sich zum Teil überschneidenden Wirkfelder W5 (Szenario), W5 + W6 (Szenario, Funktionsgrenzen) sowie W5 + W7 (Szenario, fahrer- und fahrzeugbezogene Grenzen) einschließlich der zuvor durchgeführten Einschränkungen dargestellt (vgl. hierzu auch Tabelle 5-11), ebenfalls die Szenarien, die nicht vom Autobahn-Chauffeur beherrscht werden. Diese fließen nicht in das Wirkfeld ein.

Insgesamt ereigneten sich in dem Zeitraum von 2012 bis 2014 354.338 Unfälle mit Personenschaden in den fünf Bundesländern, die den dreistelligen Unfalltypen führen (W1).

Der Autobahn-Chauffeur operiert laut Funktionsbeschreibung außerorts auf Autobahnen. Auf dieser Ortslage bzw. Straßenklasse ereigneten sich zwischen 2012 bis 2014 21.860 Unfälle mit Personenschaden (W2).

Da nur Unfälle mit Pkw-Beteiligung untersucht werden, wird das Wirkfeld auf 19.534 Unfälle mit Personenschaden auf Bundesautobahnen in den fünf Bundesländern in dem Betrachtungszeitraum weiter eingeschränkt (W3). Da Unfälle ohne Pkw-Beteiligung durch die hier betrachteten automatisierten Fahrfunktionen nicht adressiert werden, können ca. 11 % der Unfälle auf BAB nicht adressiert werden.

Aus methodischen Gründen können nur Unfälle mit maximal zwei Beteiligten in den späteren Simulationen zur Bestimmung des Unfalländerungspotenzials berücksichtigt werden. Es ereigneten sich 14.497 Unfälle mit Personenschaden mit maximal zwei Beteiligten unter Beteiligung von mindestens einem Pkw auf Bundesautobahnen. 5.037 Unfälle waren Unfälle mit Personenschaden mit mehr als zwei Beteiligten, bei 4.806 dieser Unfälle war mindestens ein Pkw unter den ersten beiden Beteiligten (W4). Es wird die Annahme getroffen werden, dass bei Unfälle mit mehr als zwei Beteiligten, wobei mindestens ein Pkw unter den ersten beiden Beteiligten war, durch die Vermeidung der ersten Kollision die folgenden Kollisionen und somit der Unfall vermieden oder zumindest die Unfallfolgen schwere verringert werden kann. Daher werden zur Bestimmung des Wirkfeldes alle Unfälle betrachtet, bei denen unter den ersten beiden Beteiligten mindestens ein Pkw beteiligt war. Um einen Überblick zu erhalten, wie viele Unfälle mit maximal zwei Beteiligten und wie viele Unfälle mit mehr als zwei Beteiligten, wobei ein Pkw unter den ersten beiden Beteiligten sein muss, vorliegen, werden die weiteren Einschränkungen auf diesen beiden Säulen aufgebaut.

Der Autobahn-Chauffeur beherrscht folgende Szenarien:

- Fahrt ohne Beeinflussung durch Vorausfahrende,
- Annäherung an ein stehendes Objekt,
- Annäherung an ein Vorderfahrzeug,
- Fahren im Stau,
- Einscheren eines anderen Fahrzeugs und
- einfacher Fahrstreifenwechsel.

Auf Grundlage der szenarienbasierten Beschreibung der automatisierten Fahrfunktion sind in Kapitel 4.1.1 die relevanten dreistelligen Unfalltypen für jedes Szenario identifiziert worden, wobei die dreistelligen Unfalltypen für die fünf Bundesländer Nie-

U(P) in fünf Bundesländern, die den 3-stelligen Unfalltyp führen 2012-2014								
W1	UP in fünf Ländern		354.338					
W2	Ortslage + Straßenklasse		BAB					
			21.860					
W3	unter Beteiligung von Pkw		ja				kein Pkw	
			19.534				2.326	
W4	nach Unfallbeteiligung		Pkw- Allein- U.	2 Bet. Pkw 1. o./u. 2.	Summe	3+ Bet. Pkw 1. o./u. 2. Pkw 3+		
			4.412	10.085	14.497	4.806	231	
W5 bzw. W5/W6/W7	Szenarien	Einschränkung						
	Fahrt ohne Beeinflussung durch Vorderfahrzeug	W5	3.244	1.604	4.848	574	22	
		W5 + W6	2.842	1.415	4.257	493	17	
		W5 + W7	2.865	1.480	4.345	537	21	
		W5 + W6 + W7	2.491	1.300	3.791	459	16	
	Annäherung an ein stehendes Objekt	W5 + W6 + W7	25	118	143	69	11	
	Annäherung an ein sich lateral zur Fahrbahn bewegendes Objekt	W5 + W6 + W7	89	37	126	12	5	
	Annäherung an ein Vorderfahrzeug	W5 + W6 + W7	21	3.217	3.238	1.092	57	
	Fahren im Stau	W5 + W6 + W7	5	1.385	1.390	1.272	68	
	Einscheren eines anderen Fahrzeuges	W5 + W6 + W7	48	1.219	1.267	575	13	
	Einfacher Fahrstreifenwechsel	W5 + W6 + W7	0	264	264	169	8	
	Überholen (Gegenverkehr)	W5 + W6 + W7	0	8	8	1	0	
	Einbiegen/Abbiegen	W5 + W6 + W7	0	26	26	3	0	
	Kreuzen	W5 + W6 + W7	0	12	12	0	0	
	Wenden	W5 + W6 + W7	0	14	14	1	0	
W6	Funktionsgrenzen (gilt bis Stufe 3 danach nicht mehr)		10.973			3.755	184	
W7	Fahrer- und fahrzeugbezogene Grenzen (gilt für alle Automatisierungsstufen)		10.279			3.653	178	
Autobahn-Chauffeur		W5	3.356	8.586	11.942	4.228		
		W5 + W6	2.947	7.833	10.780	3.733		
		W5 + W6 + W7	2.590	7.503	10.093	3.636		

Tab. 5-6: Ermittlung des Wirkfeldes U(P) anhand des Autobahn-Chauffeurs

dersachsen, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, Saarland sowie Sachsen-Anhalt vorliegen. Bei Betrachtung der Unfalltypen folgt daraus ein Wirkfeld der Fahrfunktion Autobahn-Chauffeur von 11.942 Unfällen mit Personenschaden mit maximal zwei Beteiligten bzw. 4.228 Unfällen mit mehr als zwei Beteiligten, wobei unter den ersten beiden Beteiligten ein Pkw ist, auf Autobahnen in den Jahren 2012 bis 2014 unter Berücksichtigung der bereits beschriebenen Einschränkungen. Folglich können ca.

weitere 14 % aller Unfälle auf Bundesautobahnen aufgrund von nicht von der Fahrfunktion beherrschbaren Szenarien nicht adressiert werden.

Die Fahrfunktionen haben je nach Automatisierungsstufe Funktionsgrenzen (eine tiefergehende zahlenmäßige Darstellung erfolgt in Tabelle 5-11). Diese Funktionsgrenzen werden durch die Verwendung von Unfallmerkmalen, mit denen die Wirkfelder der Fahrfunktionen reduziert werden, berücksichtigt.

Fahrfunktionen der Automatisierungsstufe 3, wozu auch der Autobahn-Chauffeur zählt, können nicht

- bei starkem Regen,
- Nebel,
- Glatteis und
- in Arbeitsstellen

operieren.

Zur Umsetzung dieser Einschränkungen wird auf die Merkmale

- Straßenzustand,
- allgemeine Unfallursachen,
- Besonderheiten und
- Alkoholeinwirkung

der amtlichen Unfallstatistik zurückgegriffen.

Es werden Unfälle mit den Merkmalen

- Straßenzustand (STRZUST1, STRZUST2) mit der Ausprägung 2 (winterglatt),
- allgemeine Unfallursachen (ALLGURS1, ALLGURS2) mit den Ausprägungen 72 (Straßenverhältnisse – Schnee, Eis) sowie 80 (Witterungsverhältnisse – Nebel) und 81 (Witterungsverhältnisse – starker Regen, Hagel, Schneegestöber usw.) sowie
- Besonderheiten der Unfallstelle (BESHUST1 – BESHUST3) mit der Ausprägung 6 (Arbeitsstelle)

nicht adressiert.

Bei dem Autobahn-Chauffeur ergibt sich aus den Funktionsgrenzen eine weitere Reduktion des Wirkungsfeldes auf 10.780 Unfälle mit maximal zwei Beteiligten bzw. 3.733 Unfälle mit mehr als zwei Beteiligten unter den zuvor genannten Einschränkungen. Die weitere Reduktion des Wirkungsfeldes um die Funktionsgrenzen beträgt 8 % des Unfallgeschehens auf Autobahnen.

Darüber hinaus treten fahrer- und fahrzeugbezogene Einschränkungen auf (vgl. Tabelle 5-11). Diese Einschränkungen sind darauf zurückzuführen, dass automatisierte Fahrfunktionen laut Herstellerbeschreibung nur von nicht alkoholisierten und nicht unter Drogen stehenden Personen geführt werden dürfen. Deshalb werden

- Unfälle mit Fahrzeugen, die technische Mängel aufweisen und

- Unfälle unter Einfluss von Alkohol oder anderen berauschenden Mitteln

nicht betrachtet. Die personenbezogenen Unfallursachen sind auf den Hauptverursacher (1. Beteiligter) bezogen.

Zur Umsetzung dieser Einschränkungen wird auf die Merkmale Unfallursachen und Alkoholeinwirkung der amtlichen Unfallstatistik zurückgegriffen.

Es werden die Unfälle mit den Merkmalen

- Unfallursachen beim 1. Beteiligten (UNF1UR – UNF3UR) mit den Ausprägungen 1 und 2 (Verkehrstüchtigkeit – Alkoholeinfluss, Einfluss anderer berauschender Mittel (z. B. Drogen, Rauschgift)) und mit den Ausprägungen 50 bis 55 (technische Mängel, Wartungsmängel) und
- Alkoholeinwirkung (ALKOHOL) mit den Ausprägungen 1 (ja)

nicht adressiert.

Bei den Funktionsgrenzen und den fahrer- und fahrzeugbezogenen Grenzen wird stets das Prinzip der sicheren Abschätzung verfolgt. Es handelt sich folglich um eine konservative Abschätzung.

Insgesamt können 10.093 Unfälle mit Personenschaden und maximal zwei Beteiligten, davon mindestens ein Pkw, mit dem Autobahn-Chauffeur adressiert werden. Hinsichtlich der Unfälle mit mehr als zwei Beteiligten können 3.636 Unfälle mit Personenschaden adressiert werden, bei denen mindestens ein Pkw unter den ersten beiden Beteiligten ist und die sich auf Autobahnen in den Jahren 2012 bis 2014 ereignet haben.

Mit der Annahme, dass Unfälle mit mehr als zwei Beteiligten (wobei ein Pkw unter den ersten beiden Beteiligten ist) durch die Vermeidung der ersten Kollision potenziell vermieden bzw. deren Unfallfolgeschwere verringert werden können, ergibt sich ein Wirkungsfeld von 13.729 Unfällen mit Personenschaden auf Autobahnen in den fünf Bundesländern innerhalb der drei betrachteten Jahre für den Autobahn-Chauffeur. Wird diese Zahl in Bezug auf alle Unfälle mit Personenschaden auf Autobahnen in dem Betrachtungszeitraum gesetzt, ergibt sich ein Anteil von 63 %. In diesem Beispiel bedeutet dies, dass 63 % aller Unfälle mit Personenschaden auf Autobahnen durch den Autobahn-Chauffeur po-

tenziell adressiert werden können. Folglich können aufgrund der Beschränkung auf Unfälle mit Pkw-Beteiligung ca. 11 %, aufgrund der nicht beherrschbaren Szenarien weitere 14 %, aufgrund der Funktionsgrenzen weitere 8 % und aufgrund der fahrer- und fahrzeugbezogenen Einschränkungen weitere 4 % der Unfälle auf Bundesautobahnen (21.860) nicht adressiert werden.

Die Ergebnisse der Wirkfeldermittlungen für die untersuchten automatisierten Fahrfunktionen sind in Tabelle 5-7 zusammengefasst. In Tabelle 5-8 sind die Wirkfelder für die automatisierten Fahrfunktionen für Unfälle mit Personenschaden mit maximal zwei Beteiligten separat ausgewiesen. Im Anhang 3 sind die äquivalenten Auswertungen für Unfälle mit Personenschaden sowie schwerwiegende Unfälle mit Sachschaden dargestellt.

Wie in Kapitel 3.3 beschrieben, werden neben den automatisierten Fahrfunktionen auch Fahrerassistenzsysteme der Automatisierungsstufe 1 betrachtet. Die zu einem FAS-Paket zusammengefassten Fahrerassistenzsysteme

- Auffahrwarnfunktion (FCW) und autonome Notbremse (AEB),
- Spurverlassens-Warnfunktion und Spurhaltefunktion (LDW)

werden dem Stau-, dem Autobahn- sowie dem Pendler-Chauffeur zugeordnet (vgl. Kapitel 3.3).

Die Ergebnisse der Wirkfeldberechnung für die FAS-Pakete sind in Tabelle 5-9 und Tabelle 5-10 angegeben.

5 Bundesländer 2012 – 2014 U(P)			Stau-Chauffeur		Autobahn-Chauffeur		Pendler-Chauffeur		Universal-Chauffeur		Urbanes Roboter Taxi	
			Absolut	Relativ	Absolut	Relativ	Absolut	Relativ	Absolut	Relativ	Absolut	Relativ
Bundesautobahnen	21.860	13.296	61 %	13.729	63 %	27.195	56 %	207.725	63 %			
außerorts	Bundesstraßen	26.763										
	Landesstraßen	33.325										
	Übrige	27.039										
innerorts	Bundesstraßen	32.186						s. o.	s. o.	160.352	65 %	
	Landesstraßen	54.502										
	Kreisstraßen	23.950										
	Gemeindestraßen und Übrige	134.713										
5 Bundesländer	354.338	13.296	4 %	13.729	4 %	27.195	8 %	207.725	59 %	160.352	45 %	

Tab. 5-7: Wirkfelder U(P) der automatisierten Fahrfunktionen

5 Bundesländer 2012 – 2014 U(P) max. 2 Beteiligte			Stau-Chauffeur		Autobahn-Chauffeur		Pendler-Chauffeur		Universal-Chauffeur		Urbanes Roboter Taxi	
			Absolut	Relativ	Absolut	Relativ	Absolut	Relativ	Absolut	Relativ	Absolut	Relativ
Bundesautobahnen	14.497	9.829	68 %	10.093	70 %	21.040	61 %	184.454	76 %			
außerorts	Bundesstraßen	19.838										
	Landesstraßen	25.484										
	Übrige	19.631										
innerorts	Bundesstraßen	24.173						s. o.	s. o.	145.221	79 %	
	Landesstraßen	41.749										
	Kreisstraßen	18.631										
	Gemeindestraßen und Übrige	98.305										
5 Bundesländer	262.308	9.829	4 %	10.093	4 %	21.040	8 %	184.454	70 %	145.221	55 %	

Tab. 5-8: Wirkfelder U(P) der automatisierten Fahrfunktionen – maximal zwei Beteiligte

5 Bundesländer 2012 – 2014 U(P)			FAS-Paket des Stau-Chauffeurs		FAS-Paket des Autobahn-Chauffeurs		FAS-Paket des Pendler-Chauffeurs		
			Absolut	Relativ	Absolut	Relativ	Absolut	Relativ	
Bundesautobahnen		21.860	Ohne Berücksichtigung der Wirkung auf BAB						
Außerorts	Bundesstraßen	26.763	147.610	44 %	147.971	45 %	133.537	45 %	
	Landesstraßen	33.325							
	Übrige	27.039							
Innerorts	Bundesstraßen	32.186							
	Landesstraßen	54.502							
	Kreisstraßen	23.950							
	Gemeindestraßen und Übrige	134.713							
5 Bundesländer		354.338	147.610	42 %	147.971	42 %	133.537	38 %	

Tab. 5-9: Wirkfelder U(P) der FAS-Pakete

5 Bundesländer 2012 – 2014 U(P) ≤ 2 Beteiligte			FAS-Paket des Stau-Chauffeurs		FAS-Paket des Autobahn-Chauffeurs		FAS-Paket des Pendler-Chauffeurs		
			Absolut	Relativ	Absolut	Relativ	Absolut	Relativ	
Bundesautobahnen		14.497	Ohne Berücksichtigung der Wirkung auf BAB						
Außerorts	Bundesstraßen	19.838	130.485	53 %	130.771	53 %	118.972	52 %	
	Landesstraßen	25.484							
	Übrige	19.631							
Innerorts	Bundesstraßen	24.173							
	Landesstraßen	41.749							
	Kreisstraßen	18.631							
	Gemeindestraßen und Übrige	98.305							
5 Bundesländer		262.308	130.485	50 %	130.771	50 %	118.972	45 %	

Tab. 5-10: Wirkfelder U(P) der FAS-Pakete – maximal zwei Beteiligte

Die Vorgehensweise zur Bestimmung der Wirkfelder je Fahrfunktion bzw. FAS-Paket ist im Anhang 3 angegeben. Unfalltypenverteilungen in Abhängigkeit der Ortslage sind in Anhang 5 dargestellt, die eine weitere Detaillierung der Wirkfelder ermöglichen.

Im Folgenden soll eine Analyse Aufschluss über die Anzahl der Unfälle geben, die sich nicht in die vorgenannten Szenarien (W5) einstufen lassen. Weiterhin erfolgt die tiefergehende Auflistung der Funktionsgrenzen (W6) und fahrer- und fahrerbezogenen Grenzen (W7). Die Analyse wird auf Basis der Unfälle mit Personenschaden in den fünf Bundesländern zwischen 2012 und 2014 in Abhängigkeit der Ortslage durchgeführt (siehe Tabelle 5-11). Eine äquivalente Tabelle auf Datenbasis der Unfälle mit Personenschaden sowie schwerwiegenden Un-

fälle mit Sachschaden befindet sich im Anhang 3. In den Tabellen sind die Anzahlen der Unfälle mit den jeweiligen Merkmalen in Abhängigkeit der Ortslage angegeben. Beispielsweise haben sich 3.460 Unfälle mit Personenschaden bei einem winterglatten Straßenzustand auf innerörtlichen Straßen in den Jahren 2012 bis 2014 in den fünf Bundesländern ereignet. In der Tabelle kann es zum doppelten Aufkommen von einem Unfall kommen. Beispielsweise kann ein und derselbe Unfall sowohl mit dem Merkmal winterglatter Straßenzustand als auch mit dem Merkmal Allgemeine Unfallursachen – Straßenverhältnisse: Schnee, Eis aufgelistet sein und wird somit in dieser Tabelle doppelt aufgelistet.

Wie in Kapitel 4.1.1 beschrieben, werden nur Unfälle mit Pkw-Beteiligung sowie aus methodischen Gründen nur Unfälle mit maximal zwei Beteiligten be-

W		Unfallmerkmal								
W1		U(P) in den fünf Bundesländern, die den dreistelligen Unfalltyp führen 2012 – 2014		354.338						
W2		Ortslage/Straßenklasse		Innerorts		Außerorts (ohne BAB)		BAB		
				245.351		87.127		21.860		
W3/ W4		Verkehrsbeteiligung/ Anzahl Beteiligte		ja	kein Pkw beteiligt	ja	kein Pkw beteiligt	ja	kein Pkw beteiligt	
				202.586	42.765	72.392	14.735	19.534	2.326	
W5	aus dem Wirkfeld fallende Unfälle	Szenarien: Parken, Zurücksetzen und Sonstige		21.392		4.683		1.751		
		xy9-er Unfalltypen		12.216		1.490		1.162		
		nicht definierte Unfalltypen		314		162		19		
		Summe		33.922		6.335		2.932		
	im Wirkfeld verbleibende Unfälle	Szenarien (UNF-TYP)		168.664		66.057		16.602		
W6	aus dem Wirkfeld fallende Unfälle	Straßenzustand (STRZUST1, STRZUST2)		winterglatt (2)	3.460	4.630		720		
		Allgemeine Unfallursachen (ALLGURS1, ALLGURS 2)	Straßenverhältnisse: Schnee, Eis (72)		1.742		3.419		542	
			Witterungseinflüsse: Nebel (80)		1.799		3.561		560	
			starker Regen, Hagel, Schneegestöber (81)		2.039		3.499		603	
		Besonderheit (BEHUST1-3)		Arbeitsstelle (6)	1.078		466		1.137	
		Summe (Doppelnennungen)			10.118		15.575		3.562	
	im Wirkfeld verbleibende Unfälle	Funktionsgrenzen		164.548		61.216		14.912		
W7	aus dem Wirkfeld fallende Unfälle	Unfallursachen beim 1. Beteiligten (UNF1UR- UNF3UR)	Alkoholeinfluss (1)		6.744		3.772		728	
			Einfluss anderer berauschender Mittel (2)		1.026		444		175	
			Technische Mängel, Wartungsarbeiten (50-55)		986		623		603	
		Alkohol (ALKOHOL)		Alkoholeinwirkung ja (1)	6.744		3.772		728	
		Summe (Doppelnennungen)			15.500		8.611		2.234	
	im Wirkfeld verbleibende Unfälle	Fahrer- und fahrzeugbezogene Grenzen		158.080		57.475		14.110		

Tab. 5-11: Unfallmerkmals-Analyse (5 Bundesländer U(P) 2012 bis 2014)

trachtet. Die Eingrenzung auf maximal zwei Beteiligte ist für die Analyse des Unfalländerungspotenzials relevant, da keine Massen-Unfälle simuliert werden können. Für die Merkmalsanalyse können alle Unfälle unter Pkw-Beteiligung hinzugezogen werden.

Es ereigneten sich 354.338 Unfälle mit Personenschaden in den fünf Bundesländern zwischen 2012 bis 2014, davon ca. 69 % innerorts, 25 % außerorts (ohne BAB) und 6 % auf Autobahnen. Unfälle ohne Pkw-Beteiligung haben einen Anteil von 11 bis 17 %

je nach Ortslage. Keine der betrachteten Fahrfunktionen beherrscht die Szenarien Parken, Zurücksetzen sowie Sonstige. Die dreistelligen Unfalltypen, die auf 9 enden (z. B. 109, 119), können keinem Szenario zugeordnet werden, da der Unfallhergang nicht rekonstruierbar ist. Darüber hinaus sind in der Datenbank Unfalltypen angegeben, die nach dem Unfalltypenkatalog nicht definiert sind. Diese Unfalltypen bzw. Szenarien machen je nach Ortslage einen Anteil von 9 bis 16 % des Unfallgeschehens aus.

Die Fahrfunktionen haben je nach Automatisierungsstufe Funktionsgrenzen. Es ist zu erkennen, dass Unfälle auf winterglatten Straßen sowie unter ungünstigen Straßenbedingungen einen besonders hohen Anteil am Unfallgeschehen auf der jeweiligen Ortslage haben. Diese Unfälle können mithilfe des automatisierten Fahrens nicht vermieden werden und werden daher aus den Wirkungsfeldern der Fahrfunktionen der Automatisierungsstufe 3 gestrichen.

Darüber hinaus werden nur Unfälle ohne technische Mängel sowie ohne Einfluss von Alkohol oder anderen berauschenden Mitteln betrachtet. Die personenbezogenen Unfallursachen sind auf den Hauptverursacher (1. Beteiligter) bezogen.

Die Ergebnisse der Analyse und der Wirkungfeldermittlung lassen folgende Schlussfolgerungen zu:

- Die alleinige Betrachtung von Unfällen, bei denen mindestens ein Pkw beteiligt war (1. oder 2. Beteiligter ist ein Pkw), reduziert die Wirkungsfelder der innerorts-operierenden Fahrfunktionen im Vergleich zu den außerorts-operierenden Fahrfunktionen maßgeblich. Dies kann auf die Tatsache zurückgeführt werden, dass innerorts ein anderer Modal Split vorherrscht als außerorts. Der Modal Split beschreibt die Verteilung des Transportaufkommens auf verschiedene Verkehrsmittel.
- Die methodische Eingrenzung, dass Fahrfunktionen nur Unfälle mit maximal zwei Beteiligten potenziell adressieren können, reduziert die Wirkungsfelder des Stau-, Autobahn und Pendler-Chauffeurs. Außerorts, insbesondere auf Bundesautobahnen, ereignen sich im Vergleich zu Innerortsstraßen viele Unfälle mit mehr als zwei Beteiligten. Unter der Annahme, dass durch die Vermeidung des ersten Unfalls, wobei mindestens ein Pkw unter den ersten beiden Beteiligten sein muss, die Folgeunfälle ebenfalls vermieden werden können, kann das Wirkungsfeld mit

allen Unfällen berechnet werden, wobei ein Pkw unter den ersten beiden Beteiligten sein muss.

- Außerorts auf Bundesstraßen treten vermehrt Abbiege-Szenarien auf. Da der Pendler-Chauffeur diese Szenarien nicht beherrscht, ist eine Reduktion des Wirkungsfelds der Funktion festzustellen.
- Die Fahrfunktionen der Automatisierungsstufe 3 operieren nicht unter allen Umfeldbedingungen, wie Regen, Nebel, Glatteis und Arbeitsstellen, was insbesondere die Wirkungsfelder der Fahrfunktionen, die außerorts auf Bundesautobahnen operieren, reduziert.
- Die Fahrer und Fahrzeug bezogenen Grenzen zeigen bei allen Fahrfunktionen eine ähnliche Wirkung.

5.2.2 Identifikation auf Basis der GIDAS-Daten

Im Folgenden wird die Identifikation der Wirkungsfelder auf Basis der GIDAS-Daten erläutert.

Datengrundlage

Die Wirkungfeldermittlung auf Basis der GIDAS-Daten dient dem Zweck, die Eingangsdaten für die Simulationen zu identifizieren. Mittels der Simulationen werden anschließend die Unfalländerungspotenziale der von den Fahrfunktionen bzw. FAS-Paketen beherrschbaren Szenarien unter Berücksichtigung der Marktdurchdringungsraten quantifiziert.

Die GIDAS-Datengrundlage umfasst für die Ermittlung der Wirkungsfelder Unfälle mit Personenschaden mit maximal zwei Beteiligten unter Beteiligung von mindestens einem Pkw aus den Regionen Dresden und Hannover für den Zeitraum 2011 bis 2015.

Die Eingrenzung auf Unfälle mit Personenschaden ist auf das Erhebungskriterium von mindestens einer verletzten Person in der GIDAS-Datenbank zurückzuführen. Die Beschränkung auf Unfälle mit maximal zwei Beteiligten ist mit der zunehmenden Komplexität des Unfallhergangs von Unfällen mit mehr als zwei Beteiligten zu begründen. Mit der Annahme, dass Unfälle mit mehr als zwei Beteiligten durch die Vermeidung der ersten Kollision ganz vermieden bzw. die Unfallfolgen abgemindert werden, können die aus der späteren Simulation hervorgehenden Unfalländerungspotenziale auch auf Unfälle mit mehr als zwei Beteiligten transferiert werden.

Die im Vergleich zu den amtlichen Unfalldaten, die aus den Jahren 2012 bis 2014 stammen, wurden die GIDAS-Daten auf fünf Jahre (2011 bis 2015) ausgedehnt, da die GIDAS-Datenbank über eine nur begrenzte Anzahl von Unfällen pro Jahr verfügt.

Ermittlung der Wirkfelder der automatisierten Fahrfunktionen

Für die Bestimmung der GIDAS-Wirkfelder werden die Unfälle in einem ersten Schritt mithilfe der Unfallmerkmale der amtlichen Unfallstatistik, die auch für die Bestimmung der Wirkfelder in Kapitel 4.1.1 dienen, eingeschränkt. Die Merkmale der Verkehrsunfallanzeige (bzw. amtlichen Unfallstatistik) sind auch für die Unfälle der GIDAS-Datenbank angegeben. Die Fahrfunktionen bzw. FAS-Pakete sind u. a. durch einen maximalen Geschwindigkeitsbereich definiert. In der Wirkfelderermittlung mithilfe der amtlichen Unfalldaten konnte der Geschwindigkeitsbereich nicht berücksichtigt werden, da die amtliche Unfallstatistik nicht über ein Merkmal verfügt, das Aufschluss über die gefahrene Geschwindigkeit gibt. Da die GIDAS-Datenbank über detailliertere Merkmale als die amtliche Unfallstatistik verfügt, werden die Unfälle in einem weiteren Schritt mit dem Merkmal ‚Ausgangsgeschwindigkeit (V0)‘ der GIDAS-Datenbank weiter eingeschränkt. An dieser Stelle ist anzumerken, dass nur Unfälle mit einer gültigen V0-Angabe in die Wirkfelderermittlung auf Basis der GIDAS-Daten Eingang finden.

Anhand des Autobahn-Chauffeurs wird die Vorgehensweise zur Reduktion der Wirkfelder mithilfe der GIDAS-Daten erläutert. Als Datengrundlage dienen die Unfälle mit Personenschaden mit maximal zwei Beteiligten, wobei unter den ersten beiden Beteiligten ein Pkw sein muss, in den Regionen Hannover und Dresden zwischen 2011 bis 2015. Die Eingrenzungen bauen aufeinander auf und werden daher nicht in jedem Schritt wiederholt aufgeführt.

Der verwendete GIDAS-Datenbankauszug enthält 130 Unfälle auf Bundesautobahnen mit maximal zwei Beteiligten unter Beteiligung von mindestens einem Pkw und einer gültigen V0-Angabe. Es werden für den Autobahn-Chauffeur in Abhängigkeit von Ortslage und Straßenklasse sowie der beherrschbaren Szenarien die maximale Anzahl an vorhandenen Unfällen in der GIDAS-Datenbank bestimmt. Dies entspricht 99 Unfällen. Äquivalent zu der Bestimmung der Wirkfelder in Kapitel 4.1.1 werden mithilfe der Merkmale der amtlichen Unfallstatistik die Unfälle der GIDAS-Datenbank aufgrund der Funktions-

grenzen und fahrer- und fahrzeugbezogenen Grenzen weiter eingeschränkt. Nach Abzug der Funktionsgrenzen verbleiben 92 Unfälle und nach der weiteren Einschränkung anhand der fahrer- und fahrzeugbezogenen Grenzen 91 Unfälle.

Nachdem die Unfälle der GIDAS-Datenbank anhand der Merkmale der amtlichen Unfallstatistik gefiltert wurden, werden die Unfälle in einem weiteren Schritt mit dem Merkmal ‚Ausgangsgeschwindigkeit (V0)‘ der GIDAS-Datenbank weiter eingeschränkt.

Als Ausgangsgeschwindigkeit wird die Fahrgeschwindigkeit zu Beginn einer jeden Sequenz bezeichnet und in km/h angegeben. Da in diesem Fall die Geschwindigkeit der 1. Sequenz genutzt wird, ist davon auszugehen, dass dies die Fahrgeschwindigkeit vor dem Unfall ist.

Für den Autobahn-Chauffeur verbleiben somit 78 Unfälle, die als Eingangsdaten in die späteren Simulationen dienen.

In Tabelle 5-12 bzw. Tabelle 5-13 sind die Ergebnisse der Wirkfelderermittlung auf Basis der GIDAS-Daten für die automatisierten Fahrfunktionen bzw. für die FAS-Pakete der ausgewählten automatisierten Fahrfunktionen angegeben.

Da die Fahrfunktionen u. a. durch einen maximalen Geschwindigkeitsbereich definiert sind und dieser in der GIDAS-Wirkfelderermittlung durch die Hinzuziehung des Merkmals ‚Ausgangsgeschwindigkeit V0‘ Berücksichtigung findet, soll eine Analyse Auskunft darüber geben, inwiefern die GIDAS-Wirkfelder durch die Berücksichtigung dieses Merkmals reduziert wurden. Dafür sind in Abhängigkeit der Ortslage die kumulierten Häufigkeiten der Ausgangsgeschwindigkeiten in Bild 5-2 angegeben. Die Ausgangsgeschwindigkeit V0 bezieht sich auf die 1. Sequenz bzw. Kollision des 1. Beteiligten. Die Auswertung beruht auf der Grundgesamtheit aller der für dieses Projekt zur Verfügung gestellter GIDAS-Daten.

Es ist ablesbar, dass sich auf Bundesautobahnen 12 % der Unfälle mit einer Ausgangsgeschwindigkeit V0 von unter 60 km/h, 85 % der Unfälle mit einer Ausgangsgeschwindigkeit von unter 130 km/h und 97 % der Unfälle mit einer Ausgangsgeschwindigkeit von unter 160 km/h ereignet haben. Dies entspricht den maximalen Geschwindigkeitsbereichen des Stau-, Autobahn- bzw. Universal-Chauffeurs. Außerorts (ohne BAB) ereigneten sich 94 % der Unfälle unter 100 km/h und innerorts 92 % der

GIDAS-Region 2011 – 2015 U(P) Pkw-Beteiligung, max. 2 Beteiligte			Stau- Chauffeur		Autobahn- Chauffeur		Pendler- Chauffeur		Universal- Chauffeur		Urbanes Roboter Taxi	
			Absolut	Relativ	Absolut	Relativ	Absolut	Relativ	Absolut	Relativ	Absolut	Relativ
Bundesautobahnen		130	10	8 %	78	60 %	207	57 %	2.918	76 %		
Außerorts	Bundesstraßen	234										
	Landesstraßen	233										
	Übrige	175										
Innerorts	Bundesstraßen	412							s. o.	s. o.	2.634	81 %
	Landesstraßen	693										
	Kreisstraßen	267										
	Gemeindestraßen und Übrige	1.878										
GIDAS-Region		4.022	10	< 1 %	78	2 %	207	5 %	2.918	73 %	2.634	65 %

Tab. 5-12: GIDAS-Wirkfelder der automatisierten Fahrfunktionen

GIDAS-Region 2011 – 2015 U(P) Pkw-Beteiligung, max. 2 Beteiligte			FAS-Paket des Stau-Chauffeurs		FAS-Paket des Autobahn-Chauffeurs		FAS-Paket des Pendler-Chauffeurs	
			Absolut	Relativ	Absolut	Relativ	Absolut	Relativ
Bundesautobahnen		130						
Außerorts	Bundesstraßen	234						
	Landesstraßen	233						
	Übrige	175						
Innerorts	Bundesstraßen	412	2.268	56 %	2.208	55 %	2.063	51 %
	Landesstraßen	693						
	Kreisstraßen	267						
	Gemeindestraßen und Übrige	1.878						
GIDAS-Region 2011 – 2015		4.022	2.268	56 %	2.208	55 %	2.063	51 %

Tab. 5-13: GIDAS-Wirkfelder der FAS-Pakete

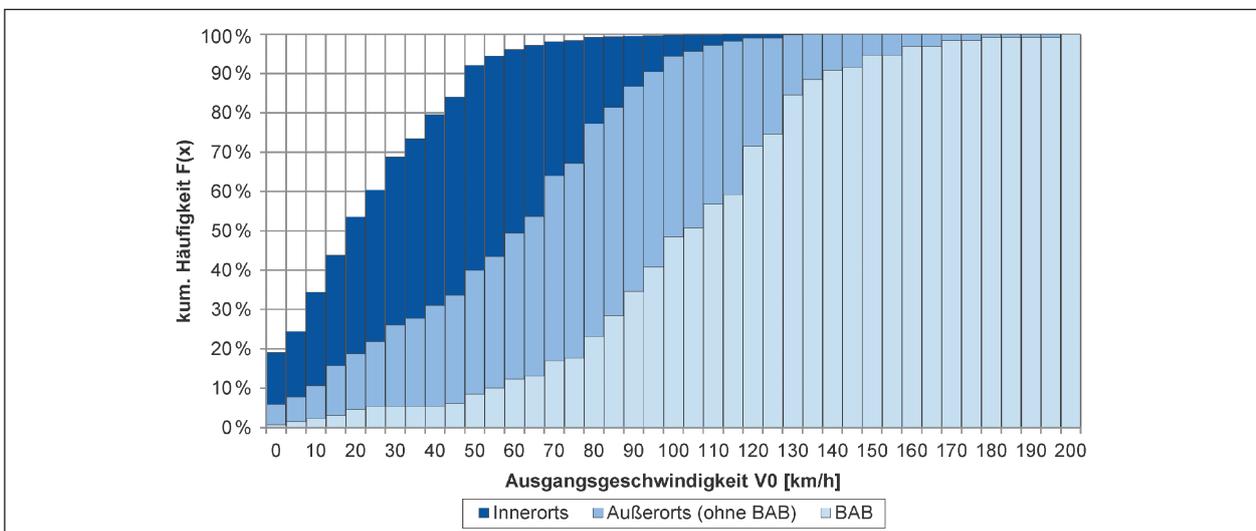


Bild 5-2: Kumulierte Häufigkeit des GIDAS-Merkmal Ausgangsgeschwindigkeit V0 [km/h] auf Basis der GIDAS Unfälle der Jahre 2011 bis 2015

Anteil der in den Szenarien verbleibenden Unfälle nach Ortstlage, Straßenklasse und V0-Geschwindigkeitsbereich auf Basis des GIDAS-Merkmals Ausgangsgeschwindigkeit V0 (2011 bis 2015)																	
Ortslage	Innerorts						Außerorts (ohne BAB)						Autobahn				
	B	L	K	G	alle	B	B	L	K	G	alle	BAB 0-60	BAB 0-130	BAB 130-250	BAB 0-160	BAB 160-250	
Straßenklasse																	
Geschwindigkeitsbereich (in km/h)	0-50																
Szenarien	Einschränkung																
Fahrt ohne Beeinflussung durch Vorderfahrzeug	58 %	52 %	74 %	70 %	100 %	84 %	100 %	96 %	91 %	100 %	100 %	6 %	91 %	9 %	100 %	0 %	
	53 %	52 %	80 %	69 %	100 %	82 %	100 %	94 %	88 %	100 %	100 %	3 %	90 %	10 %	100 %	0 %	
Annäherung an ein stehendes Objekt	50 %	63 %	71 %	95 %	100 %	100 %	100 %	100 %	75 %	100 %	100 %	0 %	100 %	0 %	100 %	0 %	
	50 %	63 %	71 %	95 %	100 %	100 %	100 %	100 %	75 %	100 %	100 %	0 %	100 %	0 %	100 %	0 %	
Annäherung an ein sich lateral zur Fahrbahn bewegendes Objekt	96 %	99 %	99 %	98 %	100 %	80 %	100 %	100 %	89 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	
	96 %	99 %	99 %	98 %	100 %	80 %	100 %	100 %	88 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	
Annäherung an ein Vorderfahrzeug	82 %	85 %	88 %	91 %	100 %	96 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	22 %	78 %	22 %	87 %	13 %	
	81 %	84 %	88 %	91 %	100 %	96 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	24 %	76 %	24 %	86 %	14 %	
Fahren im Stau	93 %	96 %	89 %	96 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	21 %	84 %	16 %	100 %	0 %	
	93 %	96 %	89 %	95 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	22 %	83 %	17 %	100 %	0 %	
Einschernen eines anderen Fahrzeuges	67 %	100 %	100 %	82 %	100 %	91 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	0 %	86 %	14 %	93 %	7 %	
	67 %	100 %	100 %	81 %	100 %	91 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	0 %	86 %	14 %	93 %	7 %	
Einfacher Fahrstreifenwechsel	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	83 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	25 %	100 %	0 %	100 %	0 %	
	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	80 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	25 %	100 %	0 %	100 %	0 %	
Überholen (Gegenverkehr)	100 %	100 %	100 %	80 %	100 %	100 %	100 %	83 %	75 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	
	100 %	100 %	100 %	75 %	100 %	100 %	100 %	83 %	75 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	
Einbiegen/Abbiegen	98 %	99 %	100 %	99 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	0 %	100 %	0 %	
	98 %	99 %	100 %	99 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	0 %	100 %	0 %	
Kreuzen	86 %	92 %	97 %	98 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	0 %	100 %	0 %	
	86 %	91 %	97 %	98 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	0 %	100 %	0 %	
Wenden	100 %	95 %	91 %	98 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	
	100 %	95 %	91 %	98 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	

Tab. 5-14: Anteil der in den Szenarien verbleibenden Unfälle nach Ortstlage, Straßenklasse und V0-Geschwindigkeitsbereich nach GIDAS

Unfälle unter 50 km/h. Dies entspricht den maximalen Geschwindigkeitsbereichen des Pendler- bzw. Universal-Chauffeurs außerorts bzw. des Universal-Chauffeurs und des Urbanen Roboter Taxis innerorts.

Tabelle 5-14 gibt einen detaillierten Überblick über den Anteil der Unfälle, die durch Berücksichtigung des Geschwindigkeitsbereichs im Wirkungsfeld des jeweiligen Szenarios in Abhängigkeit der Ortslage/ Straßenklasse verbleiben.

Ein Wert von 100 % bedeutet, dass das Wirkungsfeld (W7) um keine weiteren Unfälle aufgrund des Geschwindigkeitsbereichs reduziert werden muss. 0 % hingegen bedeutet, dass kein Unfall in dem betrachteten Geschwindigkeitsbereich in der GIDAS-Datenbank stattgefunden hat und somit das Wirkungsfeld auf 0 Unfälle hinabgesetzt werden muss. Die Auswertungen beruhen auf den verbleibenden GIDAS-Daten nach Einschränkung des Wirkungsfeldes.

Als Beispiel zur Erläuterung wird das Szenario Fahrt ohne Beeinflussung durch Vorderfahrzeug auf Autobahnen mit einem Geschwindigkeitsbereich von 0 bis 60 km/h gewählt: 3 % der nach Abzug der Einschränkungen (W1-W7) verbleibenden GIDAS-Unfälle fanden auf Autobahnen mit Ausgangsgeschwindigkeiten zwischen 0-60 km/h statt. Das bedeutet folglich, dass 97 % der nach Abzug der Einschränkungen (W1-W7) verbleibenden Unfälle mit höheren Geschwindigkeiten als 60 km/h auf Autobahnen stattgefunden haben.

5.3 Unfalländerungspotenzial durch Simulation auf Basis der GIDAS-Wirkfelder

In diesem Kapitel wird das Unfalländerungspotenzial der automatisierten Fahrfunktionen auf Basis der GIDAS-Wirkfelder dargestellt. Dazu werden zunächst die veränderten Auftretenshäufigkeiten der Szenarien aufgezeigt, die sich aus der Verkehrssimulation ergeben. Die Unfallresimulation beziffert die relative Häufigkeit mit der eine automatisierte Fahrfunktion im Vergleich zum Menschen Unfälle und MAIS2+-Verletzungen vermieden kann. Zusammen ergeben beide Ergebnisse das Unfalländerungspotenzial der automatisierten Fahrfunktion. Dieses bezieht sich im vorliegenden Kapitel auf die GIDAS-Wirkfelder und wird erst in Kapitel 5.4 auf die amtliche Unfallstatistik und somit auf nationale Ebene hochgerechnet.

5.3.1 Veränderung der Auftretenshäufigkeiten der Szenarien mittels Verkehrssimulation

Der Einsatz automatisierter Fahrzeuge im Straßenverkehr verändert das Verkehrsgeschehen. Da diese sich vor allem homogener verhalten als menschliche Fahrer, ändern sich die Auftretenshäufigkeiten der verschiedenen Szenarien. Bilder 5-3 und 5-4 zeigen beispielhaft die Veränderung der Häufigkeiten von den Szenarien Annäherung an ein Vorderfahrzeug und Einscheren eines anderen Fahrzeuges bei den verschiedenen Durchdringungsraten, die sich aus der Verkehrssimulation auf der Autobahn ergeben.

Es ist zu erkennen, dass die Auftretenshäufigkeit der Szenarien in beiden Fällen mit steigender Durchdringungsrate abnimmt. Bei einer Durchdringungsrate von 5 % ist dieser Effekt noch verhältnismäßig gering (Reduktion um 1 % bzw. 4 %). Steigt der Anteil automatisierter Fahrzeuge auf 50 %, finden auf der Autobahn im Vergleich zum heutigen Verkehrsgeschehen nur noch ca. 61 % der Szena-

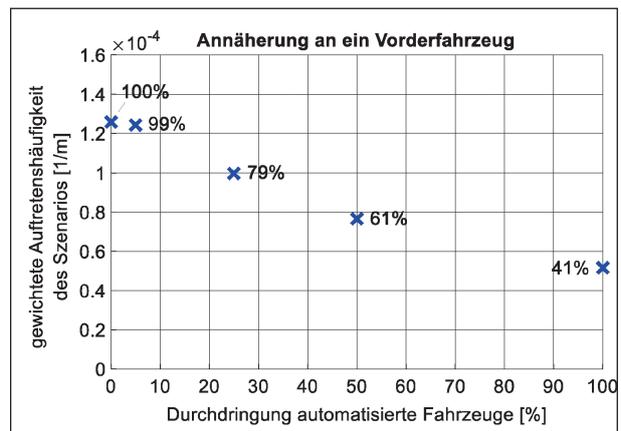


Bild 5-3: Häufigkeiten des Szenarios Annäherung an ein Vorderfahrzeug auf der Autobahn, abhängig von der Durchdringungsrate

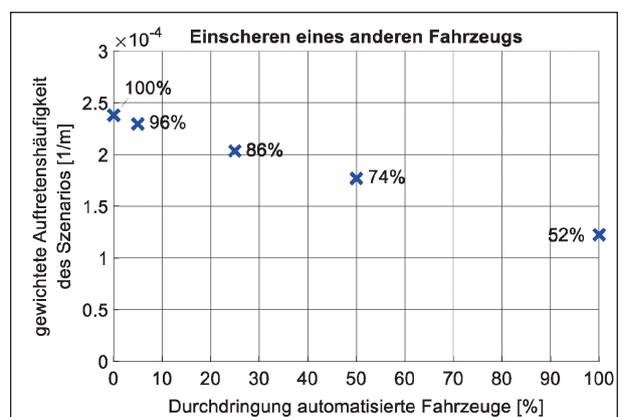


Bild 5-4: Häufigkeiten des Szenarios Einscheren eines anderen Fahrzeuges auf der Autobahn, abhängig von der Durchdringungsrate

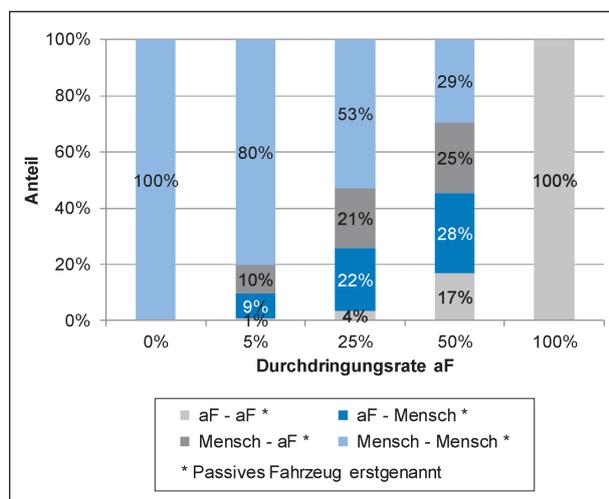


Bild 5-5: Interaktionskombinationen des Szenarios Einscheren eines anderen Fahrzeuges

rien Annäherung an ein Vorderfahrzeug statt. Die Situationen, in denen ein Fahrzeug vor dem anderen einschert, reduzieren sich auf ca. 74 %. Im Falle einer vollständigen Durchdringung automatisierter Fahrzeuge im Straßenverkehr können die Häufigkeiten sogar auf 41 % bzw. 52 % reduziert werden.

Zur Bestimmung des Unfalländerungspotenzials ist neben der Veränderung der Häufigkeiten auch zu berücksichtigen, durch wen die verbleibenden Szenarien induziert werden bzw. zwischen welchen Fahrzeugarten die Interaktion stattfindet. Diese Betrachtung ist insbesondere für Szenarien wie beispielsweise das Einscheren eines anderen Fahrzeugs interessant, in denen ein Fahrzeug lediglich auf das kritische Fahrverhalten eines anderen Verkehrsteilnehmers reagieren kann. In der nachfolgenden Bild 5-5 sind die Interaktionskombinationen für das Einscheren eines anderen Fahrzeugs dargestellt.

Es ist davon auszugehen, dass die Einschervorgänge automatisierter Fahrzeuge aufgrund eingehaltener Sicherheitsabstände unkritisch sind und lediglich die menschlichen Einschervorgänge zu kritischen Situationen führen. In diesem Fall kann ein automatisiertes Fahrzeug im Vergleich zum Menschen einen größeren Teil dieser kritischen Situationen unfallfrei bewältigen. Dies wird in Kapitel 5.3.2 beschrieben.

5.3.2 Veränderung der Unfallanzahl und -schwere mittels Unfallresimulation

Neben den veränderten Auftretenshäufigkeiten der Szenarien bewirken die automatisierten Fahrfunk-

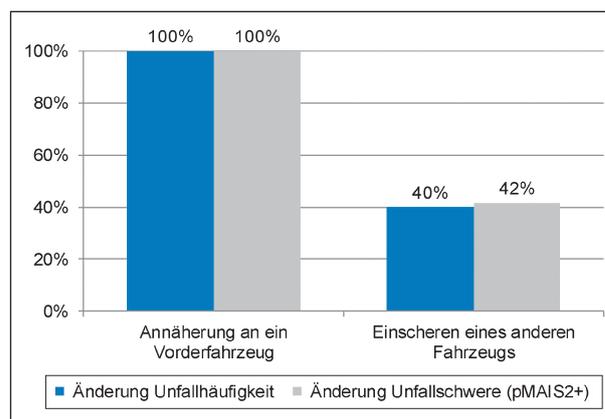


Bild 5-6: Änderung der Unfallhäufigkeit und Änderungspotenzial der Unfallschwere des Autobahn-Chauffeurs bei zwei Szenarien

tionen vor allem auch eine Reduktion der Kollisionen und eine Verringerung der Unfallschwere. In Bild 5-6 ist das Potenzial des Autobahn-Chauffeurs exemplarisch für die zwei Szenarien Annäherung an ein Vorderfahrzeug und Einscheren eines anderen Fahrzeuges dargestellt.

Demzufolge können die automatisierten Fahrfunktionen durch das Einhalten einer ausreichend großen Zeitlücke zum Vorderfahrzeug und durch eine schnelle Aufbringung der Bremskraft sämtliche Unfälle vermeiden, die beim menschlichen Fahrer durch die Annäherung an ein Vorderfahrzeug entstehen. Dementsprechend werden in diesem Szenario auch alle MAIS2+-Verletzungen verhindert.

Bei dem Szenario, bei dem ein Fahrzeug vor einem automatisierten Fahrzeug einschert, kann dieses 40 % aller Unfälle, die der Mensch in der gleichen Situation verursachen würde, vermeiden. Die Wahrscheinlichkeit, bei einer solchen Verkehrssituation eine MAIS2+-Verletzung zu erleiden, kann sogar um 42 % verringert werden.

5.3.3 Unfalländerungspotenzial der automatisierten Fahrfunktionen auf Grundlage der GIDAS-Datenbank

Durch die Kombination der Ergebnisse aus der Verkehrssimulation und der Unfallresimulation ergibt sich das Gesamtpotenzial der automatisierten Fahrfunktionen im Wirkfeld der GIDAS-Daten. Bild 5-7 und Bild 5-8 zeigen beispielhaft das Unfalländerungspotenzial für die Szenarien Annäherung an ein Vorderfahrzeug und Einscheren eines anderen Fahrzeuges für den Autobahn-Chauffeur und eine Durchdringungsrate von 50 %.

Beim Szenario Annäherung an ein Vorderfahrzeug kann die Zahl der Unfälle, wie oben bereits beschrieben, schon durch die geringere Auftretenshäufigkeit im Verkehrsgeschehen um 39,1 % verringert werden (siehe Bild 5-7). Bei einer Durchdringungsrate von 50 % ergibt die Verkehrssimulation, dass in 40,5 % aller Fälle das auffahrende Fahrzeug ein automatisiertes Fahrzeug ist (Interaktionstyp 3 und 4, siehe Kapitel 5.3.1). In dieser Konstellation kommt es nicht zum Unfall, da der gehaltene Abstand des automatisierten Fahrzeugs und das schnelle Aufbringen der Bremskraft ausreichen, um den Auffahrunfall zu vermeiden. Daher führen lediglich weiterhin die Verkehrssituationen zum Unfall, in denen der Mensch das auffahrende Fahrzeug fährt (Interaktionstyp 1 und 2). Sie machen einen Anteil von 59,5 % aus. Letztlich kann die Zahl der Unfälle im Szenario Annäherung an ein Vorderfahrzeug bei einer Durchdringungsrate von 50 % im GIDAS-Wirkfeld also von ursprünglich 100 auf 36,2 reduziert werden.

Beim Szenario Einscheren eines anderen Fahrzeuges und gleicher Durchdringungsrate kann die Szenariohäufigkeit um 25,6 % reduziert werden (siehe Bild 5-8). Von den verbleibenden Szenarien schert in 42,1 % der Fälle das automatisierte Fahrzeug ein (Interaktionstyp 3 und 4). Da das automatisierte

Fahrzeug aber immer mit ausreichendem Abstand zum beteiligten Fahrzeug einschert, kann es durch den Einschervorgang nicht zum Unfall kommen.

Schert der menschliche Fahrer ein, muss zusätzlich differenziert werden, ob das beteiligte Fahrzeug vom Menschen gesteuert wird (51 %, Interaktionstyp 1) oder ob es automatisiert fährt (49 %, Interaktionstyp 2). In dem Fall, in dem der Mensch vor dem automatisierten Fahrzeug einschert, kann dieses auf den Einschervorgang reagieren und 40 % der Unfälle vermeiden, die der menschliche Fahrer nicht vermeiden kann. Sind zwei menschliche Fahrer am Einschervorgang beteiligt, bleibt die Zahl der Unfälle unverändert. Damit bleiben bei einer Durchdringungsrate von 50 % und dem Szenario Einscheren eines anderen Fahrzeuges 34,6 % der Unfälle im GIDAS-Wirkfeld bestehen, was einem Unfalländerungspotenzial von 65,4 % entspricht. Die einzelnen Unfalländerungspotenziale der betrachteten Szenarien bezogen auf Ortslage, Straßenklasse und Geschwindigkeitsbereich sind in Tabelle 5-15 dargestellt. Die Unfalländerungspotenziale der übrigen Durchdringungsraten befinden sich in Anhang 7. Die Unfalländerungspotenziale beziehen sich auf die Unfälle nach Abzug aller Einschränkungen inkl. Geschwindigkeitsbereich.

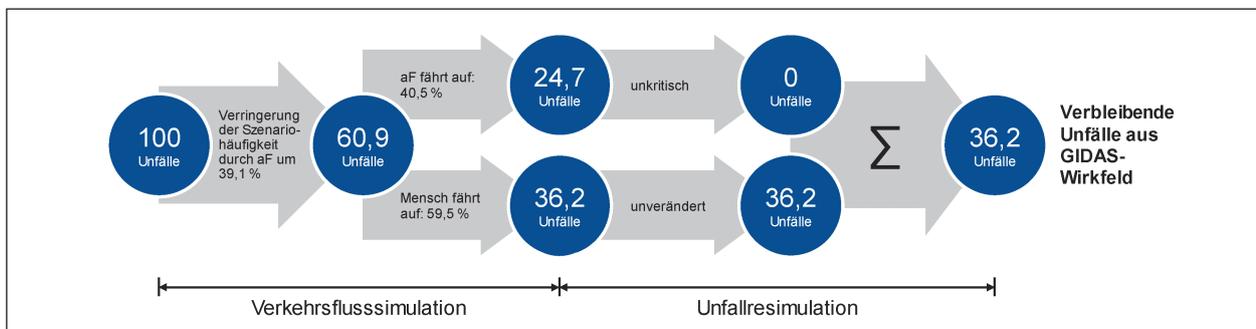


Bild 5-7: Unfalländerungspotenzial des Autobahn-Chauffeurs aus dem GIDAS-Wirkfeld bei einer Durchdringungsrate von 50 % für das Szenario Annäherung an ein Vorderfahrzeug

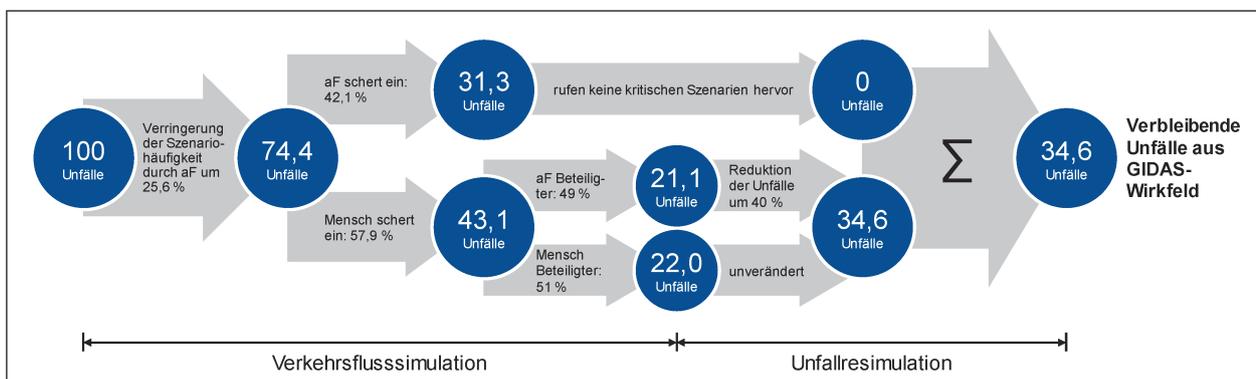


Bild 5-8: Unfalländerungspotenzial des Autobahn-Chauffeurs aus dem GIDAS-Wirkfeld bei einer Durchdringungsrate von 50 % für das Szenario Einscheren eines anderen Fahrzeuges

Unfalländerungspotentiale bei einer Marktdurchdringung der aF von 50 %																				
Ortslage	Innerorts						Außerorts (ohne BAB)						Autobahn							
	B	L	K	G	B	L	K	G	B	L	K	G	BAB	BAB	BAB	BAB				
Straßenklasse																				
Geschwindigkeitsbereich (in km/h)	0-50	0-50	0-50	0-50	0-50	0-50	0-50	0-50	0-100	0-250	100-250	0-250	0-250	0-250	0-60	60-250	0-130	130-250	0-160	
Szenarien																				
Fahrt ohne Beeinflussung durch Vorderfahrzeug	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %
Annäherung an ein stehendes Objekt	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %
Annäherung an ein sich lateral zur Fahrbahn bewegendes Objekt	10 %	19 %	26 %	33 %	0 %	28 %	28 %	28 %	0 %	43 %	26 %	33 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Annäherung an ein Vorderfahrzeug	41 %	41 %	41 %	41 %	41 %	41 %	41 %	41 %	41 %	41 %	41 %	41 %	41 %	41 %	64 %	64 %	64 %	64 %	64 %	64 %
Fahren im Stau	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %
Einscheren eines anderen Fahrzeuges	71 %	48 %	42 %	42 %	42 %	42 %	42 %	42 %	56 %	56 %	56 %	56 %	42 %	42 %	57 %	67 %	65 %	65 %	65 %	65 %
Einfacher Fahrstreifenwechsel	51 %	51 %	51 %	51 %	51 %	51 %	51 %	51 %	51 %	51 %	51 %	51 %	51 %	51 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %
Überholen (Gegenverkehr)	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Einbiegen/Abbiegen	65 %	65 %	65 %	66 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	66 %	66 %	50 %	50 %	50 %	-	-	-	-	-	-
Kreuzen	57 %	64 %	57 %	54 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	63 %	50 %	50 %	50 %	50 %	-	-	-	-	-	-
Wenden	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	50 %	-	-	-	-	-	-

Tab. 5-15: Unfalländerungspotentiale bei einer Marktdurchdringung der automatisierten Fahrfunktionen von 50 %

5.4 Hochrechnung der Wirksamkeit auf nationale Ebene

Ziel dieses Kapitels ist die Hochrechnung der Unfalländerungspotenziale in den GIDAS-Wirkfeldern auf das Unfallgeschehen der Bundesrepublik Deutschland.

Die Ergebnisse aus Kapitel 5.3 sind die Unfalländerungspotenziale. Diese beziehen sich auf die fahrfunktionsabhängigen Szenarien, Ortslagen, Straßenklassen und Geschwindigkeitsbereiche und sind von der Marktdurchdringung abhängig. Diese Unfalländerungspotenziale beziehen sich auf das jeweilige GIDAS-Wirkfeld, das auf Basis der GIDAS-Datengrundlage – Unfälle mit Personenschaden unter Beteiligung von mindestens einem Pkw und maximal zwei Beteiligten – ermittelt worden ist. Die Unfalländerungspotenziale werden auch auf schwerwiegende Unfälle mit Sachschaden angewandt. Des Weiteren können sie, unter der Annahme, dass Unfälle mit mehr als zwei Beteiligten durch die Vermeidung der ersten Kollision ebenfalls vermieden bzw. deren Unfallfolgen verringert werden können, auch auf Unfälle mit mehr als zwei Beteiligten bezogen werden.

Da die von den Fahrfunktionen beherrschbaren Szenarien durch die dreistelligen Unfalltypen definiert sind und diese nicht in allen Bundesländern Deutschlands erhoben werden, ist das amtliche Wirkfeld auf Basis des Unfallgeschehens der fünf Bundesländer berechnet worden, die den dreistelligen Unfalltyp führen. Das amtliche Wirkfeld – unter Berücksichtigung der fahrfunktionsabhängigen Ortslage, Straßenklasse und der fahrfunktionsabhängigen Szenarien – wird anschließend mit dem Unfalländerungspotenzial (vgl. Tabelle 5-15) multipliziert. Weiterhin muss an dieser Stelle der Geschwindigkeitsfaktor berücksichtigt werden. Im Vergleich zum amtlichen Wirkfeld ist das GIDAS-Wirkfeld noch mit einem weiteren Unfallmerkmal, das nur in der GIDAS-Datenbank geführt wird, reduziert worden. Dies ist die Ausgangsgeschwindigkeit des 1. Beteiligten in der ersten Sequenz. Der Geschwindigkeitsfaktor ist je nach fahrfunktionsabhängiger Ortslage bzw. Straßenklasse und je fahrfunktionsabhängigem Szenario quantifiziert worden (s. Tabelle 5-14).

Nach der Ermittlung der Wirksamkeiten der automatisierten Fahrfunktionen bzw. FAS-Pakete im amtlichen Wirkfeld der fünf Bundesländer werden diese Wirksamkeiten mithilfe einer Hochrechnung

über die Ortslagen und Straßenklassen auf das Unfallgeschehen der Bundesrepublik Deutschland hochgerechnet.

Das Vorgehen wird im Folgenden anhand des Autobahn-Chauffeurs, der auf Bundesautobahnen operiert, erläutert (vgl. Tabelle 5-16). Für dieses Beispiel wird eine Durchdringung der automatisierten Fahrfunktionen von 50 % gewählt.

Der Autobahn-Chauffeur adressiert mit dem Szenario Fahrt ohne Beeinflussung durch Vorderfahrzeug 3.791 bzw. 459 Unfälle mit Personenschaden unter Beteiligung von mindestens einem Pkw unter den ersten zwei Beteiligten auf Bundesautobahnen in den fünf betrachteten Bundesländern innerhalb der Jahre 2012 bis 2014.

Diese Zahlen werden nun zum einen mit dem Geschwindigkeitsfaktor und zum anderen mit dem Unfalländerungspotenzial multipliziert. Laut der GIDAS-Daten ereigneten sich 90 % der Unfälle dieses Szenarios auf Autobahnen mit einer Ausgangsgeschwindigkeit V_0 des 1. Beteiligten von ≤ 130 km/h (vgl. Tabelle 5-14). Nach den Simulationsergebnissen können bei einer Durchdringung von 50 % der automatisierten Fahrfunktionen 50 % der Unfälle verhindert werden (vgl. Tabelle 5-15). Folglich können 1.712 bzw. 207 Unfälle mit Personenschaden unter Beteiligung von mindestens einem Pkw unter den ersten zwei Beteiligten auf Bundesautobahnen in den fünf betrachteten Bundesländern innerhalb der Jahre 2012 bis 2014 verhindert werden.

Werden die Wirksamkeiten der von der Fahrfunktion beherrschbaren Szenarien aufaddiert und wird die Annahme getroffen, dass sowohl Unfälle mit maximal zwei Beteiligten als auch mit mehr als zwei Beteiligten (mindestens ein Pkw unter den ersten beiden Beteiligten) verhindert werden können, ergibt sich für den Autobahn-Chauffeur eine Wirksamkeit von 6.489 Unfällen mit Personenschaden auf den Autobahnen der fünf Bundesländer zwischen 2012 bis 2014. Bezogen auf alle Unfälle auf Autobahnen ergibt sich für den Autobahn-Chauffeur eine Wirksamkeit von 30 %. Diese Wirksamkeit bezieht sich auf das Unfallgeschehen in den fünf Bundesländern, die den dreistelligen Unfalltypen führen.

Diese Wirksamkeit muss in einem weiteren Schritt auf das Unfallgeschehen der Bundesrepublik Deutschland bezogen werden (vgl. Tabelle 5-19). Die Hochrechnung findet gewichtet über die Ortslage/Straßenklasse statt. Da der Autobahn-Chauffeur

U(P) in fünf Bundesländern, die den 3-stelligen Unfalltyp führen 2012 – 2014													
W1	U(P) in fünf Bundesländern												
	354.338												
W2	Ortslage + Straßenklasse												
	BAB 21.860												
W3	unter Beteiligung von Pkw												
	ja 19.534 kein Pkw 2.326												
W4	nach Unfallbeteiligung												
	Summe												
W5/ W6/ W7	Szenarien												
	Einschränkung												
Autobahn-Chauffeur													
	Fahrt ohne Beeinflussung durch Vorderfahrzeug	W5 + W6 + W7	2.491	1.300	3.791	459	16	16	459	16	1.712	90 %	207
	Annäherung an ein stehendes Objekt	W5 + W6 + W7	25	118	143	69	11	11	69	11	72	100 %	35
	Annäherung an ein sich lateral zur Fahrbahn bewegendes Objekt	W5 + W6 + W7	89	37	126	12	5	5	12	5	0	100 %	0
	Annäherung an ein Vorderfahrzeug	W5 + W6 + W7	21	3.217	3.238	1.092	57	57	1.092	57	1.573	76 %	531
	Fahren im Stau	W5 + W6 + W7	5	1.385	1.390	1.272	68	68	1.272	68	579	83 %	530
	Einscheren eines anderen Fahrzeuges	W5 + W6 + W7	48	1.219	1.267	575	13	13	575	13	710	86 %	322
	Einfacher Fahrstreifenwechsel	W5 + W6 + W7	0	264	264	169	8	8	169	8	133	100 %	85
	Überholen (Gegenverkehr)	W5 + W6 + W7	0	8	8	1	0	0	1	0	0	100 %	0
		W5 + W6 + W7	2.590	7.503	10.093	3.636			3.636		4.779	84 %	1.710

Tab. 5-16: Ermittlung der Wirksamkeit U(P) in den 5 Bundesländern anhand des Autobahn-Chauffeurs – 50 % Durchdringung (kleinere Abweichungen sind damit begründet, dass die dargelegten Werte des Unfalländerungspotenzials und V0 aus Darstellungsgründen gerundet sind)

Deutschland 2012 – 2014 U(P) Marktdurchdringung: 5 %			Stau- Chauffeur		Autobahn- Chauffeur		Pendler- Chauffeur		Universal- Chauffeur		Urbanes Roboter-Taxi	
			Rel. Wirk- samkeit	verhin- derte U(P)								
Bundesautobahnen	55.200	< 1 %	343	4 %	2.390	4 %	4.513	4 %	29.001			
Außerorts	Bundesstraßen	72.287										
	Landesstraßen	83.529										
	Kreisstraßen	42.380										
	Gemeindestraßen und Übrige	23.817										
Innerorts	Bundesstraßen	88.576					s. o.	s. o.	3 %	20.728		
	Landesstraßen	104.683										
	Kreisstraßen	49.968										
	Gemeindestraßen und Übrige	372.737										
Deutschland 2012 – 2014	893.177	< 1 %	343	< 1 %	2.390	1 %	4.513	3 %	29.001	2 %	20.728	

Tab. 5-17: Wirksamkeiten U(P) der automatisierten Fahrfunktionen – 5 % Durchdringung

Deutschland 2012 – 2014 U(P) Marktdurchdringung: 25 %			Stau- Chauffeur		Autobahn- Chauffeur		Pendler- Chauffeur		Universal- Chauffeur		Urbanes Roboter-Taxi	
			Rel. Wirk- samkeit	verhin- derte U(P)								
Bundesautobahnen	55.200	3 %	1.453	17 %	9.129	13 %	16.347	14 %	115.989			
Außerorts	Bundesstraßen	72.287										
	Landesstraßen	83.529										
	Kreisstraßen	42.380										
	Gemeindestraßen und Übrige	23.817										
Innerorts	Bundesstraßen	88.576					s. o.	s. o.	14 %	83.960		
	Landesstraßen	104.683										
	Kreisstraßen	49.968										
	Gemeindestraßen und Übrige	372.737										
Deutschland 2012 – 2014	893.177	< 1 %	1.453	1 %	9.129	2 %	16.347	13 %	115.989	9 %	83.960	

Tab. 5-18: Wirksamkeiten U(P) der automatisierten Fahrfunktionen – 25 % Durchdringung

nur auf Bundesautobahnen operiert, ist in diesem Fall die relative Wirksamkeit von 30 % mit der Anzahl der Unfälle mit Personenschaden in den drei Jahren auf Bundesautobahnen in der gesamten Republik (55.200) zu multiplizieren. Daraus ergibt sich, dass innerhalb der drei Jahre 16.384 Unfälle mit Personenschaden auf deutschen Autobahnen hätten vermieden werden können. Die Wirksamkeit des Autobahn-Chauffeurs beträgt 30 % bzw. 2 % bezo-

gen auf Unfälle mit Personenschaden auf Bundesautobahnen bzw. auf alle Unfälle in Deutschland.

Die finalen Ergebnisse der Wirksamkeiten der automatisierten Fahrfunktionen bezogen auf das Unfallgeschehen (Unfälle mit Personenschaden) in der Bundesrepublik Deutschland sind den Tabellen 5-21 bis 5-24 zu entnehmen. Es werden die Durchdringungen von 5 %, 25 %, 50 % und 100 % unter-

Deutschland 2012 – 2014 U(P) Marktdurchdringung: 50 %		Stau- Chauffeur		Autobahn- Chauffeur		Pendler- Chauffeur		Universal- Chauffeur		Urbanes Roboter-Taxi	
		Rel. Wirk- sam- keit	verhin- derte U(P)								
Bundesautobahnen	55.200	5 %	2.580	30 %	16.384	24 %	30.141	26 %	217.232		
Außerorts	Bundesstraßen	72.287									
	Landesstraßen	83.529									
	Kreisstraßen	42.380									
	Gemeindestraßen und Übrige	23.817									
Innerorts	Bundesstraßen	88.576						s. o.	s. o.	26 %	157.552
	Landesstraßen	104.683									
	Kreisstraßen	49.968									
	Gemeindestraßen und Übrige	372.737									
Deutschland 2012 – 2014	893.177	< 1 %	2.580	2 %	16.384	3 %	30.141	24 %	217.232	18 %	157.552

Tab. 5-19: Wirksamkeiten U(P) der automatisierten Fahrfunktionen – 50 % Durchdringung

Deutschland 2012 – 2014 U(P) Marktdurchdringung: 100 %		Stau- Chauffeur		Autobahn- Chauffeur		Pendler- Chauffeur		Universal- Chauffeur		Urbanes Roboter-Taxi	
		Rel. Wirk- sam- keit	verhin- derte U(P)								
Bundesautobahnen	55.200	8 %	4.443	53 %	29.241	46 %	59.271	50 %	416.020		
Außerorts	Bundesstraßen	72.287									
	Landesstraßen	83.529									
	Kreisstraßen	42.380									
	Gemeindestraßen und Übrige	23.817									
Innerorts	Bundesstraßen	88.576						s. o.	s. o.	54 %	331.095
	Landesstraßen	104.683									
	Kreisstraßen	49.968									
	Gemeindestraßen und Übrige	372.737									
Deutschland 2012 – 2014	893.177	< 1 %	4.443	3 %	29.241	7 %	59.271	47 %	416.020	37 %	331.095

Tab. 5-20: Wirksamkeiten U(P) der automatisierten Fahrfunktionen – 100 % Durchdringung

sucht. Die entsprechenden Ergebnisse auf Basis der Unfälle mit Personenschaden und schwerwiegenden Unfälle mit Sachschaden sind im Anhang 8 enthalten. Die angegebenen relativen Wirksamkeiten sind als gerundete Werte angegeben.

An dieser Stelle soll noch abschließend abgeschätzt werden, wie viele Unfälle maximal durch die Fahrzeugautomatisierung vermeidbar wären. Hierfür

wird eine vollautomatisierte Fahrfunktion (Level 5 nach [SAE (2016)]) angenommen, die in allen Ortslagen und auf allen Straßenklassen ohne Geschwindigkeitseinschränkung operiert. Diese Funktion beherrscht alle Fahrscenarien, hat keine Funktionseinschränkungen und darf auch alkoholisierte bzw. unter Drogen stehende Personen chauffieren. Laut Tabelle 5-11 können ca. 17 % der Unfälle mit Personenschaden durch die Fahrzeugautomatisie-

rung nicht vermieden werden, da es sich bei diesem Anteil der Unfälle um Unfälle ohne Pkw-Beteiligung unter den ersten zwei Unfallbeteiligten handelt. Folglich können durch die Fahrzeugautomatisierung maximal 83 % der Unfälle vermieden werden.

Die finalen Ergebnisse der Wirksamkeiten der FAS-Pakete bezogen auf das Unfallgeschehen (Unfälle mit Personenschaden) in der Bundesrepublik Deutschland sind den Tabellen 5-21 bis 5-24 zu entnehmen. Die entsprechenden Ergebnisse auf Basis der Unfälle mit Personenschaden und schwerwie-

genden Unfälle mit Sachschaden sind im Anhang 8 enthalten.

Neben der Vermeidung von Unfällen wird auch die Unfallfolgenminderung (MAIS2+) durch das automatisierte Fahren betrachtet. Das Vorgehen ist äquivalent zum oben beschriebenen Vorgehen. Die Ergebnisse auf Basis der Unfälle mit Personenschaden sind in den Tabellen 5-25 bis 5-28 dargestellt. Die Ergebnisse auf Basis der Unfälle mit Personenschaden und der schwerwiegenden Unfälle mit Sachschaden befinden sich im Anhang 8.

Deutschland 2012 – 2014 U(P) Marktdurchdringung: 5 %		FAS-Paket des Stau-Chauffeurs		FAS-Paket des Autobahn-Chauffeurs		FAS-Paket des Pendler-Chauffeurs		
		Rel. Wirksamkeit	verhinderte U(P)	Rel. Wirksamkeit	verhinderte U(P)	Rel. Wirksamkeit	verhinderte U(P)	
Bundesautobahnen	55.200	3 %	23.406	2 %	21.308	2 %	18.953	
Außerorts	Bundesstraßen							72.287
	Landesstraßen							83.529
	Kreisstraßen							42.380
	Gemeindestraßen und Übrige							23.817
Innerorts	Bundesstraßen							88.576
	Landesstraßen							104.683
	Kreisstraßen							49.968
	Gemeindestraßen und Übrige	372.737						
Deutschland 2012 – 2014	893.177	3 %	23.406	2 %	21.308	2 %	18.953	

Tab. 5-21: Wirksamkeiten U(P) FAS-Pakete – 5 % Durchdringung

Deutschland 2012 – 2014 U(P) Marktdurchdringung: 25 %		FAS-Paket des Stau-Chauffeurs		FAS-Paket des Autobahn-Chauffeurs		FAS-Paket des Pendler-Chauffeurs		
		Rel. Wirksamkeit	verhinderte U(P)	Rel. Wirksamkeit	verhinderte U(P)	Rel. Wirksamkeit	verhinderte U(P)	
Bundesautobahnen	55.200	10 %	86.811	9 %	78.584	8 %	70.335	
Außerorts	Bundesstraßen							72.287
	Landesstraßen							83.529
	Kreisstraßen							42.380
	Gemeindestraßen und Übrige							23.817
Innerorts	Bundesstraßen							88.576
	Landesstraßen							104.683
	Kreisstraßen							49.968
	Gemeindestraßen und Übrige	372.737						
Deutschland 2012 – 2014	893.177	10 %	86.811	9 %	78.584	8 %	70.335	

Tab. 5-22: Wirksamkeiten U(P) der FAS-Pakete – 25 % Durchdringung

Deutschland 2012 – 2014 U(P) Marktdurchdringung: 50 %		FAS-Paket des Stau-Chauffeurs		FAS-Paket des Autobahn-Chauffeurs		FAS-Paket des Pendler-Chauffeurs		
		Rel. Wirksamkeit	verhinderte U(P)	Rel. Wirksamkeit	verhinderte U(P)	Rel. Wirksamkeit	verhinderte U(P)	
Bundesautobahnen	55.200	19 %	166.058	17 %	151.421	15 %	135.623	
Außerorts	Bundesstraßen							72.287
	Landesstraßen							83.529
	Kreisstraßen							42.380
	Gemeindestraßen und Übrige							23.817
Innerorts	Bundesstraßen							88.576
	Landesstraßen							104.683
	Kreisstraßen							49.968
	Gemeindestraßen und Übrige	372.737						
Deutschland 2012 – 2014	893.177	19 %	166.058	17 %	151.421	15 %	135.623	

Tab. 5-23: Wirksamkeiten U(P) der FAS-Pakete – 50 % Durchdringung

Deutschland 2012 – 2014 U(P) Marktdurchdringung: 100 %		FAS-Paket des Stau-Chauffeurs		FAS-Paket des Autobahn-Chauffeurs		FAS-Paket des Pendler-Chauffeurs		
		Rel. Wirksamkeit	verhinderte U(P)	Rel. Wirksamkeit	verhinderte U(P)	Rel. Wirksamkeit	verhinderte U(P)	
Bundesautobahnen	55.200	39 %	350.416	36 %	324.401	32 %	290.197	
Außerorts	Bundesstraßen							72.287
	Landesstraßen							83.529
	Kreisstraßen							42.380
	Gemeindestraßen und Übrige							23.817
Innerorts	Bundesstraßen							88.576
	Landesstraßen							104.683
	Kreisstraßen							49.968
	Gemeindestraßen und Übrige	372.737						
Deutschland 2012 – 2014	893.177	39 %	350.416	36 %	324.401	32 %	290.197	

Tab. 5-24: Wirksamkeiten U(P) der FAS-Pakete – 100 % Durchdringung

MAIS2+ auf Basis U(P) Deutschland 2012 – 2014 Marktdurchdringung 5 %		Stau-Chauffeur	Auto-bahn-Chauffeur	Pendler-Chauffeur	Universal-Chauffeur	Urbanes Roboter-Taxi	FAS-Paket des Stau-Chauffeurs	FAS-Paket des Autobahn-Chauffeurs	FAS-Paket des Pendler-Chauffeurs
		Rel. Wirksamkeit	Rel. Wirksamkeit	Rel. Wirksamkeit	Rel. Wirksamkeit	Rel. Wirksamkeit	Rel. Wirksamkeit	Rel. Wirksamkeit	Rel. Wirksamkeit
Bundesautobahnen		1 %	4 %	4 %					
Außerorts	Bundesstraßen				3 %				
	Landesstraßen								
	Kreisstraßen								
	Gemeindestraßen und Übrige						3 %	2 %	2 %
Innerorts	Bundesstraßen								
	Landesstraßen								
	Kreisstraßen				s. o.	3 %			
	Gemeindestraßen und Übrige								
Deutschland 2012 – 2014		< 1 %	< 1 %	1 %	3 %	2 %	3 %	2 %	2 %

Tab. 5-25: MAIS2+-Wirksamkeiten der automatisierten Fahrfunktionen und der FAS-Pakete – 5 % Durchdringung

MAIS2+ auf Basis U(P) Deutschland 2012 – 2014 Marktdurchdringung 25 %		Stau-Chauffeur	Auto-bahn-Chauffeur	Pendler-Chauffeur	Universal-Chauffeur	Urbanes Roboter-Taxi	FAS-Paket des Stau-Chauffeurs	FAS-Paket des Autobahn-Chauffeurs	FAS-Paket des Pendler-Chauffeurs
		Rel. Wirksamkeit	Rel. Wirksamkeit	Rel. Wirksamkeit	Rel. Wirksamkeit	Rel. Wirksamkeit	Rel. Wirksamkeit	Rel. Wirksamkeit	Rel. Wirksamkeit
Bundesautobahnen		3 %	17 %	13 %					
Außerorts	Bundesstraßen				14 %				
	Landesstraßen								
	Kreisstraßen								
	Gemeindestraßen und Übrige						10 %	9 %	8 %
Innerorts	Bundesstraßen								
	Landesstraßen								
	Kreisstraßen				s. o.	14 %			
	Gemeindestraßen und Übrige								
Deutschland 2012 – 2014		< 1 %	1 %	2 %	13 %	9 %	10 %	9 %	8 %

Tab. 5-26: MAIS2+-Wirksamkeiten der automatisierten Fahrfunktionen und der FAS-Pakete – 25 % Durchdringung

MAIS2+ auf Basis U(P) Deutschland 2012 – 2014 Marktdurchdringung 50 %		Stau-Chauffeur	Auto-bahn-Chauffeur	Pendler-Chauffeur	Universal-Chauffeur	Urbanes Roboter-Taxi	FAS-Paket des Stau-Chauffeurs	FAS-Paket des Autobahn-Chauffeurs	FAS-Paket des Pendler-Chauffeurs
		Rel. Wirksamkeit	Rel. Wirksamkeit	Rel. Wirksamkeit	Rel. Wirksamkeit	Rel. Wirksamkeit	Rel. Wirksamkeit	Rel. Wirksamkeit	Rel. Wirksamkeit
Bundesautobahnen		5 %	30 %	23 %					
Außerorts	Bundesstraßen				26 %		19 %	17 %	15 %
	Landesstraßen								
	Kreisstraßen								
	Gemeindestraßen und Übrige								
Innerorts	Bundesstraßen				s.o.	25 %			
	Landesstraßen								
	Kreisstraßen								
	Gemeindestraßen und Übrige								
Deutschland 2012 – 2014		< 1 %	2 %	3 %	24 %	18 %	19 %	17 %	15 %

Tab. 5-27: MAIS2+-Wirksamkeiten der automatisierten Fahrfunktionen und der FAS-Pakete – 50 % Durchdringung

MAIS2+ auf Basis U(P) Deutschland 2012 – 2014 Marktdurchdringung 100 %		Stau-Chauffeur	Auto-bahn-Chauffeur	Pendler-Chauffeur	Universal-Chauffeur	Urbanes Roboter-Taxi	FAS-Paket des Stau-Chauffeurs	FAS-Paket des Autobahn-Chauffeurs	FAS-Paket des Pendler-Chauffeurs
		Rel. Wirksamkeit	Rel. Wirksamkeit	Rel. Wirksamkeit	Rel. Wirksamkeit	Rel. Wirksamkeit	Rel. Wirksamkeit	Rel. Wirksamkeit	Rel. Wirksamkeit
Bundesautobahnen		8 %	53 %	46 %					
Außerorts	Bundesstraßen				50 %		40 %	37 %	33 %
	Landesstraßen								
	Kreisstraßen								
	Gemeindestraßen und Übrige								
Innerorts	Bundesstraßen				s.o.	53 %			
	Landesstraßen								
	Kreisstraßen								
	Gemeindestraßen und Übrige								
Deutschland 2012 – 2014		< 1 %	3 %	7 %	46 %	37 %	40 %	37 %	33 %

Tab. 5-28: MAIS2+-Wirksamkeiten der automatisierten Fahrfunktionen und der FAS-Pakete – 100 % Durchdringung

5.5 Automatisierte Parkfunktionen

Das vornehmliche Schadensbild in Parkunfällen ist der Sachschaden, weshalb sich zur Untersuchung des Unfalländerungspotenzials vor allem Daten von Versicherern anbieten.

Im Gegensatz zur Untersuchung automatisierter Fahrfunktionen für die Autobahn und die Stadt sind die automatisierten Parkfunktionen im Rahmen dieses Projektes nicht näher untersucht worden. Zum Zweck der Vollständigkeit soll aber auch das Unfalländerungspotenzial dieser Funktionen aufgeführt werden.

Daher werden nachfolgend die Ergebnisse des Berichtes „Ermittlung des Sicherheitspotenzials auf Basis des Schadensgeschehens“ der Deutschen Versicherer der Unfallforschung der Versicherer aufgeführt [HUMMEL et al. (2011)], in dem Parkassistenten untersucht worden sind. Die Funktionen haben eine Rundumsicht um den gesamten Pkw, verhindern Parkrempler durch eine automatisierte Bremsung und das Ein- und Ausparken erfolgt automatisiert.

Zur Untersuchung des Unfalländerungspotenzials sind aus einer Datenbank (SBS) zufällig Kraftfahrzeughaftpflichtschäden (KH) und Vollkaskoschäden (VK) aus den Jahren 2004 bis 2006 ausgewählt und anschließend analysiert worden. Insgesamt sind 187 KH und 155 VK analysiert worden. Die Autoren gehen davon aus, dass von den KH 58 Fälle (31,0 %) mit der beschriebenen Parkfunktion hätten vermieden werden können. Bei den VK wäre eine Vermeidung in 24 Fällen (15,5 %) möglich gewesen.

Hochgerechnet mit der GDV-Gesamtstatistik gehen die Autoren davon aus, dass sich jährlich 710.662 KH und 429.932 VK (bezogen auf die Schadenanzahl aus dem Jahr 2008) vermeiden ließen. Dies entspräche einem jährlichen Schadensaufwand von ca. 1,2 Milliarden Euro bei den KH und rund 780 Millionen Euro bei den VK. Es muss aber berücksichtigt werden, dass für die Untersuchung eine volle Ausstattungsrate sowie ein ideal funktionierendes System angenommen worden sind.

5.6 Erörterung neu induzierter Unfallszenarien

Auf Basis des in Kapitel 5.2 beschriebenen Vorgehens sind zunächst Unfallsituationen identifiziert worden, die durch eine zunehmende Fahrzeugautomatisierung erst entstehen. Hierzu wird von einem Zustand ausgegangen, in dem das Fahrzeug automatisiert fährt und alle Systeme ordnungsgemäß arbeiten. Dann tritt ein Ereignis ein, das den aktuellen Zustand dahingehend ändert, dass das Fahrzeug in eine Konfliktsituation gerät. Die identifizierten Situationen sind im Anhang 6 aufgeführt.

Im zweiten Schritt sind die einzelnen identifizierten Situationen zu potenziellen Unfallszenarien zusammengefasst worden. Die identifizierten potenziellen Unfallszenarien sind:

- Ausfall oder funktionaler Fehler in einer Komponente der automatisierten Fahrfunktion (Rechen-einheit oder Aktuatorik),
- Ausfall oder funktionaler Fehler in einer Teilkomponente der automatisierten Fahrfunktion (z. B. Sensorik),
- Ausfall einer Fahrzeugkomponente (nicht Bestandteil der automatisierten Fahrfunktion),
- Fehler bei der Regelung des automatisiert fahrenden Fahrzeuges (Navigation, Bahnführung, Stabilisierung),
- konträre/nicht klassifizierbare Sensorinformationen,
- Änderung der Umweltparameter,
- Änderung der Straßenführung,
- Fehler bei der Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern (Fußgänger, Fahrradfahrer, Kraftfahrzeugführer),
- externer Angriff auf das Fahrzeug oder die Sensorik.

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass die gelisteten Szenarien die aus Sicht der Autoren wichtigsten Szenarien darstellen. Es muss aber auch davon ausgegangen werden, dass es noch weitere als die genannten Szenarien geben wird, deren Auftreten zu einem Unfall führen kann. Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass die Auftretenshäufigkeiten der Szenarien auch von der betrachte-

ten Automatisierungsstufe abhängen. Per Definition [SAE (2016)] muss eine Level 5 Funktion alle Situationen bewältigen können, wohingegen eine Level 3 Funktion dies nicht können muss. Dies bedeutet, dass Situationen, in denen die Fahrzeugkontrolle ggf. an den Fahrer zurückgegeben wird, für eine Level 3 Funktion wesentlich häufiger auftreten werden als für eine Level 4 oder Level 5 Funktion, für die per Definition eine Übergabe nicht vorgesehen ist.

Die Frage, ob eine Veränderung im aktuellen Zustand tatsächlich zu einem Unfall führt, hängt im starken Maße von der Reaktion der automatisierten Fahrfunktion, des Fahrers sowie des Umgebungszustandes ab. Da in diesem Kapitel keine Unfälle betrachtet werden, die sich auch im manuellen Verkehr potenziell ereignen können, sondern nur Szenarien, die erst durch die Fahrzeugautomatisierung induziert werden, müssen für die drei genannten Einflussfaktoren (Reaktion der Funktion, Reaktion des Fahrers und Umgebungszustand) Annahmen zwecks der Abschätzung der Konsequenzen getroffen werden.

Zunächst wird die Reaktion der automatisierten Fahrfunktion betrachtet. Theoretisch lassen sich vier verschiedene Reaktionen des Systems auf die genannten potenziellen Unfallszenarien beschreiben. Das System kann sich sofort abschalten oder weiter – zumindest für eine bestimmte Zeit – aktiv bleiben. Bleibt das System aktiv, kann aber immer noch die Funktionalität des Systems eingeschränkt sein.

Sollte die Funktion aktiv bleiben und keine Degradierung der Funktionalität eintreten, kann davon ausgegangen werden, dass die Funktion die jeweilige Situation eigenständig bewältigen kann. Schaltet sich die Funktion ab, muss zumindest theoretisch zwischen zwei Fällen unterschieden werden:

- Übernahmeaufforderung an den Fahrer,
- keine Übernahmeaufforderung.

Unabhängig von beiden Fällen hängen der weitere Verlauf einer Situation sowie deren Konsequenzen von der Reaktion des Fahrers ab. Diese hängt wiederum von den Umgebungszuständen, der möglichen Lösungsstrategie zum Entschärfen der Situation und dem Zustand des Fahrers ab, weshalb sich die Reaktion eines einzelnen Fahrers nur schwer vorhersagen lässt.

Daher werden für die nähere Betrachtung der genannten Szenarien an dieser Stelle Annahmen hinsichtlich der Reaktionsgeschwindigkeit getroffen. Es wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass die Reaktionsgeschwindigkeit im starken Maße von der Aufmerksamkeit und den ausgeübten Nebentätigkeiten des Fahrers abhängt. Zur Vereinfachung sind im Folgenden drei verschiedene mögliche Reaktionen zu berücksichtigen:

- Fahrer mit schneller Reaktionszeit: Der Fahrer übernimmt die Fahrzeugführung innerhalb von 1 s,
- Fahrer mit durchschnittlicher Reaktionszeit: Der Fahrer übernimmt die Fahrzeugführung nach einer längeren Reaktionszeit von 5 bis 10 s,
- veränderter Fahrer: Der Fahrer ist nicht in der Lage, die Fahrzeugführung zu übernehmen (z. B. weil er schläft).

Ferner wird davon ausgegangen, dass die Reaktion des Fahrers adäquat zur Situation erfolgt bzw. dass die Reaktion des Fahrers nicht unangemessen zur Situation ist.

Sollte der Fahrer die Führung des Fahrzeuges nicht oder nicht in angemessener Zeit übernehmen, ist davon auszugehen, dass die Funktion ein Minimales Risiko Manöver (MRM) einleitet. Dieses MRM hat zum Ziel, das Fahrzeug in den sichersten erreichbaren Zustand zu überführen und nach Möglichkeiten einen Unfall zu vermeiden. Dies kann bedeuten, dass das Fahrzeug im Fahrstreifen in den Stillstand gebremst wird. Es ist aber auch ein MRM möglich, bei dem das Fahrzeug zunächst versucht, den am weitesten rechts liegenden Fahrstreifen oder einen Parkplatz zu erreichen und dort angehalten wird. Ein solches Manöver setzt voraus, dass die automatisierte Fahrfunktion zumindest in degradierter Form für eine gewisse Zeit weiter operieren kann.

Im Folgenden werden die einzelnen oben beschriebenen Szenarien näher betrachtet. Hierzu erfolgen die Beschreibung der erwarteten Systemreaktion sowie eine grobe Abschätzung der Häufigkeit und möglicher Konsequenzen abhängig von der Fahrersituation. Abschließend werden potenzielle Gegenmaßnahmen beschrieben, die das Auftreten einer solchen Situation verhindern könnten.

Zunächst werden die Szenarien betrachtet, in denen Komponenten des Fahrzeuges ausfallen (vgl.

Ausfall oder funktionaler Fehler in einer Komponente der automatisierten Fahrfunktion (Sensorik (komplett), Recheneinheit oder Aktuatorik)	
Systemreaktion	System schaltet sofort ab mit Übernahmeaufforderung
Erwartete Häufigkeit	Sehr gering
Konsequenz	<ul style="list-style-type: none"> • Fahrer mit schneller Reaktionszeit • Fahrer mit durchschnittlicher Reaktionszeit • Verhinderter Fahrer
Potenzielle Gegenmaßnahmen	<ul style="list-style-type: none"> • Minimale Auswirkung erwartet, da Reaktionszeit im Bereich normaler Reaktionszeit liegt • Kritisch; wahrscheinlich Start eines MRM • Kritisch; wahrscheinlich Start eines MRM
	<ul style="list-style-type: none"> • Maßnahmen der funktionalen Sicherheit, • Redundanzen.

Tab. 5-29: Ausfall oder funktionaler Fehler in einer Komponente der automatisierten Fahrfunktion

Ausfall oder funktionaler Fehler in einer Teilkomponente der automatisierten Fahrfunktion (z. B. Sensorik)	
Systemreaktion	System schaltet nicht sofort ab mit Übernahmeaufforderung
Erwartete Häufigkeit	Gering
Konsequenz	<ul style="list-style-type: none"> • Fahrer mit schneller Reaktionszeit • Fahrer mit durchschnittlicher Reaktionszeit • Verhinderter Fahrer
Potenzielle Gegenmaßnahmen	<ul style="list-style-type: none"> • Minimale Auswirkung erwartet, da Reaktionszeit im Bereich normaler Reaktionszeit liegt und der Zeit • Kritisch; wahrscheinlich Start eines MRM • Kritisch; wahrscheinlich Start eines MRM
	Maßnahmen der funktionalen Sicherheit

Tab. 5-30: Ausfall oder funktionaler Fehler in einer Teilkomponente der automatisierten Fahrfunktion

Ausfall einer Fahrzeugkomponente	
Systemreaktion	<ul style="list-style-type: none"> • System schaltet sofort ab mit Übernahmeaufforderung, • System schaltet nicht sofort ab mit Übernahmeaufforderung.
Erwartete Häufigkeit	Sehr gering
Konsequenz	<p>Hängt stark von der Komponente ab, die ausfällt und ob diese das Fahrzeug destabilisiert oder in einen unsicheren Fahrzustand versetzt.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Unfall wahrscheinlich vermeidbar • Unfall wahrscheinlich nicht zu vermeiden • Unfall wahrscheinlich nicht zu vermeiden
Potenzielle Gegenmaßnahmen	Maßnahmen der funktionalen Sicherheit

Tab. 5-31: Ausfall einer Fahrzeugkomponente

Fehler bei der Regelung des Fahrzeugs	
Systemreaktion	System schaltet nicht sofort ab ohne Übernahmeaufforderung
Erwartete Häufigkeit	Sehr gering
Konsequenz	<p>Hängt stark von der Komponente ab, die ausfällt und ob diese das Fahrzeug destabilisiert oder in einen unsicheren Fahrzustand versetzt</p> <ul style="list-style-type: none"> • Unfall wahrscheinlich vermeidbar • Unfall wahrscheinlich nicht zu vermeiden • Unfall wahrscheinlich nicht zu vermeiden
Potenzielle Gegenmaßnahmen	Maßnahmen der funktionalen Sicherheit

Tab. 5-32: Fehler bei der Regelung des Fahrzeugs

Konträrere Sensorinformationen	
Systemreaktion	<ul style="list-style-type: none"> • System schaltet nicht sofort ab ohne Übernahmeaufforderung, • System schaltet nicht sofort ab mit Übernahmeaufforderung.
Erwartete Häufigkeit	Sehr gering, da immer Übernahmeaufforderung möglich sein sollte
Konsequenz <ul style="list-style-type: none"> • Fahrer mit schneller Reaktionszeit • Fahrer mit durchschnittlicher Reaktionszeit • Verhinderter Fahrer 	<ul style="list-style-type: none"> • Minimale Auswirkung erwartet, da Reaktionszeit im Bereich normaler Reaktionszeit liegt • Kritisch; wahrscheinlich Start eines MRM • Kritisch; wahrscheinlich Start eines MRM
Potenzielle Gegenmaßnahmen	<ul style="list-style-type: none"> • Funktionslogik, • Konfidenzbeiwerte für Sensorik.

Tab. 5-33: Konträre Sensorinformationen

Änderung der Umweltparameter	
Systemreaktion	System schaltet sofort ab mit Übernahmeaufforderung
Erwartete Häufigkeit	Level 3: häufig Level 4: gering Level 5: ausgeschlossen
Konsequenz <ul style="list-style-type: none"> • Fahrer mit schneller Reaktionszeit • Fahrer mit durchschnittlicher Reaktionszeit • Verhinderter Fahrer 	Hängt stark von der Komponente ab, die ausfällt und ob diese das Fahrzeug destabilisiert oder in einen unsicheren Fahrzustand versetzt <ul style="list-style-type: none"> • Minimale Auswirkung erwartet, da Reaktionszeit im Bereich normaler Reaktionszeit liegt • Kritisch; wahrscheinlich Start eines MRM • Kritisch; wahrscheinlich Start eines MRM
Potenzielle Gegenmaßnahmen	Redundante Sensorik, die auf anderen physikalischen Konzepten beruht.

Tab. 5-34: Änderung der Umweltparameter

Tabelle 5-29 bis Tabelle 5-33). In Tabelle 5-34 bis Tabelle 5-36 sind Szenarien mit Änderungen in den Umweltparametern aufgezeigt. Abschließend wird noch ein Szenario betrachtet, bei dem das Fahrzeug von außen mit dem Ziel der Beeinflussung der Fahrtrajektorie angegriffen wird (vgl. Tabelle 5-37). Die Beeinflussung kann dabei direkt durch einen Eingriff in die Regelung oder indirekt durch die Beeinflussung der Sensorik erfolgen.

Nach der Betrachtung der potenziellen Unfallszenarien sowie ihres möglichen Verlaufes in Abhängigkeit der Fahrerreaktion erscheint vor allem für zwei Manöver eine nähere Betrachtung ihrer Konsequenz sinnvoll. Dies sind das MRM und Situationen, in denen ein Fehler bei der Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern auftritt.

Zunächst wird eine nähere Betrachtung für das MRM vorgenommen. Es wird dabei der Fall betrachtet, dass das Fahrzeug im eigenen Fahrstreifen in den Stillstand verzögert wird. Der Fall, der dabei das größte Gefahrenpotenzial in sich birgt, ist

der Fall bei dem die Sensorik keine neuen Informationen liefert. Sehr wohl ist davon auszugehen, dass bis zu dem Zeitpunkt des Verlustes der Sensorinformationen, die für die Regelung des Fahrzeuges relevanten Informationen vorliegen. Liegen Informationen von redundanter Sensorik vor, so kann davon ausgegangen werden, dass eine bezogen auf die Verkehrssicherheit unkritischere Situation vorliegt als im angenommenen Fall des totalen Informationsausfalls.

Der Verlust der Sensorinformation und das Ausführen eines MRM können prinzipiell zu drei unterschiedlichen Konflikten führen:

- **Auffahrkonflikt mit dem Vorderfahrzeug:** Dieser Fall kann eintreten, wenn das Ego-Fahrzeug sich einem Fahrzeug nähert. Die positive Relativgeschwindigkeit kann bereits zu Beginn der Situation vorliegen oder durch eine stärkere Verzögerung des Vorderfahrzeuges induziert werden.

Änderung der Straßenführung	
Systemreaktion	System schaltet nicht sofort ab mit Übernahmeaufforderung
Erwartete Häufigkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Abhängig von Baustellen oder anderen kurzfristigen Straßensperrung bzw. Umleitungen, • für niedrige Penetrationsraten gering, • bei hohen Penetrationsraten mittel.
Konsequenz <ul style="list-style-type: none"> • Fahrer mit schneller Reaktionszeit • Fahrer mit durchschnittlicher Reaktionszeit • Verhinderter Fahrer 	<ul style="list-style-type: none"> • Übersteuern der Funktion; wahrscheinlich kein Unfall • Kritisch; möglicher Unfalltyp „Verlassen der Spur“ • Unfall vom Typ „Verlassen der Spur“
Potenzielle Gegenmaßnahmen	<ul style="list-style-type: none"> • Update der Karten, • Back-End Freigabe, • V2X-Kommunikation.

Tab. 5-35: Änderung der Straßenführung

Fehler bei der Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern	
Systemreaktion	System schaltet nicht sofort ab ohne Übernahmeaufforderung
Konsequenz <ul style="list-style-type: none"> • Fahrer mit schneller Reaktionszeit • Fahrer mit durchschnittlicher Reaktionszeit • Verhinderter Fahrer 	<ul style="list-style-type: none"> • Unfall wahrscheinlich vermeidbar • Unfall wahrscheinlich nicht zu vermeiden • Unfall wahrscheinlich nicht zu vermeiden

Tab. 5-36: Fehler bei der Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern

Externer Angriff auf das Fahrzeug oder die Sensorik	
Systemreaktion	<ul style="list-style-type: none"> • System schaltet sofort ab mit Übernahmeaufforderung, • System schaltet sofort ab ohne Übernahmeaufforderung, • System schaltet nicht sofort ab mit Übernahmeaufforderung.
Erwartete Häufigkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Potenzielle Angriffe häufig möglich, • Erfolgsaussichten eines Angriffes gering.
Konsequenz	<ul style="list-style-type: none"> • Unklar; hängt von Art und Schwere des Angriffes ab, • hohes Schadenspotenzial im Fall eines erfolgreichen Angriffes, • Häufigkeit erfolgreicher Angriffe dürfte gering sein.
Potenzielle Gegenmaßnahmen	Sicherheitsmaßnahmen im Fahrzeug (Maßnahmen zum Schutz gegen Angriffe)

Tab. 5-37: Externer Angriff auf das Fahrzeug oder die Sensorik

- **Auffahrkonflikt mit einem folgenden Fahrzeug:** dieser Fall wird analog zum vorherigen Fall durch eine höhere Geschwindigkeit des folgenden Fahrzeuges gegenüber dem Ego-Fahrzeug hervorgerufen. Es ist hier zu berücksichtigen, dass eine solche Situation nicht nur bei der Durchführung des MRM (Ego-Fahrzeug ist bereits langsamer oder Ego-Fahrzeug verzögert stärker als der folgende Verkehr), sondern auch nach dessen Durchführung (Fahrzeug steht im Fahrstreifen und das folgende Fahrzeug nähert sich dem Ego-Fahrzeug) auftreten kann.
 - **Verlassen des Fahrstreifens:** der Planungshorizont zum lateralen Steuern des Ego-Fahrzeuges reicht nicht aus, um das Fahrzeug im Fahrstreifen zu halten, bevor es in den Stillstand verzögert wird.
- In allen der drei Fälle hängt der Verlauf maßgeblich von der Kinematik der beteiligten Fahrzeuge ab. Für den Fall, dass das MRM das Anfahren des möglichst rechten Fahrstreifens oder eines Parkplatzes berücksichtigt, entstehen zusätzliche Konfliktpunkte, wie z. B. ein Fahrzeug im toten Winkel des

Ego-Fahrzeuges beim Durchführen des Fahrstreifenwechsels. Aufgrund der Komplexität und vieler unbekannter Größen im Fall eines MRM mit Fahrstreifenwechsel wird sich an dieser Stelle auf die drei oben genannten Fälle beschränkt.

Die erste Frage, der nachgegangen werden soll, ist die Frage, wie stark das Ego-Fahrzeug verzögert werden muss, damit es innerhalb des Planungshorizontes¹ bzw. auf Basis der Informationen zum Zeitpunkt des Verlustes neuer Sensorinformationen anhalten kann. Die Verzögerung hängt dabei in vereinfachter Betrachtung von der Reichweite der relevanten Sensorik sowie der Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeuges ab. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5-38 dargestellt.

Es zeigt sich, dass nur bei höheren Geschwindigkeiten und kurzen Sensorreichweiten Verzögerungen verlangt werden, die über den Verzögerungen im normalen Straßenverkehr liegen. Ferner sind unter idealen Bedingungen alle berechneten Verzögerungen auch umsetzbar. Allerdings muss vor allem beim Ausfall der Sensorik aufgrund von Witterungseinflüssen davon ausgegangen werden, dass keine idealen Bedingungen vorherrschen und der Reibwert herabgesetzt ist. Vor diesem Hintergrund sind insbesondere Verzögerungen oberhalb von 8,15 m/s² kritisch zu betrachten.

Nun wird der Konflikt mit dem vorausfahrenden Fahrzeug betrachtet. Der Situationsverlauf hängt von folgenden kinematischen Größen ab:

- Abstand zwischen den Fahrzeugen (d_x),
- Relativgeschwindigkeit zwischen Vorderfahrzeug und Egofahrzeug (v_{Rel}),
- Beschleunigung des Ego-Fahrzeuges ($a_{x \text{ Ego}}$),
- Beschleunigung des vorausfahrenden Fahrzeuges ($a_{x \text{ Front}}$).

Im Folgenden sollen beispielhaft die notwendigen Reaktionszeiten des menschlichen Fahrers mit den aus der Literatur identifizierten Übernahmezeiten in den identifizierten Szenarien gegenübergestellt werden.

Sensorreichweite	80 m	150 m	200 m
Beispielanwendung	Kamera (Erkennung FZG, Fahrstreifen)	LIDAR (Erkennung FZG, Fahrstreifen)	Radar (Erkennung FZG)
Minimale Verzögerung $-a_{x \text{ Ego}}$ [m/s²] bei			
v = 30 km/h	0,43	0,23	0,17
v = 50 km/h	1,21	0,64	0,48
v = 70 km/h	2,36	1,26	0,95
v = 100 km/h	4,82	2,57	1,93
v = 130 km/h	8,15	4,35	3,26

Tab. 5-38: Verzögerung in Abhängigkeit der Sensorreichweite

Literatur	Übernahmezeit [s]
[DAMBÖCK et al. (2012)]	6 - 8
[GOLD et al. (2013)]	2,1 - 2,89
[GOLD et al. (2015)]	1,8 - 3,6
[RADLMAYR et al. (2014)]	1,55 - 2,92

Tab. 5-39: Übernahmezeiten aus der Literatur

Auf Grundlage der Literatur wird im Folgenden vereinfachend eine Übernahmezeit von $t = 2,5$ s angenommen, die in Bild 5-9 bis Bild 5-12 rot dargestellt ist. Die notwendige Beschleunigung des Ego-Fahrzeuges zur Vermeidung eines Unfalls ergibt sich auf Grundlage der kinematischen Grundgleichungen für die zurückgelegte Strecke sowie die Geschwindigkeit zu:

$$a_{x \text{ Ego}} = a_{x \text{ Front}} - \frac{dv^2}{2 dx}$$

mit

$$dv = (v_{\text{Front}} - v_{\text{Ego}}) \quad \text{Gl. 5-1}$$

Mit diesem in Gleichung 5-1 dargestellten Zusammenhang lassen sich Situationen identifizieren, die zu einer möglichen Kollision führen. Die benötigte Reaktionszeit in den verschiedenen Situationen bei unterschiedlichen vorausgesetzten Beschleunigungen des vorausfahrenden Fahrzeuges (Bild 5-9: 1 m/s²; Bild 5-10: 0 m/s²; Bild 5-11: -1 m/s²; Bild 5-12: -3 m/s²) wird in den Bildern 5-9 bis 5-12 dargestellt.

Die technische Auslegung des MRM ist zum Durchführungszeitpunkt der Studie nicht bekannt. Es gilt aber, dass potenzielle Unfälle in den Situationen entstehen können, bei denen die notwendige Verzögerung über derjenigen liegt, die vom MRM auf-

¹ Vereinfachend wird angenommen, dass der Planungshorizont den vollen Sensorerfassungsbereich umfasst

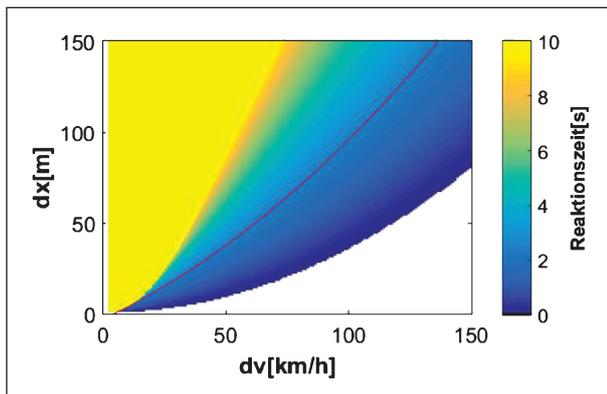


Bild 5-9: Notwendige Reaktionszeit des Fahrers des Ego-Fahrzeugs für verschiedene Abstände und Relativgeschwindigkeiten bei einer angenommenen Beschleunigung des Vorderfahrzeuges von 1 m/s^2

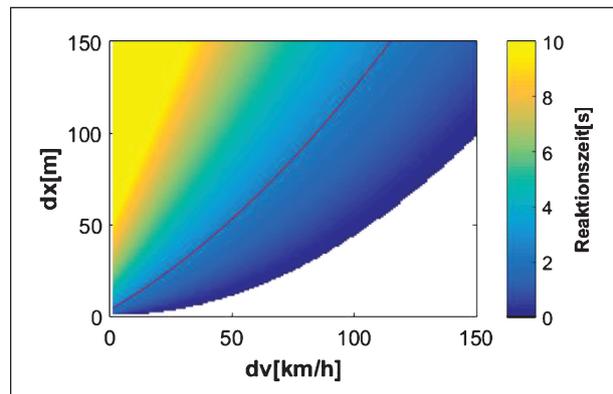


Bild 5-11: Notwendige Reaktionszeit des Fahrers des Ego-Fahrzeugs für verschiedene Abstände und Relativgeschwindigkeiten bei einer angenommenen Beschleunigung des Vorderfahrzeuges von -1 m/s^2

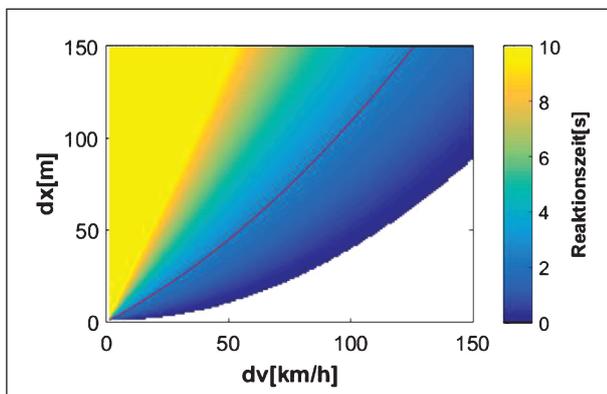


Bild 5-10: Notwendige Reaktionszeit des Fahrers des Ego-Fahrzeugs für verschiedene Abstände und Relativgeschwindigkeiten bei einer angenommenen Beschleunigung des Vorderfahrzeuges von 0 m/s^2

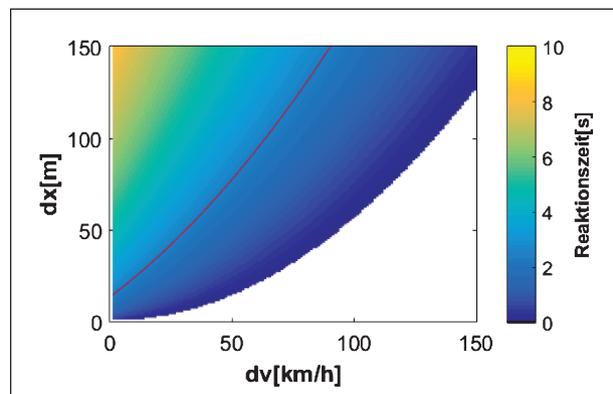


Bild 5-12: Notwendige Reaktionszeit des Fahrers des Ego-Fahrzeugs für verschiedene Abstände und Relativgeschwindigkeiten bei einer angenommenen Beschleunigung des Vorderfahrzeuges von -3 m/s^2

gebracht werden kann. Weiterhin können auch Unfälle entstehen, wenn die Situation sich gegenüber dem letzten bekannten Zustand wesentlich ändert. Ein Beispiel wäre ein Fußgänger, der den Fahrstreifen quert, und zum Zeitpunkt des Informationsverlustes noch nicht vom System erfasst worden ist.

5.7 Zusammenfassung der Wirksamkeit hinsichtlich der Verkehrssicherheit automatisierter Fahrfunktionen von Pkw

In diesem Kapitel wird zusammengefasst dargestellt, wie viele Unfälle abhängig von der Fahrfunktion und der Marktdurchdringung durch die zunehmende Fahrzeugautomatisierung der Personenkraftwagen verhindert werden können. Bei der Be-

trachtung der Wirkfelder ist der Nutzen der Fahrzeugautomatisierung in Bezug auf die Systemgrenzen der automatisierten Fahrfunktionen und die Fahrtüchtigkeit der Fahrzeugführer insgesamt konservativ abgeschätzt worden, da die Unfälle unberücksichtigt bleiben, in denen unklar ist, ob die Fahrzeugautomatisierung einen positiven Einfluss auf das Unfallgeschehen nehmen kann (z. B. bei Umweltbedingungen oder Alkohol- und Drogeneinfluss). Dagegen liegt den Ergebnissen auch die (nicht konservative) Annahme zugrunde, dass die automatisierten Fahrfunktionen selbst keine Unfälle verursachen.

In Bild 5-13 sind die Reduktion der Wirkfelder sowie die aus der Simulation und mittels Hochrechnung ermittelten Wirksamkeiten der fünf betrachteten automatisierten Fahrfunktionen für die untersuchten Marktdurchdringungsraten in Bezug auf die Unfälle

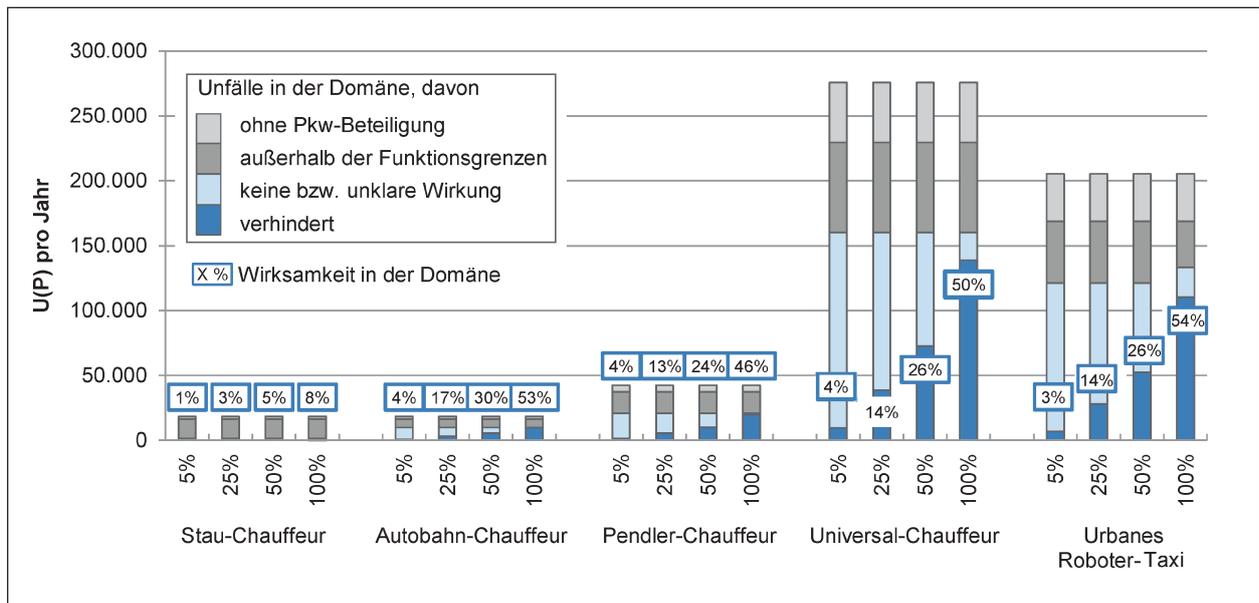


Bild 5-13: Wirkfelder und Wirksamkeiten U(P) der automatisierten Fahrfunktionen in Abhängigkeit der Marktdurchdringung

mit Personenschaden eines Jahres dargestellt. Die Domäne bezeichnet die Ortslagen/Straßenklassen, auf die die jeweilige Fahrfunktion operiert.

Anhand des Urbanen Roboter-Taxis soll Bild 5-13 im Folgenden erläutert werden. Durchschnittlich haben sich auf innerörtlichen Straßen 205.321 Unfälle mit Personenschaden in einem Jahr ereignet.

Da jedoch nur automatisierte Fahrfunktionen von Pkw untersucht werden, können auch nur Unfälle adressiert werden, bei denen mindestens ein Pkw unter den ersten beiden Beteiligten ist. Für das Beispiel des Urbanen Roboter-Taxis bedeutet dies, dass 36.486 Unfälle mit Personenschaden pro Jahr nicht adressiert werden können (s. hellgrauer Bereich).

Weiterhin liegen 47.487 Unfälle pro Jahr außerhalb der Funktionsgrenzen des Urbanen Roboter-Taxis (vgl. dunkelgrauer Bereich). Unter die Unfälle außerhalb der Funktionsgrenzen fallen diejenigen Unfälle, die nicht einem der beherrschbaren Szenarien zugeordnet werden können, und diejenigen Unfälle, bei denen der erste Beteiligte alkoholisiert ist, unter Drogen steht hat oder das Fahrzeug technische Mängel aufweist. Weiterhin liegen außerhalb der Funktionsgrenzen diejenigen Unfälle, die nicht im beherrschbaren Geschwindigkeitsbereich der Fahrfunktion stattfinden. An dieser Stelle sei angemerkt, dass bei den übrigen Fahrfunktionen, die dem Automatisierungslevel 3 zugeordnet werden, zusätzlich die Unfälle, die

außerhalb des Operationsbereichs der automatisierten Fahrfunktion (Regen, Nebel, Glätte, Arbeitsstellen) liegen, nicht adressiert werden können. Weiterhin fällt beim Urbanen Roboter-Taxi auf, dass bei 100 % Automatisierung weniger Unfälle aufgrund der Funktionsgrenzen wegfallen als bei niedrigerer Fahrzeugautomatisierung. Dies liegt daran, dass bei 100 % Automatisierung auf innerörtlichen Straßen keine Fahrzeuge außerhalb des angegebenen Geschwindigkeitsbereichs fahren.

Das maximale Wirkfeld des Urbanen Roboter-Taxis liegt folglich bei 121.348 Unfällen mit Personenschaden pro Jahr. Bis auf die Einschränkungen aufgrund des Geschwindigkeitsbereichs sind die Wirkfelder auf Basis der Unfälle in den fünf Bundesländern, die den dreistelligen Unfalltypen führen, ermittelt (vgl. Kapitel 5.2) worden. Mithilfe eines Vergleichs der Unfallstruktur dieser fünf Bundesländer mit der Unfallstruktur der verbleibenden elf Bundesländer hat sich herausgestellt, dass die ermittelten Wirkfelder auf das gesamte Unfallgeschehen in der Bundesrepublik Deutschland angewendet werden können.

Mithilfe der Simulation und der anschließenden Hochrechnung ist die Wirksamkeit der automatisierten Fahrfunktionen bei den gewählten Marktdurchdringungsraten bestimmt worden. Der hellblaue Bereich stellt die Anzahl der Unfälle dar, die zwar potenziell adressierbar sind, aber laut Simulationser-

gebnis nicht vermeidbar sind. Es kann jedoch die Unfallfolgeschwere durch eine Reduktion der Kollisionsgeschwindigkeit verringert werden. Bei einer Marktdurchdringung von beispielsweise 50 % sind dies beim Urbanen Roboter-Taxi 68.831 Unfälle mit Personenschaden. Der dunkelblaue Bereich stellt die Anzahl der verhinderten Unfälle dar. Das Urbane Roboter-Taxi kann auf innerörtlichen Straßen 52.517 Unfälle bei einer Marktdurchdringung von 50 % verhindern. Die Wirksamkeit in der Domäne, also in den Straßenklassen, in denen die Fahrfunktion wirkt, ist darüber hinaus auch als Prozentzahl angegeben. Die Wirksamkeit des Urbanen Roboter-Taxis beträgt bei einer Marktdurchdringung von 50 % ca. 26 %. Bei der Angabe der relativen Wirksamkeiten sei angemerkt, dass diese sich auf alle Unfälle in der Domäne beziehen, d. h. auch auf Unfälle ohne Pkw-Beteiligung, die durch die vorliegenden automatisierten Fahrfunktionen nicht verhindert werden können.

Es zeigt sich, dass die automatisierten Fahrfunktionen nie 100 % der Unfälle in der Domäne vermeiden können, da Unfälle ohne Pkw-Beteiligung nicht adressiert werden. Ein Vergleich der Anzahl der potenziell adressierbaren Unfälle (blauer und dunkelgrauer Bereich) verdeutlicht, dass die innerorts operierenden Fahrfunktionen potenziell mehr Unfälle adressieren können, da sich auf den innerörtlichen Straßen mehr Unfälle ereignen als außerorts, insbesondere mehr als auf Autobahnen. Bei einem Vergleich der Wirksamkeiten zeigt sich dennoch, dass diese bei allen Fahrfunktionen in der jeweiligen Domäne eine vergleichbare Größenordnung annehmen. Die Ausnahme stellt der Stau-Chauffeur aufgrund des geringen Geschwindigkeitsbereichs dar. Bei einer Marktdurchdringung von 100 % haben die Fahrfunktionen eine Wirksamkeit von ca. 46 % bis 54 % sofern sie auf alle registrierten Unfälle mit Personenschaden der jeweiligen Domäne bezogen werden.

Abschließend abgeschätzt können maximal 83 % aller Unfälle durch die Fahrzeugautomatisierung von Pkw vermieden werden. Hierfür wird eine vollautomatisierte Fahrfunktion (Level 5 nach [SAE (2016)]) angenommen, die in allen Ortslagen und auf allen Straßenklassen ohne Geschwindigkeitseinschränkung operiert. Diese Funktion beherrscht alle Fahrscenarien, hat keine Funktionseinschränkungen und darf auch alkoholisierte bzw. unter Drogen stehende Personen chauffieren.

6 Wirksamkeit hinsichtlich des Energiebedarfs und der Verkehrseffizienz

Neben der Wirksamkeit in Bezug auf die Verkehrssicherheit sind die Wirksamkeiten automatisierter Fahrfunktionen hinsichtlich des Energiebedarfs und der Verkehrseffizienz weitere Aspekte, bei denen ein gesellschaftlicher Nutzen identifiziert werden kann. Diese werden im Folgenden vorgestellt.

6.1 Wirksamkeit hinsichtlich des Energiebedarfs

Die Wirksamkeit hinsichtlich des Energiebedarfs wird – ähnlich wie bei der Betrachtung der Verkehrssicherheit – durch eine Verkehrssimulation ermittelt. Wie schon bei der Darstellung der methodischen Vorgehensweise in Kapitel 4.2 aufgeführt, wird nur die Straßenklasse Bundesautobahn berücksichtigt. Die Verkehrsstärken des dazu genutzten BAB-Abschnitts der A 2 im Raum Hannover werden durch fünf Verkehrsszenarien abgebildet.

Um die Wirksamkeit hinsichtlich des Energiebedarfs und der Emissionen zu bestimmen, werden fünf verschiedene Durchdringungsraten automatisierter Fahrzeuge betrachtet.

Der streckenbezogene Energiebedarf wird mithilfe der Fahrzeuggeschwindigkeit und -beschleunigung in der Verkehrssimulation bestimmt. Um grundlegende Mechanismen der Änderung des Energiebedarfs darzustellen, ist daher in Bild 6-1 zunächst der streckenbezogene Energiebedarf sowie die aus den einzelnen Fahrwiderständen resultierenden Anteile dessen über der Durchdringungsrate der automatisierten Fahrzeuge dargestellt. Die Ergebnisse sind beispielhaft für die Verkehrsszenarien eins, drei und fünf dargestellt. Darüber hinaus ist auch die Durchschnittsgeschwindigkeit der betrachteten Fahrzeuge auf der zweiten y-Achse aufgetragen.

Bei allen betrachteten Verkehrsszenarien ist eine Reduktion des streckenbezogenen Energiebedarfs über der Durchdringung automatisierter Fahrzeuge zu erkennen. Dieser Effekt resultiert in erster Linie aus der deutlichen Verringerung der Beschleunigungswiderstände. Denn während der Rollwiderstand konstant bleibt und der Luftwiderstand eine quadratische Abhängigkeit zur Fahrzeuggeschwin-

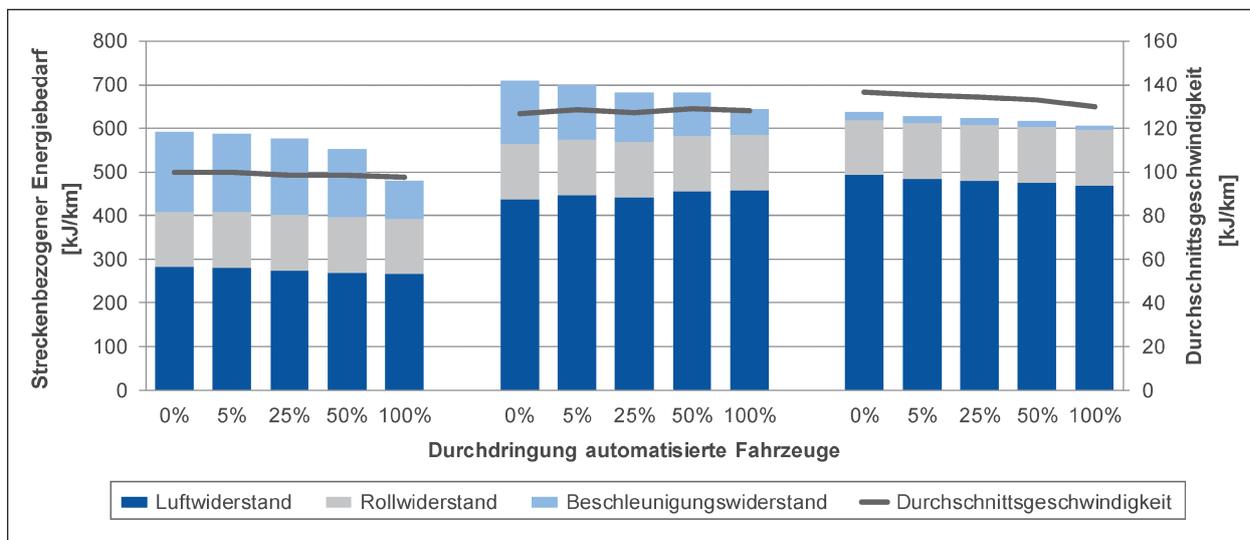


Bild 6-1: Streckenbezogener Energiebedarf und Geschwindigkeit

digkeit aufweist, verringert sich der Beschleunigungswiderstand durch die gleichmäßigere Fahrweise der automatisierten Fahrfunktionen.

Werden die Verkehrsszenarien entsprechend Bild 4-6 gewichtet, ergibt sich eine Reduktion des streckenbezogenen Energiebedarfs bei 100 % Durchdringung automatisierter Fahrzeuge von 8 %. Die Änderung des streckenbezogenen Energiebedarfs über der Durchdringungsrate ist in Bild 6-2 dargestellt.

Bei der Betrachtung des streckenbezogenen Energiebedarfs wird die in der Reifenaufstandsfläche benötigte Energie bilanziert. Diese ist aber nicht gleich der von der Energiewandlungsmaschine aufzubringenden Energie, da die Wirkungsgrade des Antriebsstrangs und der Energiewandlungsmaschinen nicht berücksichtigt werden. Ohne eine detaillierte Aufschlüsselung der Motorenkennfelder und der sich daraus zum Teil ergebenden Wirkungsgrade kann der Kraftstoffverbrauch nur abgeschätzt werden. Dieser wird durch eine Betrachtung mittels des spezifischen Kraftstoffverbrauchs b_e und der Dichte des Kraftstoffes p_{KS} berechnet. Unter Annahme konstanter Wirkungsgrade der Energiewandlungsmaschinen und somit eines konstanten spezifischen Kraftstoffverbrauchs b_e kann der streckenbezogene Kraftstoffverbrauch als proportional zum streckenbezogenen Energiebedarf angenommen werden. So kann der durchschnittliche Kraftstoffverbrauch der in Deutschland in den Jahren 2006 bis 2016 neu zugelassenen Diesel-Pkw [KBA (2017b)] bei 100 % Durchdringung automatisierter Fahrfunktio-

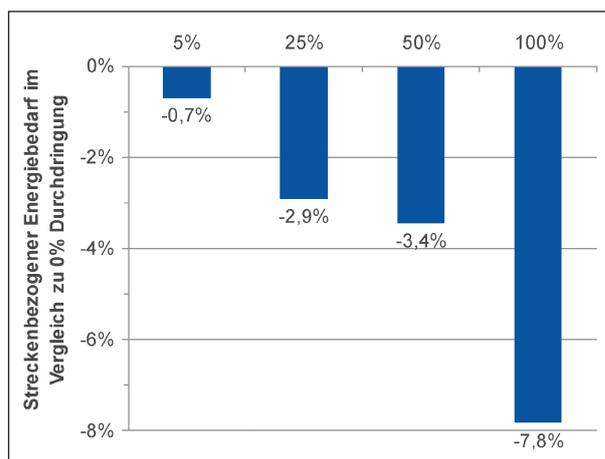


Bild 6-2: Änderung des streckenbezogenen Energiebedarfs über der Durchdringung automatisierter Fahrzeuge

nen von 4,8 l/100 km um 8 % auf 4,4 l/100 km reduziert werden. Bei Pkw mit Benzinmotor kann der durchschnittliche Verbrauch von 5,6 l/100 km auf 5,2 l/100 km verringert werden. Da die CO₂-Emissionen sich bei stöchiometrischer Verbrennung proportional zum Kraftstoffverbrauch verhalten, können die prozentualen Änderungen des Kraftstoffverbrauchs direkt auf die CO₂-Emissionen übertragen werden. Bei Berücksichtigung des Pkw-Bestandes in Deutschland nach Kraftstoffarten (Stand: 1. Januar 2017) [KBA (2017a)] könnten daher die CO₂-Emissionen bei 100 % Durchdringung automatisierter Fahrfunktionen von 128,9 g/km auf 118,8 g/km reduziert werden.

6.2 Wirksamkeit hinsichtlich der Verkehrseffizienz

In diesem Kapitel werden die Auswirkungen automatisierter Fahrfunktionen auf die Kapazität der Fernstraßen sowie das Stauvermeidungspotenzial durch eine Reduktion der Unfallzahlen dargestellt.

6.2.1 Wirksamkeit hinsichtlich der Kapazität von Fernstraßen

Im Folgenden wird auf die Ergebnisse des Projektes Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur [BUSCH et al. (2017)] zurückgegriffen. Aufgrund der unterschiedlichen Bezeichnung der Automatisierungslevel in dem genannten Projekt im Vergleich zur SAE-Definition werden die Begrifflichkeiten zur Vereinheitlichung im Folgenden an die in Kapitel 2.2 beschriebenen SAE-Definitionen angepasst. Daher wird die Klassifizierung hochautomatisiert aus [BUSCH et al. (2017)] zu bedingt automatisiert gemäß [SAE (2016)] geändert.

Das Ziel des vorgestellten Forschungsvorhabens war die Wirkungsermittlung von teil- und bedingt automatisierten Fahrzeugen auf die Kapazität des deutschen Fernstraßennetzes. Zur Bestimmung des verkehrstechnischen Einflusses automatisierten Fahrens auf den Verkehrsfluss und somit die Kapazität erfolgten mikroskopische Untersuchungen an jeweils kleinen Straßennetzelementen. Die Ergebnisse auf den repräsentativen Netzelementen wurden anschließend auf das deutsche Bundesautobahnnetz hochgerechnet. Abschließend erfolgte eine volkswirtschaftliche Bewertung.

Teilautomatisierte Fahrfunktionen, bedingt automatisierte Fahrfunktionen und kommunizierende bedingt automatisierte Fahrfunktionen stellten die untersuchten Automatisierungsstufen in dem Projekt dar. Teilautomatisierte Fahrfunktionen übernehmen die Längsführung des Fahrzeugs sowie bis zu einem gewissen Grad die Spurhalteführung (vgl. Bild 6-3). Bedingt automatisierte Fahrzeuge übernehmen die Längs- und Querführung des Fahrzeugs und sind in der Lage, Fahrstreifenwechsel ohne Eingriffe des Fahrers durchzuführen. Kommunizierende bedingt automatisierte Fahrzeuge sind Systeme, die darüber hinaus Informationen durch Kommunikation mit ebenfalls ausgestatteten umgebenden Fahrzeugen aufnehmen und austauschen können. Aufgrund dieses Austausches sind



Bild 6-3: Komponenten der automatisierten Fahrfunktionen [BUSCH et al. (2017)]

geringere Zeitlücken zwischen diesen Fahrzeugen möglich.

Die automatisierten Fahrzeuge halten sich stets an das Rechtsfahrgebot und an die Richtgeschwindigkeit bzw. die zulässige Höchstgeschwindigkeit. Menschliche Fahrer hingegen haben je eine Wunschgeschwindigkeit wodurch sich Geschwindigkeitsunterschiede ergeben. Das Abstandsverhalten der automatisierten Fahrfunktionen wurde so modelliert, dass die automatisierten Fahrzeuge eine präzise und konstante Zeitlücke von mindestens 1,8 (halber Tacho) Sekunden zum vorausfahrenden Fahrzeug halten. Kommunizierende Fahrzeuge haben untereinander eine Zeitlücke von 0,9 Sekunden. Das Abstandsverhalten von menschlichen Fahrern ist unabhängig vom Fahrzeugtyp des Vorausfahrenden und schwankt zwischen 1,0 bis 1,5 Sekunden. Das Fahrstreifenwechselverhalten ist analog modelliert. Die genaue Parametrierung ist dem Forschungsbericht Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur [BUSCH et al. (2017)] zu entnehmen.

Auf Basis der Fahrzeugparametrierung erfolgte die simulationsbasierte Ermittlung der Wirkung automatisierten Fahrens auf die Kapazität von Bundesautobahnen. Hierzu wurde der Verkehr auf kleinen und isoliert betrachteten Netzelementen (u. a. freie Strecke, Einfahrt, Ausfahrt, Verflechtung in verschiedenen Ausprägungen) simuliert und somit die Wirkung des automatisierten Fahrens kleinräumig ermittelt.

Anhand der Simulationsergebnisse wird erkennbar, dass das Verhalten der Verkehrsteilnehmer einen maßgeblichen Einfluss auf die Kapazität der Infrastruktur hat. Die Kapazität der Netzelemente kann insbesondere durch geringere Fahrzeugfolgeabstände, wie sie die kommunizierenden bedingt automatisierten Fahrfunktionen aufweisen, gesteigert werden. Auf einigen Netzelementen kann die Kapazität um bis zu 35 % bei einem Nutzungsgrad von 100 % gesteigert werden. Größere Fahrzeugfolgeabstände, wie sie die konservativ gestalteten be-

dingt automatisierten Fahrzeuge haben, wirken im Vergleich zu den Normalfahrern hingegen kapazitätsmindernd. Weiterhin ist erkennbar, dass der Nutzungsgrad der Systeme Einfluss auf die Kapazität hat. Meist sind erst bei Nutzungsgraden von über 50 % Kapazitätsanstiege erkennbar. Darüber hinaus wird deutlich, dass durch die Homogenisierung der Geschwindigkeiten die Anzahl der Verkehrszusammenbrüche reduziert werden kann. Neben dem Abstandsverhalten scheint auch das kooperative Verhalten beim Fahrstreifenwechsel einen großen Einfluss auf die Kapazität der Infrastruktur zu haben.

Die Erkenntnisse aus den kleinräumig und isoliert betrachteten Netzelementen wurden anschließend unter Hinzuziehung eines Flottenmodells, mit dem die Fahrzeugzusammensetzung einschließlich der Automatisierungsgrade für verschiedene Prognosejahre bestimmt wurde, auf das gesamte Autobahnnetz Deutschlands hochgerechnet.

Wie bereits bei der Simulation auf isolierten Netzelementen zeigt sich, dass erst bei Erreichen eines sehr hohen Anteils von kommunizierenden Fahrzeugen Kapazitätsgewinne erreicht werden können. Der mittlere Kapazitätsgewinn im Netz beträgt bei einer Vollausrüstung und 100 % Nutzung dieser Fahrzeuge ca. 30 %. In den davor liegenden Jahren, die durch einen hohen Anteil an nicht kommunizierenden Fahrzeugen geprägt sind, sind Kapazitätsverluste zu erwarten.

Anschließend wurde untersucht, wie sich die Kapazitätsänderungen auf die Fahrzeiten auswirken. Hier zeigt sich, dass die Entwicklung der Verlustzeiten dem zeitlichen Verlauf der Kapazitätsentwicklung folgt. Bei einer 100 % Ausstattung mit kommunizierenden bedingt automatisierten Fahrzeugen bewirken die Kapazitätsgewinne eine Reduzierung der Verlustzeiten durch verkehrliche Überlastung (ohne Unfälle und Baustellen) um über die Hälfte. Dadurch können ca. 6 % der gesamten Fahrzeiten im Autobahnnetz eingespart werden.

Die abschließende volkswirtschaftliche Bewertung, bei der die Zeitgewinne im Personen- und Güterverkehr mit den Kostensätzen der Bundesverkehrswegeplanung monetarisiert wurden, ergab, dass die Reduzierung der Fahrzeiten einer Einsparung von ca. 2 Milliarden Euro pro Jahr entspricht [BUSCH et al. (2017)].

6.2.2 Stauvermeidungspotenzial durch Reduktion der Unfallzahlen

Als Hauptursachen für das Staugeschehen auf Autobahnen werden üblicherweise hohe Verkehrsaufkommen, Baustellen, Unfälle und Pannen/Sonstiges genannt. Bild 6-4 zeigt die Stausituation sowie die Anzahl der Baustellen und Unfällen über den Jahresverlauf für 2015 und 2016.

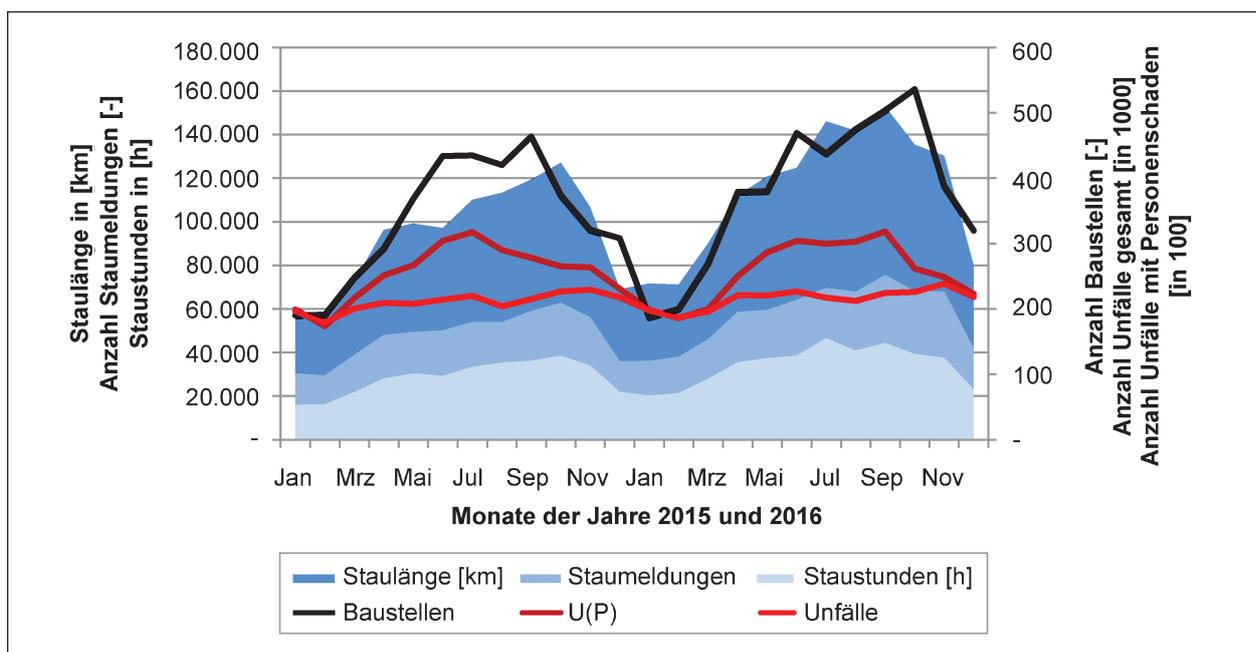


Bild 6-4: Stausituation sowie Anzahl der Baustellen und Unfälle im Jahresverlauf für 2015 und 2016 [ADAC (2015)]; [ADAC (2016)]; [Destatis (2016)]

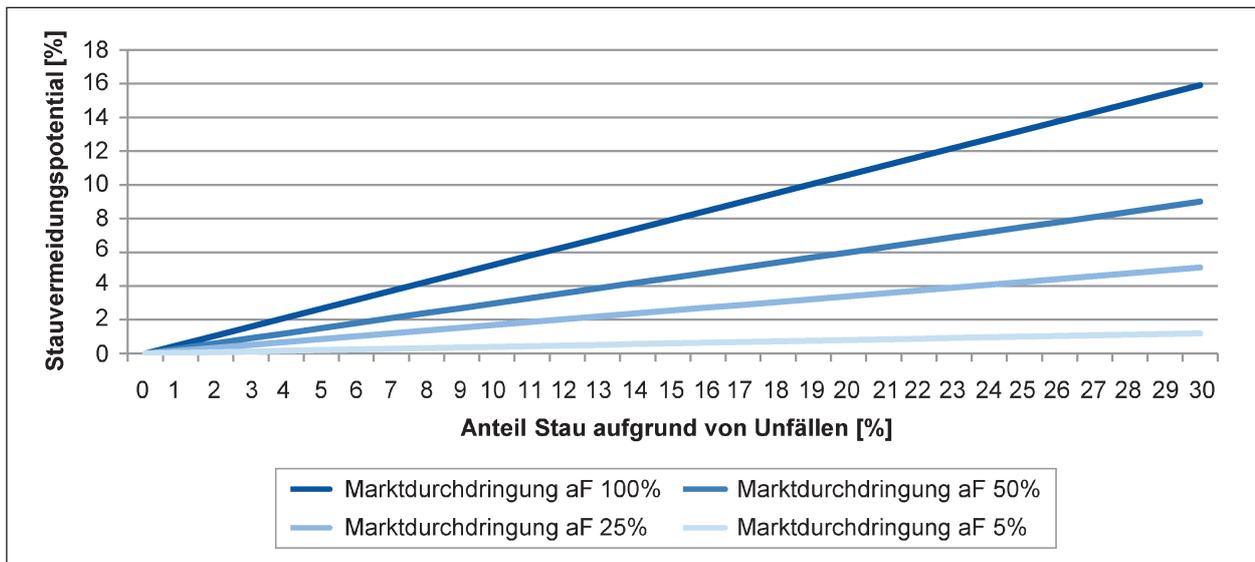


Bild 6-5: Stauvermeidungspotenzial durch Reduktion der Unfallzahlen

Als Grundlage für die Staustatistiken dienen in der Regel Staumeldungen der Verkehrswarndienste, die entweder durch die Landesmeldestellen oder durch private Anbieter erhoben werden. Je nach Datengrundlage, verwendeter Kennzahl und dem betrachteten Netzabschnitt können die Ergebnisse stark variieren [GEISTEFELDT et al. (2011)].

Im Projekt ‚Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur‘ [BUSCH et al. (2017)] wurden die Kapazitätsgewinne durch eine Reduzierung der Verlustzeiten, die sich durch eine Verbesserung der verkehrlichen Überlastungen ergeben, ermittelt. Eine Reduzierung der Verlustzeiten aufgrund von Vermeidungen von Unfällen wurde hingegen nicht thematisiert [BUSCH et al. (2017)].

Laut der Staubilanz 2015 [ADAC (2015)], die vom ADAC herausgegeben wurde, wurden 2015 rund 568.000 Stauereignisse auf deutschen Autobahnen gemeldet. Die registrierten Staulängen summieren sich auf insgesamt etwa 1.126.000 Kilometer Stau, die registrierten Staustunden auf insgesamt rund 41.000 Stunden. Als Ursache wird unter anderem die Anzahl an Unfällen genannt. 53.000 Staumeldungen in Deutschland des Jahres 2015 gehen auf Unfälle zurück, dies sind ca. 9 %.

Laut dem Mobilitätsbericht des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung [HESSEN (2016)] beträgt der Anteil an Staustunden auf Autobahn in Hessen bedingt durch Unfälle zwischen 18 bis 24 % in den Jahren 2000 bis 2015.

[SPARMANN (2005)] quantifiziert den Anteil an Staus aufgrund von Unfällen auf ca. 25 % ohne jedoch die verwendete Datengrundlage und verwendete Kenngröße zu erläutern.

[GEISTEFELDT et al. (2011)] hat im Rahmen einer Studie das Ausmaß und die Ursachen von Staus auf Autobahnen in Nordrhein-Westfalen auf Basis des Bezugsjahres 2010 analysiert. Er kam zu dem Schluss, dass jeweils knapp die Hälfte der staubedingten Zeitkosten in Nordrhein-Westfalen auf Baustellen bzw. hohes Verkehrsaufkommen zurückgeführt werden können, während der Anteil der schweren Unfälle ca. 7 % beträgt.

Wie bereits angedeutet, variiert der Anteil der Staus mit Unfallursache erheblich aufgrund der unterschiedlichen Datengrundlagen, verwendeten Kennzahlen und Betrachtungsräume. Das Staugeschehen sowie die Verteilung der Stauursachen in Nordrhein-Westfalen sind sicherlich nicht für Deutschland repräsentativ, da NRW ein erhöhtes Verkehrsaufkommen und Baustellenaufkommen im Vergleich zu den anderen Bundesländern aufweist.

Es soll untersucht werden, wie hoch das Stauvermeidungspotenzial durch eine Reduktion der Unfallzahlen ist. Da kein konkreter Wert für den Anteil der Unfallursache am Staugeschehen auf deutschen Autobahnen festgelegt werden kann, wird dieser in der Auswertung variabel zwischen 0 bis 30 % gehalten. In Kapitel 5.4 wurden für die verschiedenen automatisierten Fahrfunktionen die Wirksamkeiten auf den jeweiligen Straßenklassen/Ortslagen je nach Marktdurchdringung ermittelt. Da

an dieser Stelle nur das Stauvermeidungspotenzial auf Autobahnen untersucht wird, sind die Wirksamkeiten des Autobahn-Chauffeurs relevant. Die Wirksamkeiten für die Marktdurchdringungsraten sind folgende:

- Marktdurchdringung 5 %
→ Wirksamkeit 4 %,
- Marktdurchdringung 25 %
→ Wirksamkeit 17 %,
- Marktdurchdringung 50 %
→ Wirksamkeit 30 %,
- Marktdurchdringung 100 %
→ Wirksamkeit 53 %.

Durch Multiplikation der Wirksamkeiten mit dem Anteil der Unfallursache am Staugeschehen werden die Stauvermeidungspotenziale abgeschätzt. Die Ergebnisse sind in Bild 6-5 dargestellt. Erkennbar ist, dass bei einer hohen Marktdurchdringung die Stauvermeidungspotenziale höher sind. Beispielsweise ergibt sich bei einem angenommenen Anteil der Unfallursache am Staugeschehen von 20 % ein geschätztes Stauvermeidungspotenzial von 1 bis 11 % je nach Marktdurchdringung

6.3 Zusammenfassung der Wirksamkeit hinsichtlich des Energiebedarfs und der Verkehrseffizienz

In diesem Kapitel werden die Wirksamkeiten hinsichtlich des Energiebedarfs und der Verkehrseffizienz zusammengefasst dargestellt und diskutiert.

Hinsichtlich der Änderung des Energiebedarfs wird der Indikator streckenbezogener Energiebedarf betrachtet. Dieser wird für fünf Verkehrsstärken und fünf Durchdringungsraten (0 %, 5 %, 25 %, 50 % und 100 % Durchdringung automatisierte Fahrzeuge) mit einer Verkehrssimulation berechnet und ausgewertet. Hinsichtlich des streckenbezogenen Energieverbrauchs lässt sich für die Straßenklasse Bundesautobahn festhalten, dass durch automatisierte Fahrzeuge bei einer Durchdringungsrate von 100 % eine Reduktion um 8 % möglich ist. Diese ist vor allem auf ein weniger oszillierendes Beschleunigungsverhalten der automatisierten Fahrzeuge zurückzuführen.

Die Analyse des Forschungsberichts Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf

die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur [BUSCH et al. (2017)] hat ergeben, dass erst bei automatisierten Fahrfunktionen, die einen geringeren Fahrzeugfolgeabstand als Normalfahrer zulassen, Kapazitätsgewinne auf dem Autobahnnetz zu verzeichnen sind. Erst bei einem sehr hohen Marktanteil von miteinander kommunizierenden Fahrzeugen, die geringe Fahrzeugfolgeabstände erlauben, ergeben sich Kapazitätsgewinne. Bei einer Vollausstattung kann die Kapazität der Bundesautobahnen um ca. 30 % gesteigert werden. Teil- und bedingt automatisierte Fahrzeuge (nach [SAE (2016)]), die nicht miteinander kommunizieren können und einen konservativen Fahrzeugfolgeabstand von 1,8 s einhalten, wirken hingegen kapazitätsmindernd [BUSCH et al. (2017)].

Die Kapazitätsgewinne, die sich durch eine Vollausstattung mit kommunizierenden Fahrzeugen ergeben, bewirken eine Reduzierung der Verlustzeiten um über die Hälfte. Somit können ca. 6 % der gesamten Fahrzeiten im Autobahnnetz eingespart werden, was einem volkswirtschaftlichen Nutzen von ca. 2 Milliarden Euro entspricht [BUSCH et al. (2017)]. An dieser Stelle sei jedoch angemerkt, dass dies nur die Reduzierung der Verlustzeiten sind, die sich durch eine Verbesserung der verkehrlichen Überlastungen ergeben.

Eine Analyse zum Stauvermeidungspotenzial durch eine Reduktion der Unfallzahlen ergibt, dass beispielsweise bei einem Anteil von 20 % der Ursache Unfall am Staugeschehen je nach Marktdurchdringung der automatisierten Fahrfunktionen (Autobahn-Chauffeur) zwischen 1 bis 11 % der Staus auf deutschen Autobahnen vermieden werden können. Bei einer zuvor durchgeführten Literaturanalyse konnte kein exakter Wert für den Anteil der Unfälle am Staugeschehen festgemacht werden, da die Anteile aufgrund unterschiedlicher Datengrundlagen, verwendeten Kennzahlen und Betrachtungsräume stark variieren.

7 Fazit und Ausblick

Zur Ermittlung des potenziellen gesellschaftlichen Nutzens durch die zunehmende Pkw-Fahrzeugautomatisierung ist sowohl eine Analyse der Potenziale des Sicherheitsnutzens als auch eine Bestimmung der durch automatisiertes Fahren induzierten Änderung des Energieverbrauchs und der Verkehrseffizienz erfolgt. Der Fokus der Untersuchung hat

auf der Abschätzung der Potenziale des Sicherheitsnutzens gelegen.

Im Rahmen der Sicherheitsbetrachtung sind fünf automatisierte Fahrfunktionen der Automatisierungsstufen 3 und 4 (Stau-, Autobahn-, Pendler-, Universal-Chauffeur und Urbanes Roboter-Taxi) und drei Fahrerassistenzpakete (FAS-Pakete des Stau-, Autobahn- und Pendler-Chauffeurs) untersucht worden. Stau-, Autobahn- und Pendler-Chauffeur operieren nur außerorts, der Universal-Chauffeur zusätzlich innerorts und das Urbane Roboter-Taxi lediglich innerorts. Die Fahrfunktionen operieren in verschiedenen Ortslagen, auf verschiedenen Straßenarten bzw. -klassen und in einem bestimmten Geschwindigkeitsbereich, beherrschen eine unterschiedliche Anzahl an Szenarien und haben Funktionsgrenzen sowie unterschiedliche Sensorsichtbereiche.

Zunächst sind die maximalen Wirkfelder der Fahrfunktionen ermittelt worden. Diese geben die maximal mögliche Anzahl an Unfällen an, die durch die Fahrfunktion adressiert werden kann. Sie machen je nach Fahrfunktion einen Anteil zwischen 56 % und 65 % der Unfälle in der jeweiligen Domäne aus, die durch die Ortslage und die Straßenklasse definiert ist.

Anschließend sind die durch die automatisierten Fahrfunktionen induzierten Veränderungen der Auftretenshäufigkeiten der Szenarien mithilfe von Verkehrssimulationen auf Autobahnen abgeschätzt worden. Da automatisierte Fahrzeuge im Gegensatz zu Systemen der aktiven Sicherheit kontinuierlich arbeiten, ist es wahrscheinlich, dass bestimmte Unfallszenarien (z. B. Auffahrszenarien) durch automatisierte Fahrfunktionen nicht mehr hervorgerufen werden. Die Wirkung der automatisierten Fahrfunktionen in den einzelnen Szenarien ist durch Unfallresimulationen der adressierten Szenarien abgeschätzt worden. Dabei sind die Veränderungen der Unfallzahlen und der Unfallschwere berücksichtigt worden.

Die sich daraus ergebenden Unfalländerungspotenziale sind nachfolgend auf das Unfallgeschehen der Bundesrepublik Deutschland hochgerechnet worden, indem sie abhängig von der Auftretenshäufigkeit der Szenarien in den Unfallstatistiken gewichtet worden sind. Dabei sind Marktdurchdringungen der automatisierten Fahrfunktionen von 5 %, 25 %, 50 % und 100 % berücksichtigt worden. Aus den Ergebnissen für eine Marktdurchdringung

von 100 % geht unter den getroffenen Annahmen hervor, dass die automatisierten Fahrfunktionen, ausgenommen ist der Stau-Chauffeur, abhängig von der Domäne zwischen 46 % und 54 % der Unfälle verhindern können. Diese Wirksamkeiten beziehen sich auf alle Unfälle in der Domäne, d. h. auch auf Unfälle ohne Pkw-Beteiligung, die durch die vorliegenden automatisierten Fahrfunktionen nicht verhindert werden können.

Neben der Analyse der Potenziale des Sicherheitsnutzens sind auch die Änderungen des Energiebedarfs sowie der Verkehrseffizienz durch eine Automatisierung der Fahrzeuge betrachtet worden. Um die Änderungen des Energiebedarfs und der Emissionen zu identifizieren, sind, ähnlich wie beim Sicherheitsaspekt, Verkehrssimulationen mit verschiedenen Durchdringungsraten von automatisierten Fahrzeugen durchgeführt worden. Hinsichtlich der Straßenklasse Bundesautobahn lässt sich festhalten, dass bei einer Durchdringungsrate von 100 % eine Reduktion des streckenbezogenen Energiebedarfs um 8 % möglich ist. Diese ist vor allem auf ein weniger oszillierendes Beschleunigungsverhalten der automatisierten Fahrzeuge zurückzuführen.

Eine Literaturanalyse bezüglich der Wirkung des automatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur Deutschlands hat ergeben, dass durch einen sehr hohen Anteil an miteinander kommunizierenden Fahrzeugen deutliche Kapazitätsgewinne verzeichnet werden können, wenn ein verringerter Fahrzeugfolgeabstand unterstellt wird. Automatisierte Fahrzeuge, die einen konservativen Fahrzeugfolgeabstand einhalten, wirken sich jedoch negativ auf die Kapazität der Bundesautobahnen aus. Durch eine Vollausstattung der kommunizierenden Fahrzeuge können ca. 6 % der Fahrzeiten auf Autobahnen eingespart werden.

Eine Analyse zum Stauvermeidungspotenzial hat ergeben, dass durch die Reduktion der Unfallzahlen und unter der Annahme, dass 20 % aller Staus durch Unfälle verursacht werden, abhängig von der Marktdurchdringung zwischen 1 und 11 % der Staus auf deutschen Autobahnen durch den Autobahn-Chauffeur vermieden werden können.

Bei allen Ergebnissen des vorliegenden Berichts ist zu berücksichtigen, dass diese zahlreichen Annahmen und teilweise auf Verkehrssimulationen basieren. Diese erfolgten allerdings nur für die Bundesautobahnen. Bezüglich des nachgeordneten Net-

zes fehlen noch in größerem Umfang sinnvolle Annahmen für vergleichbare Verkehrssimulationen. Für zukünftige Wirksamkeitsbetrachtungen empfehlen die Autoren (real-)datenbasierte Bewertungsmethoden zu entwickeln und zu verwenden. So ist eine Datensammlung von relevanten, im realen Straßenverkehr aufgenommenen Verkehrssituationen ein vielversprechender Ansatz zur Wirksamkeitsbetrachtung, da hier bislang von der Simulation nicht darstellbare Effekte (wie z. B. Sonnenlicht und Niederschlag) berücksichtigt werden können. Nichtsdestotrotz bleiben simulationsbasierte Ansätze als Ergänzung zu (real-)datenbasierten Verfahren unerlässlich, um z. B. die Wirksamkeit bei hohen Durchdringungsraten vorherzusagen. Hier besteht insbesondere die Notwendigkeit, die Abbildung der (Referenz-)Fahrerleistung manuell gesteuerter Fahrzeuge in kritischen Situationen weiterzuentwickeln.

Da in kurz- bis mittelfristiger Zukunft der Mischverkehr aus manuell und automatisiert gesteuerten Fahrzeugen das realistischste Szenario darstellt, erfordert die Abbildung der Interaktion von manuell und automatisiert gesteuerten Fahrzeugen eine besondere Aufmerksamkeit bei der Wirksamkeitsbetrachtung. Hier besteht die Notwendigkeit, die bereits existierenden methodischen Ansätze weiterzuentwickeln.

Literatur

- [ADAC (2015)], N. N.: ADAC e. V.: Staubilanz 2015, München, 2016
- [ADAC (2016)], N. N.: ADAC e. V.: Staubilanz 2016, München, 2017
- [BAST (2017)], N. N.: Automatische Zählstellen auf Autobahnen und Bundesstraßen, Homepage der BAST, Internetseite: <http://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/Verkehrszaehlung.html>, aufgerufen am 03.05.2017
- [BENMIMOUN et al. (2011)], BENMIMOUN, M.; FAHRENKROG, F.; ZLOCKI, A. et al.: Incident detection based on vehicle can-data within the large scale field operational test euroFOT, Enhanced Safety of Vehicles (ESV), Washington D.C., USA, 2011
- [BREUER (2009)], BREUER, J.: Bewertungsverfahren von Fahrerassistenzsystemen, Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Vieweg+Teubner, 1. Auflage, Berlin, 2009
- [BULLETIN (2011)], N. N.: Volvo City Safety Loss Experience – Initial Results, Highway Loss Data Institute Bulletin, Vol. 28, No. 6, 2011
- [BUSCH (2005)], BUSCH, S.: Entwicklung einer Bewertungsmethodik zur Prognose des Sicherheitsgewinns ausgewählter Fahrerassistenzsysteme, VDI Fortschritt-Bericht, Reihe 12, Nr. 588, Düsseldorf, 2005
- [BUSCH et al. (2017)], BUSCH, F.; KRAUSE, S.; MOTAMEDIDEHKORDI, N. et al.: Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur. Forschungsvereinigung Automobiltechnik e. V., Berlin, 2017
- [CHALOUPKA et al. (1998)], CHALOUPKA, C.; RISSER, R.; ANTONIADES, A. et al.: Auswirkungen neuer Technologien im Fahrzeug auf das Fahrverhalten, Forschungsbericht der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 1998
- [DAMBÖCK et al. (2012)], DAMBÖCK, D.; FARID, M.; TÖNERT, L. et al.: Übernahmezeiten beim hochautomatisierten Fahren, 5. Tagung Fahrerassistenz, München, 2012
- [Destatis (2014)], Statistisches Bundesamt: Fachserie 8/Reihe 7 Verkehr, Verkehrsunfälle 2014, Wiesbaden, 2014
- [Destatis (2016)], Statistisches Bundesamt: Fachserie 8/Reihe 7 Verkehr, Verkehrsunfälle 2016, Wiesbaden, 2016
- [DOBBERSTEIN et al. (2014)], DOBBERSTEIN, J.; McCARTHY, M.; LÜDEKE, A.: Assessment of Integrated Vehicle Safety Systems for improved vehicle safety, ASSESS, Deliverable D2.1, 2014
- [DOMSCH (2008)], DOMSCH, C.: Einsatz von Referenzfahrsituationen bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen, 3. Tagung Aktive Sicherheit, Garching, 2008
- [DRASKÓCZY et al. (1998)], DRASKÓCZY, M.; CARSTEN, O.; KULMALA, R.: Road Safety Guidelines, CODE, Deliverable B5.2, 1998

- [EBNER (2014)], EBNER, A.: Referenzszenarien als Grundlage für die Entwicklung und Bewertung von Systemen der aktiven Sicherheit, Dissertation, Berlin, 2014
- [EDWARDS et al. (2014)], EDWARDS, M.; NATHANSON, A.; WISCH, M.: Assessment methodologies for forward looking Integrated Pedestrian and further extension to Cyclists Safety, AsPeCSS, Deliverable D1.3, 2014
- [FABER et al. (2011)], FABER, F.; JONKERS, E.; AUST, M. L. et al.: Analysis methods for user related aspects and impact assessment on traffic safety, traffic efficiency and environment, EuroFOT, Deliverable DL6.2, Version 1.0, 2011
- [FAHRENKROG (2014)], FAHRENKROG, F.: Impact Assessment in AdaptIVe – Workshop on Connected and Automated Driving Systems, Tokio, Japan, 2014
- [FAHRENKROG et al. (2014a)], FAHRENKROG, F.; ZLOCKI, A.; DOBBERSTEIN, J.: Impact Assessment of Developed Applications – Overall interactIVe Assessment, interactIVe, Deliverable D7.5, Version 1.2, 2014
- [FAHRENKROG et al. (2014b)], FAHRENKROG, F.; ZLOCKI, A.; ECKSTEIN, L.: Bewertungsmethodik für aktive Sicherheitssysteme – vom Test zur Wirksamkeitsanalyse, Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), 01/2014, 2014
- [FAHRENKROG (2016)], FAHRENKROG, F.: Wirksamkeitsanalyse von Fahrerassistenzsystemen in Bezug auf die Verkehrssicherheit, Dissertation, Institut für Kraftfahrzeuge, RWTH Aachen University, Aachen, 2016
- [FAHRENKROG et al. (2017)], FAHRENKROG, F.; WANG, L.; ROESENER, C. et al.: Impact Assessment of Supervised Automated Driving Functions, AdaptIVe, Deliverable D7.3, 2017
- [FARMER (2004)], FARMER, C. M.: Effect of Electronic Stability Control on Automobile Crash Risk, Traffic Injury Prevention 5, pp. 317-325, 2004
- [FASTENMEIER (1995)], FASTENMEIER, W.: Autofahrer und Verkehrssituation: Neue Wege zur Bewertung von Sicherheit und Zuverlässigkeit moderner Straßenverkehrssysteme, Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1995
- [FOLLMER et al. (2015)], FOLLMER, R.; GEIS, A.; GRUNSWITZ, D. et al.: Marktdurchdringung von Fahrzeugsicherheitssystemen, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, 2015
- [FROST et al. (1988)], FROST, U.; KELLER, H.: Einschätzung einer Zuordnung von Prometheus-Maßnahmen und Unfalltypen, TU München, München, 1988
- [GASSER et al. (2017)], GASSER, T.; FREY, A.; SEECK, A. et al.: Comprehensive Definitions for Automated Driving and ADAS, 25th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), Detroit, USA, 2017
- [GDV (1998)], N. N.: GDV, Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. (GDV), Institut für Straßenverkehr: Leitfaden zur Bestimmung des Unfalltyps, Köln, 1998
- [GEISTEFELDT et al. (2011)], GEISTEFELDT, J.; LOHOFF, J.: Stausituation auf den Autobahnen in Nordrhein-Westfalen – Studie im Auftrag des Ministeriums für Wirtschaft, Energie, Bauen, Wohnen und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen, Lehrstuhl für Verkehrswesen – Planung und Management der Ruhr Universität Bochum, Bochum, 2011
- [GEISTEFELDT et al. (2017)], GEISTEFELDT, J.; GIULIANI, S.; BUSCH, F. et al.: HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs auf Autobahnen, BASt-Bericht V 279, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, 2017
- [GIDAS (2015)], GIDAS (German In-Depth Accident Study) – Codebook 2015, Bundesanstalt für Straßenwesen und Forschungsvereinigung für Automobiltechnik, Bergisch Gladbach, 2015.
- [GOLD et al. (2013)], GOLD, C.; DAMBÖCK, D.; LORENTZ, L. et al.: Take over! How long does it take to get the driver back into the loop? Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, Vol. 57, No. 1, pp. 1938-1942, San Diego, USA, 2013
- [GOLD et al. (2015)], GOLD, C.; FELDHÜTTER, R.; BENGLER, K.: A Quantitative Model Approach for Take-Over Behavior in Highly Automated Vehicles, Lehrstuhl für Ergonomie, TU München, München, 2015

- [GRUSCHWITZ et al. (2017)], GRUSCHWITZ, D.; HÖLSCHER, J.; RAUDSZUS, D. et al.: Marktdurchdringung von Fahrzeugsicherheitssystemen, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, FE82.06625/2014, 2017
- [HANNAWALD et al. (2004)], HANNAWALD, L.; KAUER, F.: ACEA Equal Effectiveness Study 2004, Technische Universität Dresden, Dresden, 2004
- [HESSEN (2016)], N. N.: Mobilitätsbericht 2016, Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung, Wiesbaden, 2016
- [HLDI (2012)], N. N.: Predicted availability of safety features on registered vehicles, Highway Loss Data Institute, Loss Bulletin Vol. 28, No. 26, Arlington, USA, 2012
- [HLDI (2014)], N. N.: Predicted availability of safety features on registered vehicles – an update, Highway Loss Data Institute, Loss Bulletin Vol. 31, No. 15, Arlington, USA, 2014
- [HUMMEL et al. (2011)], HUMMEL, T.; KÜHN, M.; BENDE, J. et al.: Fahrerassistenzsysteme. Ermittlung des Sicherheitspotenzials auf Basis des Schadensgeschehens der Deutschen Versicherer, Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V., Unfallforschung der Versicherer, Berlin, 2011
- [JOKSCH et al. (1972)], JOKSCH, H. C.; WUERDEMANN, H.: Estimating the effects of crash phase injury countermeasures – The reduction of the fatality risk, Accident Analysis & Prevention, Vol. 4, pp. 89-108, 1972
- [KARABATSOU et al. (2006)], KARABATSOU, V.; PAPPAS, M.; van ELSLANDE, P. et al.: A-priori evaluation of safety functions effectiveness Methodologies, Trace project, Deliverable D4.1.3, 2006
- [KATES et al. (2010)], KATES, R.; JUNG, O.; HELMER, T. et al.: Stochastic simulation of critical traffic situations for the evaluation of preventive pedestrian protection systems, Baden-Baden, 2010
- [KBA (2015)], N. N.: Fahrzeugzulassungen (FZ), Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Fahrzeugalter 1. Januar 2015, Kraftfahrt-Bundesamt, FZ 15, Flensburg, 2015
- [KBA (2017a)], N. N.: Pkw-Bestand in Deutschland nach Kraftstoffarten (Stand: 1. Januar 2016 und 1. Januar 2017), Statista, Internetseite: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/4270/umfrage/pkw-bestand-in-deutschland-nach-kraftstoffarten/>, aufgerufen am 14.07.2017
- [KBA (2017b)], N. N.: Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch von neu zugelassenen Personenkraftwagen in Deutschland in den Jahren 2006 bis 2016 (Literverbrauch auf 100 Kilometer). In: Statista – Das Statistik-Portal, Internetseite: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/185831/umfrage/kraftstoffverbrauch-von-neu-zugelassenen-pkw-in-deutschland/>, aufgerufen am 19.07.2017
- [KNAPP et al. (2014)], KNAPP, A.; FAHRENKROG, F.; ZLOCKI, A.: Automated Driving Applications and Technologies for Intelligent Vehicles – Adaptive, 23rd Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, Aachen, 2014
- [KOCHERSCHIEDT (2004)], KOCHERSCHIEDT, H.: Wege zur Effizienzbetrachtung von Fahrerassistenzsystemen, 1. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz, München, 2004
- [LANGWIEDER et al. (2004)], LANGWIEDER, K.; GWEHENBERGER, J.; HUMMEL, T.: Sicherheitsgewinn durch ESP, Internationale Erfahrung aus Realunfällen, 1. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenzsysteme, München, 2004
- [LARSSON et al. (2012)], LARSSON, P.; ESBERG I.; van NOORT et al.: interactiVe – Test and evaluation plans, Deliverable D7.4, 2012
- [McRUER et al. (1959)], McRUER, D.; KRENDEL, E.: The Human Operator as a Servo System Element, Journal of the Franklin Institute 267, 1959
- [MITSCHKE et al. (2004)], MITSCHKE, M.; WALLENTOWITZ, H.: Dynamik der Kraftfahrzeuge; Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2004
- [NAGEL (1994)], NAGEL, H.-H.: A vision of 'vision and language' comprises action: an example from road traffic artificial intelligence, Review 8, pp. 189-214, Springer Netherlands, Dordrecht, Niederlande, 1994

- [NEUBAUER (2012)], NEUBAUER, M.: Nutzenanalyse von vorausschauenden System der Aktiven Sicherheit, Stochastik in der Unfallrekonstruktion, 13. Braunschweiger Symposium Automatisierungs-, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel (AAET), Braunschweig, 2012
- [PAGE et al. (2007)], PAGE, Y.; RIVIERE, C.; CUNY, S. et al.: A posteriori evaluation of Safety Functions effectiveness – Methodologies; TRACE Projekt, Deliverable 4.2.1, 2007
- [PAGE et al. (2015)], PAGE, Y.; FAHRENKROG, F.; FIORENTINO, A. et al.: A comprehensive and harmonized method for assessing the effectiveness of advanced driver assistance systems by virtual simulation: the P.E.A.R.S. initiative, 24th Enhanced Safety of Vehicles, Göteborg, Schweden, 2015
- [PAPPAS et al. (2008)], PAPPAS, M.; STANZEL, M.; PAGE, Y. et al.: A priori evaluation of safety functions effectiveness Results on safety increments, TRACE Projekt, Deliverable 4.1.4, 2008
- [PFAFFENBAUER et al. (2010)], PFAFFENBAUER, T.; GWEHENBERGER, J.; SCHWARZ, S. et al.: Unfallstruktur- und Wirkpotenzialanalysen zu den AKTIV-Applikationen auf der Basis von Lkw-Haftpflichtschäden, Forschungsprojekt AKTIV-AS, 2010
- [PROGEN (1999)], N. N.: Summary Report: Estimation of the Potenzial Safety Effects of Different Possible PROMETHEUS-Functions, ProGEN Safety Group, Stuttgart, 1999
- [RADLMAYR et al. (2014)], RADLMAYR, J.; GOLD, C.; LORENZ, L. et al.: How Traffic Situations and Non-Driving Related Tasks Affect the Take-Over, Quality in Highly Automated Driving Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, Vol. 58, No. 1, pp. 2063-2067, Chicago, USA, 2014
- [REICHART (2001)], REICHART, G.: Menschliche Zuverlässigkeit beim Führen von Kraftfahrzeugen, Nr. 7 der Reihe 22, Mensch-Maschine-Systeme, VDI Verlag, Düsseldorf, 2001
- [SAE (2016)], N. N.: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles, On-Road Automated Vehicle Standards Committee, 2016
- [SCHITTENHELM (2006)], SCHITTENHELM, H.: Der Einfluss von situativen Faktoren auf die Reaktionszeiten von Pkw-Fahrern, Vortrag auf der XV. EVU-Jahrestagung, Dresden, 2006
- [SCHITTENHELM (2013)], SCHITTENHELM, H.: Advanced Brake Assist – Real World effectiveness of current implementations and next generation enlargements by Mercedes-Benz, 23rd International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, Seoul, Korea, 2013
- [SCHOLLIERS et al. (2008)], SCHOLLIERS, J.; HENDRIKS, F.; AUST, M. L. et al.: An Integrated Evaluation Framework for Preventive Safety Applications, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Eindhoven, Niederlande, 2008
- [SCHUBERT et al. (2013)], SCHUBERT, A.; ERBSMEHL, C.: Simulation realer Verkehrsunfälle zur Bestimmung des Nutzens für ausgewählte sim^{TD}-Anwendungsfälle auf Basis der GIDAS Wirkfeldanalyse, Deliverable D5.5, 2013
- [SEFATI (2013)], SEFATI, M.: Benefit Analysis of Automated Safety Systems, Nutzenanalyse der automatisierten Schutzkonzepte, Ko-FAS Abschlussveranstaltung, 2013
- [SPARMANN (2005)], SPARMANN, J.: Verkehrsmanagement mit Unterstützung der Telematik in Fahrzeugen. In: Von den Anfängen bis zur Gegenwart – Verkehrstechnik an der Universität Kassel, Institut für Verkehrswesen, Kassel University Press, Kassel, 2005
- [UNSELT et al. (2004)], UNSELT, T.; BREUER, J.; ECKSTEIN, L. et al.: Avoidance of loss of control accidents through the benefit of ESP FISITA 2004 World Automotive Congress, Barcelona, Spanien, 2004
- [van NOORT et al. (2012)], van NOORT, M.; FAHRENKROG, F.; BAKRI, T. et al.: Safety Assessment Methodology in interactive, 19th ITS World Congress, Wien, Österreich, 2014

- [VERWEY (2000)], VERWEY, W.: Online driver workload estimation. Effects of road situation and age on secondary task measures, *Ergonomics*, Vol. 43, Nr. 2, pp. 187-209, Taylor & Francis Online, Abingdon, USA, 2000
- [VOLLRATH et al. (2005)], VOLLRATH, M.; SCHIESSL, C.; ALTMÜLLER, T. et al.: Erkennung von Fahrmanövern als Indikator für die Belastung des Fahrers. Fahrer im 21. Jahrhundert, VDI-Berichte Nr. 1919, VDI Verlag, Düsseldorf, 2005
- [von BENDA (1977)], von BENDA, H.: Die Skalierung der Gefährlichkeit von Straßenverkehrssituationen, 1. Teil: Ein Klassifikationssystem für Verkehrssituationen aus Fahrersicht. Bericht zum Forschungsprojekt 7320 der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bereich Unfallforschung, Bergisch Gladbach, 1977
- [WHO (2013)], N. N.: World Health Organization: Global Status Report on Road Safety, WHO, Genf, Schweiz, 2013
- [WILLE et al. (2012)], WILLE, J. M.; JUNGBLUTH, A.; KOHSIEK, A. et al.: rateEFFECT – Entwicklung eines Werkzeugs zur Effizienzbewertung aktiver Sicherheitssysteme, 5. Tagung Fahrerassistenz, München, 2012
- [WILMINK et al. (2008)], WILMINK, I.; JANSSEN, W.; JONKERS, E. et al.: Impact assessment of Intelligent Vehicle Safety Systems, eIMPACT, Deliverable D4, 2008
- [ZLOCKI et al. (2007)], ZLOCKI, A.; CHRISTEN, F.; BENMIMOUN, A. et al.: Einsatz von Fahrerassistenzsystemen in Nutzfahrzeugen. Forschungsbericht der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2007

Bilder

- Bild 2-1: Prozess für die prospektive Wirksamkeitsbetrachtung von Fahrerassistenzsystemen mit Umfeldwahrnehmung, vgl. [PAGE et al. (2015)]
- Bild 3-1: Szenarienklassifikation anhand des Fahrprozesses
- Bild 3-2: Auslöseschwellen der Auffahrwarnfunktion (FCW) und der autonomen Notbremse (AEB)
- Bild 3-3: Modellierung der Aktordynamik für die Fahrsituationssimulation
- Bild 4-1: Methodisches Vorgehen zur Wirksamkeitsbetrachtung hinsichtlich der Verkehrssicherheit
- Bild 4-2: Vorgehen zur Identifikation der Wirkungsfelder
- Bild 4-3: Beispiel 1 für Zuordnung Unfalltyp zu den Szenarien
- Bild 4-4: Beispiel 2 für Zuordnung Unfalltyp zu den Szenarien
- Bild 4-5: Verkehrsszenario BAB-A2 Region Hannover (links) und Ausschnitt AK Hannover-Ost (rechts) (Quelle: VISSIM)
- Bild 4-6: Identifizierung der Verkehrsszenarien anhand von Daten der Dauerzählstelle Hannover-Ost
- Bild 4-7: Unfallresimulation des Szenarios Annäherung an ein Vorderfahrzeug der Simulationskonfiguration 1 (Fahrer-Fahrer)
- Bild 4-8: Unfallresimulation des Szenarios Annäherung an ein Vorderfahrzeug der Simulationskonfiguration 2 (aF - Fahrer)
- Bild 4-9: Reaktionsstärken in kritischen Situationen, vgl. [FAHRENKROG (2016)]
- Bild 4-10: Kollisionsrelativgeschwindigkeiten aus Fahrermodell und GIDAS
- Bild 4-11: Verletzungsrisikofunktion für Front- und Heckanprall [SCHUBERT et al. (2013)]

- Bild 4-12: Verletzungsrisikofunktion für Kollisionen mit Querverkehr [SCHUBERT et al. (2013)]
- Bild 4-13: Verletzungsrisikofunktion für Kollisionen zwischen Fahrzeug und Fußgänger [HANNAWALD et al. (2004)]
- Bild 4-14: Pkw-Bestand in Deutschland nach Kraftstoffarten (Stand: 1. Januar 2017), vgl. [KBA (2017a)]
- Bild 4-15: Methodisches Vorgehen zur Wirksamkeitsbetrachtung hinsichtlich des Energiebedarfs
- Bild 5-1: Marktdurchdringungsrate für sechs verschiedene Szenarien
- Bild 5-2: Kumulierte Häufigkeit des GIDAS-Merkmals Ausgangsgeschwindigkeit V_0 [km/h] auf Basis der GIDAS Unfälle der Jahre 2011 bis 2015
- Bild 5-3: Häufigkeiten des Szenarios Annäherung an ein Vorderfahrzeug auf der Autobahn, abhängig von der Durchdringungsrate
- Bild 5-4: Häufigkeiten des Szenarios Einscheren eines anderen Fahrzeuges auf der Autobahn, abhängig von der Durchdringungsrate
- Bild 5-5: Interaktionskombinationen beim Szenario Einscheren eines anderen Fahrzeuges
- Bild 5-6: Änderung der Unfallhäufigkeit und Änderungspotenzial der Unfallschwere des Autobahn-Chauffeurs bei zwei Szenarien
- Bild 5-7: Unfalländerungspotenzial des Autobahn-Chauffeurs aus dem GIDAS-Wirkfeld bei einer Durchdringungsrate von 50 % für das Szenario Annäherung an ein Vorderfahrzeug
- Bild 5-8: Unfalländerungspotenzial des Autobahn-Chauffeurs aus dem GIDAS-Wirkfeld bei einer Durchdringungsrate von 50 % für das Szenario Einscheren eines anderen Fahrzeuges
- Bild 5-9: Notwendige Reaktionszeit des Fahrers des Ego-Fahrzeugs für verschiedene Abstände und Relativgeschwindigkeiten bei einer angenommenen Beschleunigung des Vorderfahrzeuges von 1 m/s^2
- Bild 5-10: Notwendige Reaktionszeit des Fahrers des Ego-Fahrzeugs für verschiedene Abstände und Relativgeschwindigkeiten bei einer angenommenen Beschleunigung des Vorderfahrzeuges von 0 m/s^2
- Bild 5-11: Notwendige Reaktionszeit des Fahrers des Ego-Fahrzeugs für verschiedene Abstände und Relativgeschwindigkeiten bei einer angenommenen Beschleunigung des Vorderfahrzeuges von -1 m/s^2
- Bild 5-12: Notwendige Reaktionszeit des Fahrers des Ego-Fahrzeugs für verschiedene Abstände und Relativgeschwindigkeiten bei einer angenommenen Beschleunigung des Vorderfahrzeuges von -3 m/s^2
- Bild 5-13: Wirkfelder und Wirksamkeiten $U(P)$ der automatisierten Fahrfunktionen in Abhängigkeit der Marktdurchdringung
- Bild 6-1: Streckenbezogener Energiebedarf und Geschwindigkeit
- Bild 6-2: Änderung des streckenbezogenen Energiebedarfs über der Durchdringung automatisierter Fahrzeuge
- Bild 6-3: Komponenten der automatisierten Fahrfunktionen [BUSCH et al. (2017)]
- Bild 6-4: Stausituation sowie Anzahl der Baustellen und Unfälle im Jahresverlauf für 2015 und 2016 [ADAC (2015)], [ADAC (2016)], [Destatis (2016)]
- Bild 6-5: Stauvermeidungspotenzial durch Reduktion der Unfallzahlen

Bilder im Anhang

- Bild A-1: Entwicklung des Unfallgeschehens
- Bild A-2: Entwicklung des Unfallgeschehens in Abhängigkeit der Ortslage

- Bild A-3: Straßenverkehrsunfälle 2014 nach Unfalltypen und Unfallfolgen (außerorts (ohne BAB)) [Destatis (2014)]
- Bild A-4: Straßenverkehrsunfälle 2014 nach Unfalltypen und Unfallfolgen [Destatis (2014)]
- Bild A-5: Straßenverkehrsunfälle 2014 nach Unfallarten und Unfallfolgen [Destatis (2014)]
- Bild A-6: Fehlverhalten von Fahrern von Personenkraftwagen bei Verkehrsunfällen mit Personenschaden nach Ortslage (2014) [Destatis (2014)]
- Bild A-7: Straßenverkehrsunfälle 2014 nach Unfalltypen und Unfallfolgen, innerorts [Destatis (2014)]
- Bild A-8: Straßenverkehrsunfälle 2014 nach Unfallarten und Unfallfolgen, innerorts [Destatis (2014)]
- Bild A-9: Straßenverkehrsunfälle 2014 nach Unfalltypen und Unfallfolgen, außerorts (ohne BAB) [Destatis (2014)]
- Bild A-10: Straßenverkehrsunfälle 2014 nach Unfallarten und Unfallfolgen, außerorts (ohne BAB) [Destatis (2014)]
- Bild A-11: Straßenverkehrsunfälle 2014 nach Unfalltypen und Unfallfolgen, BAB [Destatis (2014)]
- Bild A-12: Straßenverkehrsunfälle 2014 nach Unfallarten und Unfallfolgen, BAB [Destatis (2014)]
- Bild A-13: Unfalltypenverteilung U(P) – alle Ortslagen gemeinsam (dargestellt sind nur die dreistelligen Unfalltypen, die entweder in GIDAS oder in der amtlichen Unfallstatistik einen Anteil von mind. 1 % am Gesamtunfallgeschehen haben)
- Bild A-14: Unfalltypenverteilung U(P) – innerorts (dargestellt sind nur die dreistelligen Unfalltypen, die entweder in GIDAS oder in der amtlichen Unfallstatistik einen Anteil von mind. 1 % am Gesamtunfallgeschehen haben)
- Bild A-15: Unfalltypenverteilung U(P) – außerorts ohne BAB (dargestellt sind nur die dreistelligen Unfalltypen, die entweder in GIDAS oder in der amtlichen Unfallstatistik einen Anteil von mind. 1 % am Gesamtunfallgeschehen haben)
- Bild A-16: Unfalltypenverteilung U(P) – BAB (dargestellt sind nur die dreistelligen Unfalltypen, die entweder in GIDAS oder in der amtlichen Unfallstatistik einen Anteil von mind. 1 % am Gesamtunfallgeschehen haben)

Tabellen

- Tab. 2-1: Übersicht ausgewählter Projekte sowie die angewendete Methodik zur Wirksamkeitsbetrachtung hinsichtlich der Verkehrssicherheit
- Tab. 3-1 Szenarienklassifikationen aus der Literatur basierend auf [EBNER (2014)]
- Tab. 3-2: Betrachtete automatisierte Fahrfunktionen mit abgedeckten Szenarien
- Tab. 3-3: Straßenklassen der betrachteten automatisierten Fahrfunktionen mit Angabe der maximalen Geschwindigkeit (in km/h)
- Tab. 3-4: Sensorsichtbereiche und weitere Einschränkungen der automatisierten Fahrfunktionen
- Tab. 3-5: Übersicht über die Funktionen des Stau-Chauffeurs
- Tab. 3-6: Übersicht über die Funktionen des Autobahn-Chauffeurs
- Tab. 3-7: Übersicht über die Funktionen des Pendler-Chauffeurs
- Tab. 3-8: Übersicht über die Funktionen des Universal-Chauffeurs
- Tab. 3-9: Übersicht über die Funktionen des Urbanen Roboter-Taxis
- Tab. 3-10: Übersicht: Auffahrwarnfunktion (FCW) und autonome Notbremse (AEB)
- Tab. 3-11: Übersicht: Spurverlassens-Warnfunktion und Spurhaltefunktion (LDW)

- Tab. 3-12: Übersicht: Abstandsregeltempomat (ACC)
- Tab. 3-13: Übersicht: Totwinkelassistent (BLS)
- Tab. 3-14: Längsverhalten der automatisierten Fahrfunktion auf Verkehrsebene
- Tab. 3-15: Querverhalten der automatisierten Fahrfunktion für notwendige Fahrstreifenwechsel auf Verkehrsebene
- Tab. 3-16: Querverhalten für Fahrstreifenwechsel der automatisierten Fahrfunktion auf Verkehrsebene
- Tab. 3-17: Fahrerparameter für FCW/AEB Modell
- Tab. 3-18: Parametrierung des Abstandsregeltempomaten (ACC) für das FAS-Paket
- Tab. 4-1: Zuordnung Szenarien und Unfalltypen
- Tab. 4-2: Verkehrsstärken und Parameter
- Tab. 4-3: Interaktionstypen in Szenarien
- Tab. 4-4: Simulationskonfigurationen der Szenarien
- Tab. 4-5: Bremsreaktionszeiten für Szenarien
- Tab. 4-6: Abbreviated Injury Scale (AIS)
- Tab. 4-7: Zuordnung der Verletzungsrisikofunktionen für die entsprechenden Szenarien
- Tab. 5-1: Übersicht Eingangsdaten für Marktdurchdringungsszenarien auf Basis von [FOLLMER et al. (2015)], [GRUSCHWITZ et al. (2017)]
- Tab. 5-2: Unfalltypenverteilung für die Unfallstruktur der fünf Bundesländer sowie für die verbleibenden Bundesländer 2012 bis 2014 – U(P) für alle Ortschaften
- Tab. 5-3: Unfalltypenverteilung für die Unfallstruktur der fünf Bundesländer sowie für die verbleibenden Bundesländer 2012 bis 2014 – U(P) für Ortschaften innerorts
- Tab. 5-4: Unfalltypenverteilung für die Unfallstruktur der fünf Bundesländer sowie für die verbleibenden Bundesländer 2012 bis 2014 – U(P) für Ortschaften außerorts ohne BAB
- Tab. 5-5: Unfalltypenverteilung für die Unfallstruktur der fünf Bundesländer sowie für die verbleibenden Bundesländer 2012 bis 2014 – U(P) für Ortschaften BAB
- Tab. 5-6: Ermittlung des Wirkungsfeldes U(P) anhand des Autobahn-Chauffeurs
- Tab. 5-7: Wirkungsfelder U(P) der automatisierten Fahrfunktionen
- Tab. 5-8: Wirkungsfelder U(P) der automatisierten Fahrfunktionen – maximal zwei Beteiligte
- Tab. 5-9: Wirkungsfelder U(P) der FAS-Pakete
- Tab. 5-10: Wirkungsfelder U(P) der FAS-Pakete – maximal zwei Beteiligte
- Tab. 5-11: Unfallmerkmals-Analyse (5 Bundesländer U(P) 2012 bis 2014)
- Tab. 5-12: GIDAS-Wirkungsfelder der automatisierten Fahrfunktionen
- Tab. 5-13: GIDAS-Wirkungsfelder der FAS-Pakete
- Tab. 5-14: Anteil der in den Szenarien verbleibenden Unfälle nach Ortschaft, Straßenklasse und V0-Geschwindigkeitsbereich nach GIDAS
- Tab. 5-15: Unfalländerungspotenziale bei einer Marktdurchdringung der automatisierten Fahrfunktionen von 50 %
- Tab. 5-16: Ermittlung der Wirksamkeit U(P) in den 5 Bundesländern anhand des Autobahn-Chauffeurs – 50 % Durchdringung (kleinere Abweichungen sind damit begründet, dass die dargelegten Werte des Unfalländerungspotenzials und V0 aus Darstellungsgründen gerundet sind.)
- Tab. 5-17: Wirksamkeiten U(P) der automatisierten Fahrfunktionen – 5 % Durchdringung
- Tab. 5-18: Wirksamkeiten U(P) der automatisierten Fahrfunktionen – 25 % Durchdringung
- Tab. 5-19: Wirksamkeiten U(P) der automatisierten Fahrfunktionen – 50 % Durchdringung
- Tab. 5-20: Wirksamkeiten U(P) der automatisierten Fahrfunktionen – 100 % Durchdringung

- Tab. 5-21: Wirksamkeiten U(P) FAS-Pakete – 5 % Durchdringung
- Tab. 5-22: Wirksamkeiten U(P) der FAS-Pakete – 25 % Durchdringung
- Tab. 5-23: Wirksamkeiten U(P) der FAS-Pakete – 50 % Durchdringung
- Tab. 5-24: Wirksamkeiten U(P) der FAS-Pakete – 100 % Durchdringung
- Tab. 5-25: MAIS2+-Wirksamkeiten der automatisierten Fahrfunktionen und der FAS-Pakete – 5 % Durchdringung
- Tab. 5-26: MAIS2+-Wirksamkeiten der automatisierten Fahrfunktionen und der FAS-Pakete – 25 % Durchdringung
- Tab. 5-27: MAIS2+-Wirksamkeiten der automatisierten Fahrfunktionen und der FAS-Pakete – 50 % Durchdringung
- Tab. 5-28: MAIS2+-Wirksamkeiten der automatisierten Fahrfunktionen und der FAS-Pakete – 100 % Durchdringung
- Tab. 5-29: Ausfall oder funktionaler Fehler in einer Komponente der automatisierten Fahrfunktion
- Tab. 5-30: Ausfall oder funktionaler Fehler in einer Teilkomponente der automatisierten Fahrfunktion
- Tab. 5-31: Ausfall einer Fahrzeugkomponente
- Tab. 5-32: Fehler bei der Regelung des Fahrzeugs
- Tab. 5-33: Konträre Sensorinformationen
- Tab. 5-34: Änderung der Umweltparameter
- Tab. 5-35: Änderung der Straßenführung
- Tab. 5-36: Fehler bei der Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern
- Tab. 5-37: Externer Angriff auf das Fahrzeug oder die Sensorik
- Tab. 5-38: Verzögerung in Abhängigkeit der Sensorreichweite
- Tab. 5-39: Übernahmezeiten aus der Literatur

Tabellen im Anhang

- Tab. A-1: Unfallmatrix mit den höchsten Potenzialen auf Grundlage der U(P) und U(SS) innerhalb von Ortschaften von 2012 bis 2014 (amtliche Unfallstatistik)
- Tab. A-2: Unfallmatrix mit den höchsten Potenzialen auf Grundlage der U(P) und U(SS) außerhalb von Ortschaften 2012 bis 2014 (amtliche Unfallstatistik)
- Tab. A-3: Unfallmatrix mit den höchsten Potenzialen auf Grundlage der U(P) und U(SS) auf Autobahnen von 2012 bis 2014 (amtliche Unfallstatistik)
- Tab. A-4: Unfallmerkmals-Analyse (Unfälle mit Personenschaden und schwerwiegende Unfälle mit Sachschaden)
- Tab. A-5: Wirkfelder U(P) der Fahrfunktionen mit Herleitung – U(P)
- Tab. A-6: Wirkfelder U(P) + U(SS) der Fahrfunktionen mit Herleitung – U(P) + U(SS)
- Tab. A-7: Erläuterung der Begriffe Grundgesamtheit
- Tab. A-8: Wirkfelder U(P) + U(SS) der automatisierten Fahrfunktionen
- Tab. A-9: Wirkfelder U(P) + U(SS) der automatisierten Fahrfunktionen – maximal zwei Beteiligte
- Tab. A-10: Wirkfelder U(P) + U(SS) der FAS-Pakete
- Tab. A-11: Wirkfelder U(P) + U(SS) der FAS-Pakete – maximal zwei Beteiligte
- Tab. A-12: GIDAS-Wirkfelder der automatisierten Fahrfunktionen und FAS-Pakete mit Herleitung – U(P)
- Tab. A-13: Unfalltypenverteilung und Gewichtungsfaktoren für die Unfallstruktur der fünf Bundesländer sowie für die verbleibenden Bundesländer – U(P) + U(SS) für alle Ortschaften
- Tab. A-14: Unfalltypenverteilung und Gewichtungsfaktoren für die Unfallstruktur der fünf Bundesländer sowie für die verbleibenden Bundesländer – U(P) + U(SS) für Ortslage innerorts

- Tab. A-15: Unfalltypenverteilung und Gewichtungsfaktoren für die Unfallstruktur der fünf Bundesländer sowie für die verbleibenden Bundesländer – U(P) + U(SS) für Ortslage außerorts ohne BAB
- Tab. A-16: Unfalltypenverteilung und Gewichtungsfaktoren für die Unfallstruktur der fünf Bundesländer sowie für die verbleibenden Bundesländer – U(P) + U(SS) für Ortslage BAB
- Tab. A-17: Unfalltypen und -arten-Verteilung sowie deren Korrelation für die Unfallstruktur der verbleibenden Bundesländer – U(P) + U(SS) für alle Ortslagen
- Tab. A-18: Unfalltypen und -arten-Verteilung sowie deren Korrelation für die Unfallstruktur der fünf Bundesländer – U(P) + U(SS) für alle Ortslagen
- Tab. A-19: Unfalltypen und -arten-Verteilung sowie deren Korrelation für die Unfallstruktur der verbleibenden Bundesländer – U(P) + U(SS) für Ortslage innerorts
- Tab. A-20: Unfalltypen und -arten-Verteilung sowie deren Korrelation für die Unfallstruktur der fünf Bundesländer – U(P) + U(SS) für Ortslage innerorts
- Tab. A-21: Unfalltypen und -arten-Verteilung sowie deren Korrelation für die Unfallstruktur der verbleibenden Bundesländer – U(P) + U(SS) für Ortslage außerorts ohne BAB
- Tab. A-22: Unfalltypen und -arten-Verteilung sowie deren Korrelation für die Unfallstruktur der fünf Bundesländer – U(P) + U(SS) für Ortslage außerorts ohne BAB
- Tab. A-23: Unfalltypen und -arten-Verteilung sowie deren Korrelation für die Unfallstruktur der verbleibenden Bundesländer – U(P) + U(SS) für Ortslage BAB
- Tab. A-24: Unfalltypen und -arten-Verteilung sowie deren Korrelation für die Unfallstruktur der fünf Bundesländer – U(P) + U(SS) für Ortslage BAB
- Tab. A-25: Unfalltypen und -arten-Verteilung sowie deren Korrelation für die Unfallstruktur der verbleibenden Bundesländer – U(P) für alle Ortslagen
- Tab. A-26: Unfalltypen und -arten-Verteilung sowie deren Korrelation für die Unfallstruktur der fünf Bundesländer – U(P) für alle Ortslagen
- Tab. A-27: Unfalltypen und -arten-Verteilung sowie deren Korrelation für die Unfallstruktur der verbleibenden Bundesländer – U(P) für Ortslage innerorts
- Tab. A-28: Unfalltypen und -arten-Verteilung sowie deren Korrelation für die Unfallstruktur der fünf Bundesländer – U(P) für Ortslage innerorts
- Tab. A-29: Unfalltypen und -arten-Verteilung sowie deren Korrelation für die Unfallstruktur der verbleibenden Bundesländer – U(P) für Ortslage außerorts ohne BAB
- Tab. A-30: Unfalltypen und -arten-Verteilung sowie deren Korrelation für die Unfallstruktur der fünf Bundesländer – U(P) für Ortslage außerorts ohne BAB
- Tab. A-31: Unfalltypen und -arten-Verteilung sowie deren Korrelation für die Unfallstruktur der verbleibenden Bundesländer – U(P) für Ortslage BAB
- Tab. A-32: Unfalltypen und -arten-Verteilung sowie deren Korrelation für die Unfallstruktur der fünf Bundesländer – U(P) für Ortslage BAB
- Tab. A-33: Mögliche durch Fahrzeugautomatisierung induzierte Fahrsituationen mit zusätzlichem Gefährdungspotenzial: Funktion
- Tab. A-34: Mögliche durch Fahrzeugautomatisierung induzierte Fahrsituationen mit zusätzlichem Gefährdungspotenzial: Umwelt und Verkehr
- Tab. A-35: Mögliche durch Fahrzeugautomatisierung induzierte Fahrsituationen mit zusätzlichem Gefährdungspotenzial: Fahrer
- Tab. A-36: Unfalländerungspotenziale bei einer Marktdurchdringung der automatisierten Fahrfunktionen von 5 %
- Tab. A-37: Unfalländerungspotenziale bei einer Marktdurchdringung der automatisierten Fahrfunktionen von 25 %

-
- Tab. A-38: Unfalländerungspotenziale bei einer Marktdurchdringung der automatisierten Fahrfunktionen von 100 %
- Tab. A-39: Wirksamkeiten $U(P) + U(SS)$ der automatisierten Fahrfunktionen – 5 % Durchdringung
- Tab. A-40: Wirksamkeiten $U(P) + U(SS)$ der automatisierten Fahrfunktionen – 25 % Durchdringung
- Tab. A-41: Wirksamkeiten $U(P) + U(SS)$ der automatisierten Fahrfunktionen – 50 % Durchdringung
- Tab. A-42: Wirksamkeiten $U(P) + U(SS)$ der automatisierten Fahrfunktionen – 100 % Durchdringung
- Tab. A-43: Wirksamkeiten $U(P) + U(SS)$ der FAS-Pakete – 5 % Durchdringung
- Tab. A-44: Wirksamkeiten $U(P) + U(SS)$ der FAS-Pakete – 25 % Durchdringung
- Tab. A-45: Wirksamkeiten $U(P) + U(SS)$ der FAS-Pakete – 50 % Durchdringung
- Tab. A-46: Wirksamkeiten $U(P) + U(SS)$ der FAS-Pakete – 100 % Durchdringung
- Tab. A-47: MAIS2+-Wirksamkeiten der automatisierten Fahrfunktionen und FAS-Pakete – 5 % Durchdringung
- Tab. A-48: MAIS2+-Wirksamkeiten der automatisierten Fahrfunktionen und FAS-Pakete – 25 % Durchdringung
- Tab. A-49: MAIS2+-Wirksamkeiten der automatisierten Fahrfunktionen und FAS-Pakete – 50 % Durchdringung
- Tab. A-50: MAIS2+-Wirksamkeiten der automatisierten Fahrfunktionen und FAS-Pakete – 100 % Durchdringung

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Fahrzeugtechnik“

2012

F 83: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung – Gemeinsamer Schlussbericht der Projektgruppe
Gasser, Arzt, Ayoubi, Bartels, Bürkle, Eier, Flemisch, Häcker, Hesse, Huber, Lotz, Maurer, Ruth-Schumacher, Schwarz, Vogt € 19,50

F 84: Sicherheitswirkungen von Verkehrsinformationen – Entwicklung und Evaluation verschiedener Warnkonzepte für Stauendwarnungen
Bogenberger, Dinkel, Totzke, Naujoks, Mühlbacher € 17,00

F 85: Cooperative Systems Stakeholder Analysis
Schindhelm, Calderaro, Udin, Larsson, Kernstock, Jandrisits, Ricci, Geißler, Herb, Vierkötter € 15,50

2013

F 86: Experimentelle Untersuchung zur Unterstützung der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen für ältere Kraftfahrer
Hoffmann, Wipking, Blanke, Falkenstein € 16,50

F 87: 5th International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 88: Comparative tests with laminated safety glass panes and polycarbonate panes
Gehring, Zander € 14,00

F 89: Erfassung der Fahrermüdigkeit
Platho, Pietrek, Kolrep € 16,50

F 90: Aktive Systeme der passiven Fahrzeugsicherheit
Nuß, Eckstein, Berger € 17,90

F 91: Standardisierungsprozess für offene Systeme der Straßenverkehrstelematik
Kroen € 17,00

F 92: Elektrofahrzeuge – Auswirkungen auf die periodisch technische Überwachung
Beyer, Blumenschein, Bönninger, Grohmann, Lehmann, Meißner, Paulan, Richter, Stiller, Calker € 17,00

2014

F 93: Entwicklung eines Verfahrens zur Erfassung der Fahrerbeanspruchung beim Motorradfahren
Buld, Will, Kaussner, Krüger € 17,50

F 94: Biokraftstoffe – Fahrzeugtechnische Voraussetzungen und Emissionen
Pellmann, Schmidt, Eckhardt, Wagner € 19,50

F 95: Taxonomie von Fehlhandlungen bei der Fahrzeugführung
Oehme, Kolrep, Person, Byl € 16,50

F 96: Auswirkungen alternativer Antriebskonzepte auf die Fahrdynamik von Pkw
Schönemann, Henze € 15,50

F 97: Matrix von Lösungsvarianten Intelligenter Verkehrssysteme (IVS) im Straßenverkehr Matrix of alternative implementation approaches of Intelligent Transport Systems (ITS) in road traffic
Lotz, Herb, Schindhelm, Vierkötter
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 98: Absicherungsstrategien für Fahrerassistenzsysteme mit Umfeldwahrnehmung
Weitzel, Winner, Peng, Geyer, Lotz Sefati € 16,50

F 99: Study on smoke production, development and toxicity in bus fires
Hofmann, Dülsen € 16,50

2015

F 100: Verhaltensbezogene Kennwerte zeitkritischer Fahrmanöver
Powelleit, Muhrer, Vollrath, Henze, Liesner, Pawellek € 17,50

F 101: Altersabhängige Anpassung von Menschmodellen für die passive Fahrzeugsicherheit
Wagner, Segura, Mühlbauer, Fuchs, Peldschus, Freßmann € 19,00

F 102: 6th International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 103: Technische Möglichkeiten für die Reduktion der CO₂-Emissionen von Nutzfahrzeugen
Süßmann, Lienkamp
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 104: Abbiege-Assistenzsystem für Lkw – Grundlagen eine Testverfahrens
Schreck, Seiniger € 14,50

F 105: Abgasverhalten von in Betrieb befindlichen Fahrzeugen und emissionsrelevanten Bauteilen – Feldüberwachung
Schmidt, Georges € 14,50

F 105b: Examination of pollutants emitted by vehicles in operation and of emission relevant components – In-service conformity
Schmidt, Johannsen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 106: Untersuchung des Abgasverhaltens von in Betrieb befindlichen Fahrzeugen und emissionsrelevanten Bauteilen – Austauschкаталызаторы
Schmidt, Johannsen € 13,50

F 106b: Examination of pollutants emitted by vehicles in operation and of emission relevant components – Replacement catalytic converters
Schmidt, Johannsen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 107: Sicherheitsaspekte beim Laden von Elektrofahrzeugen
Vogt, Link, Ritzinger, Ablingyte, Reindl € 16,50

F 108: Interoperabilität zwischen öffentlichem Verkehrsmanagement und individuellen Navigationsdiensten – Maßnahmen zur Gewährleistung
von der Ruhren, Kirschfink, Ansorge, Reusswig, Riegelhuth, Karina-Wedrich, Schopf, Sparmann, Wöbbeking, Kannenberg € 17,50

F 109: Ermittlung des Umfangs von Abweichungen bei Durchführung der Abgasuntersuchung zwischen Messung am Auspuff und Abfrage des On-Board-Diagnosesystems
Schröder, Steickert, Walther, Ranftl
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 110: Wahrnehmung und Bewertung von Fahrzeugaußengeräuschen durch Fußgänger in verschiedenen Verkehrssituationen und unterschiedlichen Betriebszuständen
Altinsoy, Landgraf, Rosenkranz, Lachmann, Hagen, Schulze, Schlag
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 111: Geräuschminderung von Dünnschichtbelägen
Schulze, Kluth, Ruhnau, Hübelt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2016

F 112: Ersatz von Außenspiegeln durch Kamera-Monitor-Systeme bei Pkw und Lkw
Schmidt, Hoffmann, Krautscheid, Bierbach, Frey, Gail, Lotz-Keens € 17,50

F 112b: Final Report Camera-Monitor-Systems as a Replacement for Exterior Mirrors in Cars and Trucks
Schmidt, Hoffmann, Krautscheid, Bierbach, Frey, Gail, Lotz-Keens
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 113: Erweiterung der Software TREMOD um zukünftige Fahrzeugkonzepte, Antriebe und Kraftstoffe
Bergk, Heidt, Knörr, Keller € 15,50

F 114: Barrierefreiheit bei Fernlinienbussen
Oehme, Berberich, Maier, Böhm € 17,50

F 115: Statischer und dynamischer Fahrsimulator im Vergleich – Wahrnehmung von Abstand und Geschwindigkeit
Frey
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2017

F 116: Lang-Lkw – Auswirkung auf Fahrzeugsicherheit und Umwelt
Süßmann, Förg, Wenzelis
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 117: 7th International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“ – Reports on the ESAR-Conference 2016 at Hannover Medical School
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 118: Bedeutung kompensativer Fahrerstrategien im Kontext automatisierter Fahrfunktionen
Voß, Schwalm € 16,50

F 119: Fahrzeugtechnische Eigenschaften von Lang-Lkw
Förg, Süßmann, Wenzelis, Schmeiler
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 120: Emissionen von über 30 Jahre alten Fahrzeugen
Steven, Schulte, Hammer, Lessmann, Pomsel
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 121: Laufleistungsabhängige Veränderungen der CO₂-Emissionen von neuen Pkw
Pellmann, Schmidt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2018

F 122: Revision der Emissionsmodellierung für leichte Nutzfahrzeuge – Bedarfsanalyse auf Basis einer Vorstudie
Auf der Maur, Strassburg, Knörr, Heidt, Wuethrich
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 123: Motorradschutzhelme – Identifizierung ihres Verbesserungspotenzials unter Berücksichtigung des Motorradunfallgeschehens
Pollak, Schueler, Bourdet, Deck, Willinger € 19,50

F 124: Aufbau eines Qualitätsmanagementsystems für die Erfassung und Weiterverarbeitung von Daten für IVS-Dienste
Heinrich, Pollesch, Schober, Stamatakis, Grzebellus, Radike, Schneider, Stapelfeld, Huber
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 125: Untersuchung zu Elektrokleinstfahrzeugen
Bierbach, Adolph, Frey, Kollmus, Bartels, Hoffmann, Halbach € 19,50

2019

F 126: Einfluss zunehmender Fahrzeugautomatisierung auf Fahrkompetenz und Fahrkompetenzerwerb
Weißgerber, Grattenthaler, Hoffmann € 15,50

F 127: Erhöhung der Verkehrssicherheit älterer Kraftfahrer durch Verbesserung ihrer visuellen Aufmerksamkeit mittels „Sehfeldassistent“
Kupschick, Bürglen, Jürgensohn € 16,50

F 128: Potenzieller gesellschaftlicher Nutzen durch zunehmende Fahrzeugautomatisierung
Rösener, Sauerbier, Zlocki, Eckstein, Hennecke, Kemper, Oeser
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://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 03-63

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.