

# Infrastrukturbedarf automatisierten Fahrens – Grundlagenprojekt

Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen

Fahrzeugtechnik Heft F 130

**bast**

# Infrastrukturbedarf automatisierten Fahrens – Grundlagenprojekt

von

Frank Dierkes  
Bernhard Friedrich  
Thomas Heinrich  
Stephan Hoffmann  
Markus Maurer  
Andreas Reschka  
Tobias Schendzielorz  
Tudor Ungureanu  
Sebastian Vogt

SCHLOTHAUER & WAUER GmbH  
München

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Fahrzeugtechnik Heft F 130

**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.

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

## Impressum

**Bericht zum Forschungsprojekt FE 82.0632/2014: Grundlagenprojekt: Infrastrukturbedarf automatisierten Fahrens**

### Fachbetreuung

Tom Michael Gasser, Referat "Automatisiertes Fahren"  
Karen Scharnigg, Referat "Verkehrsbeeinflussung und Straßenbetrieb"  
Jan Ritter, Referat "Straßenausstattung"  
Bernhard Kollmus, Referat "Straßenentwurf, Verkehrsablauf, Verkehrsregelung"

### Herausgeber

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

### Redaktion

Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

### Druck und Verlag

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

ISSN 0943-9307

ISBN 978-3-95606-486-9

Bergisch Gladbach, Dezember 2019

## Kurzfassung – Abstract

### Infrastrukturbedarf automatisierten Fahrens – Grundlagenprojekt

Es ist davon auszugehen, dass automatisiertes Fahren künftig zum Großteil auf der vorhandenen Infrastruktur zusammen mit nicht-automatisierten Fahrzeugen erfolgen wird. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, ob mit der Verbreitung automatisierten Fahrens auch besondere Anforderungen an die Infrastruktur entstehen bzw. wie die Infrastruktur ggf. weiterentwickelt werden sollte.

Das übergeordnete Ziel des vorliegenden Grundlagenprojektes war daher die Beantwortung der Frage, welche Infrastrukturmaßnahmen (straßenbaulich, verkehrs- und informationstechnisch) für die verschiedenen Level des automatisierten Fahrens erforderlich sind. Das Projekt fokussierte hierbei auf die Fahrt auf der Autobahn und der Landstraße. Neben einem Standardszenario für die Fahrt auf der Autobahn (Autobahnchauffeur) und der Landstraße (Pendlerchauffeur) wurden auch ausgewählte Szenarien mit größeren Herausforderungen an die Fahraufgabe betrachtet, welche dann ggf. auch erhöhte Anforderungen an die Infrastruktur stellen.

Aufbauend auf Grundlagen und Standards für den Bau und Betrieb der Straßenverkehrsinfrastruktur wurden im Projekt die bzgl. des automatisierten Fahrens auftretenden Herausforderungen erarbeitet, Szenarien mit besonderen Herausforderungen entwickelt, Infrastrukturmaßnahmen zur Unterstützung des automatisierten Fahrens abgeleitet und anschließend hinsichtlich der Aspekte Notwendigkeit, Wirksamkeit, technische, organisatorische und zeitliche Realisierbarkeit sowie des entstehenden Aufwands bewertet. Die Ergebnisse der Bewertung tragen dazu bei Empfehlungen zu erarbeiten, die helfen sollen, die Straßeninfrastruktur hinsichtlich automatisierten Fahrens zukunftsfähig zu machen.

Es hat sich dabei herausgestellt, dass die Infrastruktur des Straßenverkehrs durchaus Potenzial besitzt, das automatisierte Fahren an ausgewählten Punkten bzw. in speziellen Situationen zu unterstützen. Eine zentrale und vielversprechende Maßnahme, die in den meisten Szenarien unterstützend für das automatisierte Fahren wirken kann, ist die Nutzung einer hochgenauen, geschichteten digitalen Referenzkarte. Durch diese lassen sich sowohl lang-

fristige Situationen, als auch mittel- und kurzfristige Änderungen der Verkehrslage darstellen.

Mit dem heutigen Stand der fahrzeugseitigen Technologie sowie der vorhandenen Straßeninfrastruktur erscheint hochautomatisiertes Fahren auf Autobahnen ohne Veränderungen bzw. große Anpassungen der Infrastruktur grundsätzlich vorstellbar. Für die weitere Entwicklung und den Erfolg der Automatisierung des Verkehrs ist zu sagen, dass das Zusammenspiel vor allem auf einer organisatorischen Ebene von Automobilindustrie und Straßenbetreibern als auch Diensteanbietern unerlässlich ist.

### Infrastructure requirements for automated driving – research project

It can be assumed that automated driving will in future be performed largely on the existing infrastructure together with non-automated vehicles. Regarding this assumption the question arises whether the increase of automated driving creates special requirements for the infrastructure or how the infrastructure should be developed if necessary.

The overall objective of this research project was therefore to answer the question of which infrastructure measures (road-building, traffic and information technology) are required for the various levels of automated driving. The project focused on driving on motorways and on rural roads. In addition to the standard scenario for driving on motorways (motorway driver) and on rural roads (commuter driver) also selected scenarios with bigger challenges to the driving task were considered, which then possibly also make increased demands to the infrastructure.

Based on the foundations and standards for the construction and operation of road infrastructure, the project worked out the challenges arising from automated driving, developed scenarios with special challenges, derived infrastructural measures to support automated driving, and then assessed these measures regarding necessity, effectiveness, technical, organizational and temporal feasibility and the resulting expense. Based on the results of the evaluation, recommendations were developed, which should help to make the road infrastructure future-proof regarding automated driving.

It turned out that the road infrastructure has quite a potential to support automated driving at selected points or in specific situations. A key measure that can support automated driving in most scenarios is the use of high-accuracy, layered digital reference maps. Those can be used to represent long-term situations as well as medium and short-term changes in the traffic situation.

With today's state-of-the-art technology as well as the existing road infrastructure, highly automated driving on motorways seems fundamentally conceivable without any changes or major adjustments to the infrastructure. For the further development and the success of the automation of traffic, it has to be said that especially at an organizational level the interaction of the automobile industry and road operators as well as service providers is essential.

---

## Summary

### Infrastructure requirements for automated driving – research project

## 1 Task description

Today many new vehicles already have assistance functions, which support the driver in executing the driving task. In this context many current research projects deal with highly automated or fully automated vehicles, which will increasingly participate in road traffic in the future.

Thereby automated driving may not lead to any loss of traffic safety or traffic efficiency. The reliability and road safety requirements of automated vehicles are particularly high due to the lacking potential influence of a driver or a passenger, the responsibility being totally shifted towards the vehicle. In fact, automating vehicles offer the potential to increase safety and efficiency.

Under the leadership of the Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure, the Digital Test Area motorway is currently being set up on the A9 motorway. Here, together with the state of Bavaria and the associations VDA and Bitkom, a technology-open offer for industry and research is to be created to be able to test, evaluate and develop future key technologies for highly automated and fully automated driving.

In principle, however, it can be assumed that automated driving will in future be performed largely on the existing infrastructure together with non-automated vehicles. Regarding this assumption the question arises whether the increase of automated driving creates special requirements for the infrastructure or how the infrastructure should be developed if necessary. In this context, it must also be clarified with which measures the infrastructure operators (federal government, federal states and local authorities) may have to meet these new requirements.

The overall objective of this research project was therefore to answer the question of which infrastructure measures (road-building, traffic and information technology) are required for the various

levels of automated driving. The project focused on driving on motorways and on rural roads. Automated driving in the complex city traffic with many other, mostly non-motorized, road users was not considered. In addition to the standard scenario for driving on motorways (motorway driver) and on rural roads (commuter driver) also selected scenarios with bigger challenges to the driving task were considered, which then possibly also make increased demands to the infrastructure.

## 2 Methodology

The construction and operation of the road infrastructure is based on a comprehensive set of rules, in which basics and standards are defined. These regulations are dependent on the function of the road. For the derivation of a possible infrastructure requirement due to future automated driving functions, the knowledge or definition of the various degrees of automation, as well as the terminology for automated driving is of crucial importance.

Based on these principles, at first the challenges arising from automated driving were worked out for a standard scenario on a motorway (motorway driver) and on a rural road (commuter driver). Furthermore, scenarios with special challenges for the driver or rather for the automated vehicle were developed. The development of the driving scenarios took place i.a. as part of a workshop, where representatives of the road construction administration (infrastructure operators) participated as well as representatives of the automotive and supplier industry.

Afterwards, infrastructure measures were deduced for the different driving situations or rather driving scenarios, which are conceivable to support the automated driving. The evaluation of the infrastructure measures was again supported by the joint effort in a workshop. The considered measures were evaluated by the aspects of necessity, effectiveness, technical, organizational and temporal feasibility as well as the resulting expense. Based on the results of the evaluation, recommendations were developed, which should help to make the road infrastructure future-proof regarding automated driving.

### 3 Results

In order to identify and to discuss the occurring challenges from automated driving on motorways and on rural roads by the automobile manufacturers and the infrastructure operators, a workshop was done as part of the research project.

Based on the critical situations which were identified during the first expert workshop, the following challenges have proven particularly critical:

- Missing or unrecognizable road marking over a shorter/longer road section,
- Bad or unrecognizable traffic signs (weather/pollution),
- Bad road condition which can lead to vehicle damage when driving through,
- Traffic Routing in roadwork areas may not correspond in part to the control plans, or due to weather conditions individual beacons in the workplace area may have been moved and/or twisted.

The driving scenarios were developed based on these challenges in close coordination with the research support group.

Automated driving on motorways and on federal and rural roads can be roughly subdivided, with regard to the existing infrastructure and the prevailing external conditions into “driving in normal case” and “driving in case of deviations from the normal case”. For the “normal driving” case, at first, standard scenarios of the driving function motorway driver and commuter driver were defined. The following scenarios were developed for significant deviations from the “normal driving” case:

#### Motorway Driver

- A1 – obstacle in own lane,
- A2 – missing hard shoulder,
- A3 – work site area on directional roadway.

#### Commuter Driver

- P1 – Driving on a single lane road (motor road) with concealed or missing lane marking,
- P2 – mixed traffic with high speed differences,
- P3 – overtaking on a single-lane road,
- P4 – work site area on a single-lane road.

For the mentioned scenarios, possible measures were put together to promote or support automated driving. The possible or conceivable measures are, in accordance with the division into measures of

- Design-technical infrastructure
  - Alignment,
  - Structural elements.
- Traffic infrastructure
  - Marking,
  - Signage,
  - Traffic control systems and
  - Traffic lights.
- Information technology infrastructure
  - Digital maps and
  - Vehicle-to-X-communication

differentiated.

Table 1 shows an overview of the developed measures for motorway driver and for commuter driver (german).

It turned out that the road infrastructure has quite a potential to support automated driving at selected points or in specific situations. The type of the measure (design-technical, traffic and information technology) depends in particular on the time horizon of the underlying scenario. In the case of long-term scenarios (e.g. lack of hard shoulder lanes) design-technical infrastructure measures are particularly suitable because no relevant changes in the starting position can be expected over time. However, for short-term scenarios (e.g. sudden obstacles on the road) design-technical measures cannot provide support. For these short-term scenarios traffic and information technology measures are suitable because they can offer certain degree of flexibility regarding a dynamic starting situation.

For the commuter driver only information technology measures such as V2V or V2I communication are usually suitable. By these measures, short-term to medium-term changes in traffic situations could be transmitted to the vehicle on the one hand and on the other hand a redundancy in the transmission of information could be thus established.

For the motorway driver additional measures can be considered at the level of the traffic infrastructure,

Autobahnchauffeur		Pendlerchauffeur	
Szenario	Maßnahme	Szenario	Maßnahme
A1: Hindernis im eigenen Fahrstreifen	Nutzung vorhandener Videodetektionssysteme zur automatischen Erkennung von Hindernissen	P1: Einbahnige Straße mit verdichteten oder fehlenden Leitlinien	Regelmäßige Streckenkontrolle, ggf. Erneuern fehlender Fahrbahnmarkierung
	Kommunikation der Gefahrenstellen über WVZ		Lückenlose Einrichtung weiterer optischer Leiteinrichtungen (Leitpfosten/Schutzplanken ...)
	Kommunikation der Gefahrenstellen über V2I bzw. V2V		Kommunikation der Fahrbahnmarkierung per V2I (elektronisch/elektromagnetisch/funkbasiert ...)
	Bereitstellung der Position eines Hindernisses in Datenbank bzw. digitaler Karte		Übertragung der Beschilderung (Überholverbot/Tempolimits ...) per V2I an Fahrzeug (Sendeeinheit an Verkehrszeichen)
A2a: Fehlender Seitenstreifen	Einrichtung von Seitenstreifen bei Neu- und Ausbaumaßnahmen an Autobahnabschnitten	P2: Mischverkehr mit hohen Geschwindigkeitsdifferenzen	Verortung der Informationen von Verkehrszeichen in digitaler Karte
	Einrichtung von Nothaltebuchten in regelmäßigen Abständen		Trennung von motorisiertem und nicht-motorisiertem Verkehr durch generelle Einrichtung straßenbegleitender Geh- und Radwege
	Rechtzeitige Ankündigung des endenden Seitenstreifens durch Verkehrszeichen		Tempolimit auf Straßen mit hohem Mischverkehrsaufkommen
	Ausschilderung der Nothaltebuchten rechtzeitig vor endendem Seitenstreifen		Kennzeichnung der Strecken mit bzw. ohne getrennten Geh- und Radwegen in digitaler Karte
	Redundante Auslegung der ortsfesten Verkehrszeichen über V2I-Kommunikation		Gegenseitige Information vernetzter Fahrzeuge (V2V) über langsame Verkehrsteilnehmer (ggf. mit straßenseitiger Zwischenspeicherung via V2I)
	Markierung der Streckenabschnitte mit/ohne Seitenstreifen und Nothaltebuchten in digitaler Karte (fahrstreifenfeine Karte)		Sicherstellung vorhandener und korrekter Fahrbahnmarkierungen und Verkehrszeichen
A2b: Temp. Seitenstreifenfreigabe (TSF)	Einrichtung von Nothaltebuchten in regelmäßigen Abständen	P3: Überholvorgang auf einbahniger Straße	Einführung eines Überholverbots für automatisierte Fahrzeuge (durch eigenes Verkehrszeichen/codierte Fahrbahnmarkierung ...)
	Einheitlich beidseitige Aufstellung der Verkehrszeichen		Verortung der Streckenabschnitte mit bzw. ohne Überholverbot in digitaler Karte
	Rechtzeitige Vorankündigung, wenn folgender Streckenabschnitt für TSF eingerichtet		Rechtzeitige Herabsetzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit
	Angabe der Entfernung bis zur nächsten Nothaltebucht	P4: Baustelle auf einbahniger Straße	Frühzeitige und eindeutige Ankündigung der veränderten Verkehrsführung (min. 1.000 m)
	Ankündigung der TSF in bestimmtem Abstand vor Beginn der Maßnahme (ausreichende Reaktionszeit)		Einrichtung temporärer Leiteinrichtungen für Benutzung der Gegenfahrbahn
	Redundante Auslegung der ankündigenden Verkehrszeichen (falls TSF aktiv) über V2I		Abdecken/Drehen von Verkehrszeichen mit widersprüchlichen Weisungen
	Verortung relevanter Informationen zur TSF in digitaler Karte (Ausstattung mit TSF, Aktivität der Maßnahme)		Generell Einrichtung einer LSA zur Sicherung der einspurigen Verkehrsführung anstreben
A3: Arbeitsstelle auf Richtungsfahrbahn	Beidseitige Anordnung aller Verkehrszeichen	P4: Baustelle auf einbahniger Straße	Redundante Auslegung der ankündigenden Verkehrszeichen und Kommunikation der Signalbildwechselzeiten einer LSA via V2I
	Vergrößerung des gemäß RSA vorgesehenen Abstands zwischen Vorankündigung und Arbeitsstelle		Kommunikation mit Baken zur Führung durch Baustellenbereich
	Kennzeichnung der exakten Lage von Beginn und Ende einer Arbeitsstelle durch eigenes (maschinenlesbares) Verkehrszeichen		Einrichtung und laufende Aktualisierung eines Baustelleninformationssystems (Arbeitsstellenposition, Verkehrsführung ...)
	Kommunikation der Arbeitsstellen (Position, Fahrstreifenreduzierung) via V2I bzw. V2V		Versorgung des Informationssystems z. B. durch Ortungs- und Kommunikationseinheit in LSA oder Sicherungsfahrzeug
	Einrichtung und laufende Aktualisierung eines Baustelleninformationssystems (Arbeitsstellenposition, Verkehrsführung ...)		

Tab. 1: Scenarios and measures for the motorway and commuter driver

by using the already installed technique (e.g. traffic control systems or camera detection).

A key measure that can support automated driving in most scenarios is the use of high-accuracy, layered digital reference maps. Those can be used to represent long-term situations as well as medium and short-term changes in the traffic situation. The basic requirement for such a reference map is in particular its availability, timeliness and quality of the temporary information. That means that events can be located on the map as soon as they occur and that an automated vehicle can receive and process this information without delay.

The evaluation of the infrastructure measures was supported by another workshop with participants from industry and administration. The considered measures were assessed regarding the following levels and criteria:

- Necessity
  - Necessary (mandatory),
  - Supportive,
  - Not necessary.
- Effectiveness
  - High,
  - Medium,
  - Low.
- Technical feasibility
  - Technology available,
  - Technology under development,
  - Technology not available.
- Organizational feasibility
  - Structure available,
  - Structure must be created,
  - Structure cannot be created.
- Temporal feasibility
  - Short-term,
  - Medium-term,
  - Long-term.
- Expense/cost
  - Low,

- Medium,
- High.

The evaluation of the developed measures for the motorway driver scenarios shows the complexity and the variety of this topic. It also shows that deriving suitable measures to support automated driving is not trivial. The evaluation of the different measures in the selected scenarios is always based on the existing or developing technology.

The considered measures in the field of design-technical or road-building infrastructure are considered as necessary and are assessed with a high or medium effectiveness. Even if there is a technical and organizational framework for the implementation, these measures are always associated with a high financial and temporal effort.

Measures regarding the traffic infrastructure are mostly assessed as supportive, sometimes also as necessary. The effectiveness is usually assessed as medium. Only the consistent two-sided installation of traffic signs is assessed as a traffic engineering measure with a high effectiveness, e.g. at static sites and roadworks. Other possible measures regarding the traffic infrastructure like for example an improved signage of emergency refuge area or improved identification and location of work sites show medium effectiveness. For such measures the technologies and organisations are available to enable a fast implementation with a low or medium financial effort.

The traffic engineering measures developed for the motorway driver are usually considered or rather used as redundant measures. This is of crucial importance for automated driving since the presence of redundant information for an event or a structural or operational condition generates added value for automated vehicles.

The various measures of the information technology infrastructure are evaluated mainly as mandatory for automated driving since these measures usually communicate a second or a redundant information for an event or a local feature. The effectiveness of the measures is usually high. The techniques are mostly available or under development.

The organizational structures do not exist or have yet to be created to implement the measures of the information technology infrastructure. Above all, a consistent digital map base should be mentioned in

this context. If, in addition to static information (location of traffic signs or special features of the design/construction infrastructure), dynamic (e.g. traffic accidents or roadworks) or highly dynamic (e.g. end of congestion) information is to be communicated, the appropriate framework conditions, standards and quality criteria must be created by the road construction authorities and the automotive industry.

This also means that a temporal implementation can only be achieved in the medium term. The bilateral (on the infrastructure as well as on the vehicle side) functional protection of the measures is essential for a functioning and regulated coexistence of vehicle and road in an automated environment.

As expected, the design-technical and road infrastructure measures are also considered as mandatory with a high or medium effectiveness for the selected scenarios for the commuter driver. The technical and organizational framework conditions for implementing the measures are basically available. Due to the long planning and construction times are all design-technical or rather road-building measures also for the rural roads associated with a high expenditure of time and money.

In contrast, most of the traffic engineering measures are assessed as necessary or supportive for automated driving. The effectiveness is usually considered as high, sometimes even as medium. For the implementation of many of the traffic engineering measures basically all technical and organizational frameworks are available. However, on single lane roads must be considered that a continuous power supply is not always given compared to motorways. This results in a longer-term implementation with low or even medium expenses. This applies to the considered measures for scenario P4 (work site on a single-lane road).

Traffic engineering measures which ensure compliance and maintenance of quality standards (e.g. of the road or traffic signs) are also seen as a priority. However, there are still many fundamental questions regarding the concrete structure, which need to be clarified. A final assessment within the scope of the present project is therefore not possible.

Also, the traffic engineering measures developed for the commuter driver are often considered or

used as redundant measures. For automated driving this is of crucial importance, because due to the presence of redundant information for an event or a structural or operational condition, significant advantages for automated driving occur.

Information-technology infrastructure measures for the commuter driver are assessed partly as being supportive and partly as necessary for automated driving. The effectiveness of the measures is also evaluated differently. The techniques for the implementation of the measures are usually available or under development.

The organizational structures for the commuter driver also do not exist or have to be created in order to implement the measures. A consistent high-precision layered digital reference map is also for the commuter driver functionality the basis for many measures.

## 4 Conclusions for practical implementation

In general, a successful integration of automated driving into the existing mobility system is only possible if the existing road infrastructure combined with a temporal and financial manageable further development can be used.

To avoid isolated solutions of individual countries, it is desirable to standardize messages distributed via V2I and V2V. Therefore, there are already some efforts to reach this, however this must be pursued Europe-wide and worldwide. This also benefits non-automated vehicles if the driver can be warned by this information and more information can be offered to the driver.

Further research is needed regarding machine readability of traffic signs and especially road markings. In this context it is not clear yet how such signs should be designed, where they can be attached and under which boundary conditions (weather, speed) they can be recognized. Therefore, a clear research need can be derived here. Furthermore, there is a need for additional research concerning delineators regarding the problem of locating the automated vehicle using modified delineators, e.g. in the case of non-visible road markings.

There is also a need for research regarding the implementation of a digital map with consistent, correct, and reliable map data. A unified process must be developed to ensure the quality of content enrichment of a digital map for use in automated driving. Only then can the functional reliability be guaranteed. It is currently unclear how the aspirations regarding the introduction of the navigation data standard also consider the requirements or rather data of the road construction authorities. In this context, not only the data available should be considered, but also the resulting interactions for collective traffic control.

For the execution of regularly road inspection, which are subject to a systematic and continuous quality management, that has yet to be defined, it is conceivable that vehicles are equipped with modern and efficient environment sensors. This enables automated recording and evaluation of the condition of the traffic infrastructure. How this road inspection can be executed, and which data can be reliably measured and evaluated automatically has not yet been researched. There is a need for research here. In this context, it should be examined to what extent, if appropriate, the information from the sensors of automated vehicles can be used for this purpose and if they can be made useful for the road construction authorities.

Furthermore, it became clear in the project that the “performance” of the different sensors for the detection of the surroundings often has different perspectives. Clear statements made by the automotive industry or by the suppliers regarding the performance and reliability of the used sensors could only be to some extent determined in this project. Further research or clarification is therefore required.

## Abbreviations

bitkom	Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien (Federal Association for Information Technology, Telecommunications and New Media)
V2I	Vehicle to infrastructure
V2V	Vehicle to vehicle
VDA	Verband der Automobilindustrie (Association of the Automotive Industry)

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Problemstellung und Zielsetzung</b> . . .	13	3.8	Leistungsfähigkeit der Umfeldwahrnehmung und Kontextmodellierung von automatisierten Fahrzeugen . . . .	45
<b>2</b>	<b>Methodisches Vorgehen</b> . . . . .	13	3.8.1	Umfeldsensorik . . . . .	46
<b>3</b>	<b>Stand der Wissenschaft und Technik</b> . . . . .	14	3.8.2	Kontextmodellierung . . . . .	47
3.1	Straßeninfrastruktur . . . . .	14	3.9	Zwischenfazit: Stand der Technik Automatisiertes Fahren . . . . .	48
3.1.1	Einleitung . . . . .	14	3.10	Künftige Fahrfunktionen . . . . .	49
3.1.2	Straßenkategorien und Entwurfsklassen . . . . .	15	3.10.1	Autobahnchauffeur . . . . .	49
3.1.3	Straßenbauliche/ Entwurfstechnische Infrastruktur . . . . .	17	3.10.2	Pendlerchauffeur . . . . .	49
3.1.4	Verkehrstechnische Infrastruktur . . . . .	22	3.10.3	Systeme mit SAE-Level 4 . . . . .	49
3.1.5	Informationstechnische Infrastruktur . . . . .	32	3.11	Ausgewählte Forschungsprojekte und Aktivitäten mit Bezug zum automatisierten Fahren . . . . .	50
3.2	Streckenwartung und Streckenkontrolle . . . . .	35	3.11.1	PEGASUS . . . . .	50
3.3	Verkehrsschauen . . . . .	36	3.11.2	Ko-HAF . . . . .	50
3.4	Arbeitsstellen . . . . .	37	3.11.3	Digitales Testfeld Autobahn . . . . .	50
3.5	Zwischenfazit . . . . .	38	3.11.4	Mobilitätskonzept Niedersachsen . . . . .	50
3.6	Technologie für automatisiertes Fahren . . . . .	38	3.11.5	Cooperative ITS Corridor . . . . .	51
3.6.1	Einleitung . . . . .	38	3.12	Zusammenfassung . . . . .	51
3.6.2	Automatisierungsgrade . . . . .	39	<b>4</b>	<b>Herausforderungen beim automatisierten Fahren auf Autobahnen und Landstraßen</b> . . . .	53
3.6.3	Definition des sicheren Zustandes . . . . .	40	4.1	Einleitung . . . . .	53
3.6.4	Funktionale Systemarchitektur für automatisierte Fahrzeuge . . . . .	41	4.2	Erhöhung des Automatisierungsgrades . . . . .	53
3.6.5	Planung und Regelung . . . . .	42	4.2.1	Übergang von SAE Level 2 auf SAE Level 3 . . . . .	54
3.6.6	Umfeld- und Selbstwahrnehmung . . . . .	42	4.2.2	Übergang von SAE Level 3 auf SAE Level 4 . . . . .	54
3.6.7	Lokalisierung und Karten . . . . .	43	4.2.3	Fazit . . . . .	54
3.6.8	Fahrzeug-zu-X-Kommunikation . . . . .	43	4.3	Standardszenarien . . . . .	55
3.6.9	Mensch-Maschine-Schnittstelle . . . . .	43	4.3.1	Standardszenario: Autobahnchauffeur . . . . .	55
3.7	Überblick über die Leistungsfähigkeit automatisierter Fahrzeuge als Gesamtsystem . . . . .	43	4.3.2	Standardszenario: Pendlerchauffeur . . . . .	55
3.7.1	Infrastrukturbasierte Ansätze . . . . .	44	4.3.3	Herausforderungen durch die Standardszenarien . . . . .	56
3.7.2	Bordautonome Ansätze . . . . .	44			
3.7.3	Kartenbasierte Ansätze . . . . .	44			

4.4	Szenarien für Fahrfunktionen mit besonderen Herausforderungen . . . . .	56	6.3.3	Szenario A2b: Temporäre Seitenstreifenfreigabe . . . . .	77
4.4.1	Herausforderungen . . . . .	57	6.3.4	Szenario A3: Arbeitsstelle kurzer Dauer auf Richtungsfahrbahn . . . . .	77
4.4.2	Szenarien für den Autobahnchauffeur . . . . .	59	6.3.5	Zusammenfassung Autobahnchauffeur . . . . .	79
4.4.3	Szenarien für den Pendlerchauffeur. . .	61	6.4	Ergebnisse Pendlerchauffeur . . . . .	80
4.5	Fazit . . . . .	62	6.4.1	Szenario P1: Einbahnige Straße mit verdeckten oder fehlenden Fahrbahnmarkierungen . . . . .	80
<b>5</b>	<b>Infrastrukturmaßnahmen zur Förderung/Unterstützung automatisierten Fahrens . . . . .</b>	<b>63</b>	6.4.2	Szenario P2: Mischverkehr mit hohen Geschwindigkeitsdifferenzen. . .	82
5.1	Einleitung . . . . .	63	6.4.3	Szenario P3: Überholvorgang auf einbahniger Straße. . . . .	83
5.2	Infrastrukturmaßnahmen für den Autobahnchauffeur . . . . .	63	6.4.4	Szenario P4: Arbeitsstelle auf einbahniger Straße. . . . .	84
5.2.1	Szenario A1: Hindernis im eigenen Fahrstreifen . . . . .	63	6.4.5	Zusammenfassung Pendlerchauffeur . . . . .	85
5.2.2	Szenario A2a: Fehlender Seitenstreifen . . . . .	64	<b>7</b>	<b>Zusammenfassung. . . . .</b>	<b>86</b>
5.2.3	Szenario A2b: Temporäre Seitenstreifenfreigabe . . . . .	66	7.1	Ausgangslage und Aufgabenstellung. . . . .	86
5.3	Infrastrukturmaßnahmen für den Pendlerchauffeur . . . . .	68	7.2	Bewertung der Infrastrukturmaßnahmen . . . . .	87
5.3.1	Szenario P1: Fahrt auf einbahniger Landstraße mit fehlenden oder verdeckten Fahrbahnmarkierungen . . .	68	7.3	Fazit . . . . .	88
5.3.2	Szenario P2: Mischverkehr mit hohen Geschwindigkeitsdifferenzen. . .	69	7.4	Forschungsbedarf . . . . .	90
5.3.3	Szenario P3: Überholvorgang auf einbahniger Straße. . . . .	69	<b>Literatur. . . . .</b>	<b>91</b>	
5.3.4	Szenario P4: Arbeitsstelle auf einbahniger Straße. . . . .	70	<b>Bilder . . . . .</b>	<b>96</b>	
5.4	Fazit . . . . .	71	<b>Tabellen . . . . .</b>	<b>96</b>	
<b>6</b>	<b>Bewertung der Infrastrukturmaßnahmen . . . . .</b>	<b>72</b>			
6.1	Einleitung . . . . .	72			
6.2	Methodik. . . . .	72			
6.3	Ergebnisse Autobahnchauffeur . . . . .	73			
6.3.1	Szenario A1: Hindernis im eigenen Fahrstreifen . . . . .	73			
6.3.2	Szenario A2a: Fehlender Seitenstreifen . . . . .	75			

## 1 Problemstellung und Zielsetzung

Schon heute sind in vielen Neufahrzeugen Assistentenfunktionen zu finden, welche den Fahrer bei der Durchführung der Fahraufgabe unterstützen. Eine Vielzahl von aktuellen Forschungsvorhaben beschäftigt sich in diesem Zusammenhang mit hochautomatisierten oder auch vollautomatisierten Fahrzeugen, die künftig vermehrt am Straßenverkehr teilnehmen werden.

Dabei darf automatisiertes Fahren zu keinen Einbußen bei der Sicherheit oder der Effizienz des Straßenverkehrs führen. Die Anforderungen an die Zuverlässigkeit und die Verkehrssicherheit automatisierter Fahrzeuge sind besonders hoch, da mit fehlenden Einflussmöglichkeiten durch den Fahrer bzw. Fahrgast die Verantwortung vollständig auf das Fahrzeug verlagert wird. Vielmehr bietet die Automatisierung von Fahrzeugen das Potenzial, die Sicherheit und Effizienz zu erhöhen.

Unter der Federführung des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur wird in diesem Zusammenhang aktuell auf der Autobahn A 9 das Digitale Testfeld Autobahn eingerichtet. Zusammen mit dem Land Bayern und den Verbänden VDA und Bitkom soll hier ein technologieoffenes Angebot für Industrie und Forschung geschaffen werden, um künftige Schlüsseltechnologien für das hochautomatisierte und vollautomatisierte Fahren erproben, bewerten und weiterentwickeln zu können.

Grundsätzlich ist jedoch davon auszugehen, dass automatisiertes Fahren künftig zum Großteil auf der vorhandenen Infrastruktur zusammen mit nicht-automatisierten Fahrzeugen erfolgen wird. Vor diesem Hintergrund stellt sich dann die Frage, ob mit der Verbreitung automatisierten Fahrens auch besondere Anforderungen an die Infrastruktur entstehen bzw. wie die Infrastruktur ggf. weiterentwickelt werden sollte. In diesem Zusammenhang ist auch zu klären, mit welchen Maßnahmen die Infrastrukturbetreiber (Bund, Länder und Kommunen) ggf. diesen neuen Anforderungen begegnen müssen.

Das übergeordnete Ziel des vorliegenden Grundlagenprojektes ist daher die Beantwortung der Frage, welche Infrastrukturmaßnahmen (straßenbaulich, verkehrs- und informationstechnisch) für die verschiedenen Level des automatisierten Fahrens erforderlich sind. Das Projekt fokussiert hierbei auf die Fahrt auf der Autobahn und der Landstraße.

Das automatisierte Fahren im komplexen Stadtverkehr mit einer Vielzahl von anderen, zum Großteil nicht-motorisierten Verkehrsteilnehmern wird nicht betrachtet. Neben einem Standardszenario für die Fahrt auf der Autobahn (Autobahnchauffeur) und der Landstraße (Pendlerchauffeur) werden auch ausgewählte Szenarien mit größeren Herausforderungen an die Fahraufgabe betrachtet, welche dann ggf. auch erhöhte Anforderungen an die Infrastruktur stellen.

## 2 Methodisches Vorgehen

Der Bau und Betrieb der Straßenverkehrsinfrastruktur orientiert sich an einem umfassenden Regelwerk, in dem Grundlagen und Standards festgelegt bzw. definiert werden. Diese Regelungen sind häufig abhängig von der Funktion der Straße. Als Einstieg in das Projekt werden die hier maßgebenden Regelungen zusammenfassend dargestellt (vgl. Kapitel 3). Für die Ableitung eines möglichen Infrastrukturbedarfs aufgrund künftiger automatisierter Fahrfunktionen ist auch die Kenntnis bzw. Definition der verschiedenen Automatisierungsgrade von entscheidender Bedeutung. Zusammen mit der Terminologie zum automatisierten Fahren werden auch diese Grundlagen zusammenfassend dargestellt.

Aufbauend auf diesen Grundlagen werden in Kapitel 4 und 5 zunächst die bzgl. des automatisierten Fahrens auftretenden Herausforderungen für ein Standardszenario Autobahn (Autobahnchauffeur) und Landstraße (Pendlerchauffeur) erarbeitet. Weiterhin werden Szenarien mit besonderen Herausforderungen an den Fahrer bzw. das automatisiert fahrende Fahrzeug entwickelt. Die Entwicklung der Fahrszenarien erfolgte u. a. im Rahmen eines Workshops, an dem neben Vertretern der Straßenbauverwaltung (Infrastrukturbetreiber) auch Vertreter der Automobil- und Zulieferindustrie teilgenommen haben.

Für die verschiedenen Fahrsituationen bzw. Fahrszenarien wurden anschließend Infrastrukturmaßnahmen abgeleitet, welche zur Unterstützung des automatisierten Fahrens denkbar sind (vgl. Kapitel 5). Die Bewertung der Infrastrukturmaßnahmen wurde wiederum durch die gemeinsame Arbeit in einem Workshop unterstützt. Bewertet wurden hierbei die Aspekte Notwendigkeit, Wirksamkeit, technische, organisatorische und zeitliche Realisierbar-

keit sowie der entstehende Aufwand für die betrachteten Infrastrukturmaßnahmen (vgl. Kapitel 6).

Aufbauend auf dem Ergebnis der Bewertung werden abschließend Empfehlungen erarbeitet. Hierfür werden wesentliche Anforderungen und Entwicklungspfade aufgezeigt (vgl. Kapitel 7).

### 3 Stand der Wissenschaft und Technik

#### 3.1 Straßeninfrastruktur

##### 3.1.1 Einleitung

Die heute existierende Straßeninfrastruktur wurde entsprechend der Anforderungen von menschlichen Verkehrsteilnehmern gestaltet. Die Straßengeometrie und damit einhergehende fahrdynamische Eigenschaften und Sichtfelder, die Gestaltung von Verkehrsleiteinrichtungen sowie die Straßenverkehrsordnung orientieren sich an den Möglichkeiten eines vom Menschen gesteuerten Fahrzeugs. Inwieweit sich die Anforderungen an die Straßeninfrastruktur durch automatisiertes Fahren ändern und wie Infrastruktur auf Basis solcher veränderter Anforderungen gestaltet werden sollte, ist bisher nicht im Detail untersucht.

Im Bericht des Runden Tisches Automatisiertes Fahren (BMVI, 2015) wird die Straßeninfrastruktur bzw. das Straßenumfeld im Zusammenhang mit der

Einführung des automatisierten Fahrens in die straßenbauliche/entwurfstechnische, die verkehrstechnische und die informationstechnische Infrastruktur differenziert (vgl. Bild 3-1).

Die straßenbauliche bzw. entwurfstechnische Infrastruktur umfasst die Straße als Bauwerk. Zur verkehrstechnischen Infrastruktur zählen alle Einrichtungen, die über Verbote, Gebote sowie Informationen Auswirkungen auf das Verkehrsgeschehen haben und welche die dazu erforderlichen Voraussetzungen beispielsweise zur Datenaufbereitung erbringen. Die informationstechnische Infrastruktur beinhaltet die für das automatisierte Fahren bereitgestellten Daten sowie alle Einrichtungen zur Erzeugung und Pflege dieser Daten, zur Datenübertragung und Kommunikation. Zusätzlich werden im Bericht weitere äußere Einflüsse wie das Wetter thematisiert.

Im Rahmen des Projektes wurde die vom Runden Tisch Automatisiertes Fahren (BMVI, 2015) vorgenommene Differenzierung der Straßeninfrastruktur grundsätzlich übernommen. Mögliche zugehörige Aspekte werden im Folgenden dargestellt. Im weiteren Verlauf der Bearbeitung sollte dann in Abstimmung mit dem projektbegleitenden Betreuerkreis diskutiert werden, welche Aspekte bzgl. des automatisierten Fahrens betrachtet oder ausgeschlossen werden sollten.

Als Einstieg in die Thematik wird vorab kurz die für die Straßeninfrastruktur in Deutschland geltende funktionale Gliederung der Verkehrsnetze für den Straßenverkehr und die sich hieraus ergebenden

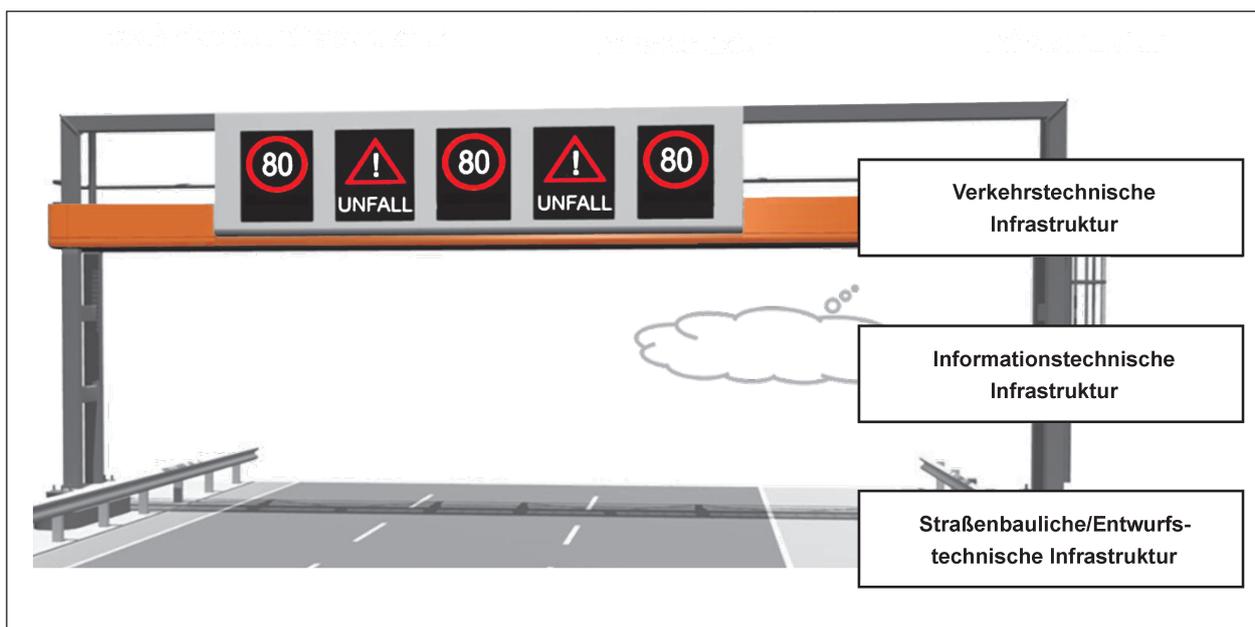


Bild 3-1: Differenzierung der Straßeninfrastruktur in Anlehnung an den Runden Tisch Automatisiertes Fahren (BMVI, 2015)

Straßenkategorien und Entwurfsklassen zusammenfassend dargestellt. Für das Verständnis der im Folgenden beschriebenen maßgebenden Regelungen für den Neu-, Um- und Ausbau von Straßen ist dies erforderlich.

Anschließend werden die Aspekte Betrieb und Unterhaltung von Straßen und Verkehrsschauen betrachtet. Dies ist erforderlich, da Straßen und auch die Straßenausstattung nach der Inbetriebnahme in einem verkehrssicheren und technisch einwandfreien Zustand bleiben müssen.

Abschließend wird der Aspekt Arbeitsstellen näher betrachtet. Für diesen grundsätzlich temporären Zustand sind besondere Regelungen erforderlich, um während der Bauzeit einen sicheren und leistungsfähigen Verkehrsablauf vor, in und nach der eigentlichen Arbeitsstelle zu erreichen.

### 3.1.2 Straßenkategorien und Entwurfsklassen

Die „Richtlinien für integrierte Netzgestaltung“ (FGSV, 2008d) greifen die Ziele der Raumordnung und Landesplanung für die Erreichbarkeit der zentralen Orte auf und leiten die funktionale Gliederung der Verkehrsnetze in Deutschland aus der zentralörtlichen Bedeutung ab. Dadurch werden auf der Ebene der konzeptionellen Verkehrsnetzgestaltung die Zielvorgaben für die Entwicklung der Verkehrssysteme auf einem einheitlichen raumordnerischen Ansatz aufgebaut und eine aufeinander abgestimmte Verkehrsnetzentwicklung erreicht. Innerhalb der funktionalen Gliederung der Verkehrsnetze wird jedem Netzelement eines Verkehrsweges eine Kategorie zugewiesen. Diese ergibt sich aus der Bedeutung der Verbindungen, die über dieses Netzelement verlaufen, und der Höhe der Ansprüche aus dem verkehrswegeseitigen Umfeld.

Im Bereich Straße bildet die funktionale Gliederung der Richtlinien für integrierte Netzgestaltung (RIN) die Grundlage für den Entwurf und den Betrieb von Straßen, die entsprechend den jeweils gültigen Regelwerken der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) zu gestalten sind (vgl. Bild 3-2).

In den RIN werden für die Verkehrswege für den Kraftfahrzeugverkehr grundsätzlich fünf Kategoriengruppen definiert (vgl. Bild 3-3).

Die Kategoriengruppe AS (Autobahnen) umfasst anbaufreie, zweibahnige Straßen mit planfreien und

teilplanfreien Knotenpunkten außerhalb, im Vorfeld und innerhalb bebauter Gebiete, die ausschließlich vom schnellen Kraftfahrzeugverkehr befahren werden dürfen. Eine Zufahrt ist nur über spezielle Anschlussstellen möglich. Es handelt sich im Wesentlichen um mit Zeichen 330 StVO (Autobahn) beschilderte Straßen. Dazu zählen aber auch mit Zeichen 331 StVO (Kraftfahrstraße) beschilderte zweibahnige, planfrei geführte autobahnähnliche Straßen mit in der Regel gelber – bei Stadtautobahnen auch weißer – Wegweisung. Nur bei Stadtautobahnen ist die zulässige Höchstgeschwindigkeit auf 80 km/h oder 100 km/h beschränkt. Hinsichtlich der straßenrechtlichen Widmung handelt es sich in der Regel um Bundesfern- oder Landesstraßen.

Hinweise zum Entwurf und Bau von Autobahnen finden sich in den Richtlinien für die Anlage von Autobahnen der FGSV (2008c). Die Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA) enthalten Planungsgrundsätze (Methoden, Entwurfselemente und Ausstattungsmerkmale) für den Neubau und für den Um- und Ausbau (vgl. Kapitel 3.1.3).

Die Kategoriengruppe LS (Landstraßen) umfasst anbaufreie, einbahnige Straßen außerhalb bebauter Gebiete. Hierzu zählen auch kurze zweibahnige Abschnitte im Zuge ansonsten einbahniger Straßen. Die Verknüpfung mit Straßen der gleichen Kategoriengruppe erfolgt im Allgemeinen durch plangleiche oder planfreie Knotenpunkte. Die Straßen sind überwiegend für den allgemeinen Verkehr bestimmt, in besonderen Fällen können sie mit Zeichen 331 StVO als Kraftfahrstraßen ausgewiesen sein. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit ist in der Regel auf 100 km/h oder weniger beschränkt. Hinsichtlich der straßenrechtlichen Widmung kann es sich um Bundes-, Landes-, Kreis- oder Gemeindestraßen handeln.

In den Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL) (FGSV, 2012b) sind die Grundsätze, Entwurfselemente und Ausstattungsmerkmale für den Neubau sowie für den Um- und Ausbau von Landstraßen geregelt. Landstraßen im Sinne der RAL sind dabei anbaufreie einbahnige Straßen mit plangleichen oder planfreien Knotenpunkten außerhalb bebauter Gebiete. Auch kurze (bis ca. 15 km Länge) anbaufreie zweibahnige Streckenabschnitte im Zuge solcher Straßen gelten als Landstraßen. Längere zweibahnige Abschnitte werden gemäß den RAA (FGSV, 2008c) geplant.

Stadtstraßen werden nach den RIN in drei Kategoriengruppen differenziert. Die Kategoriengruppe VS

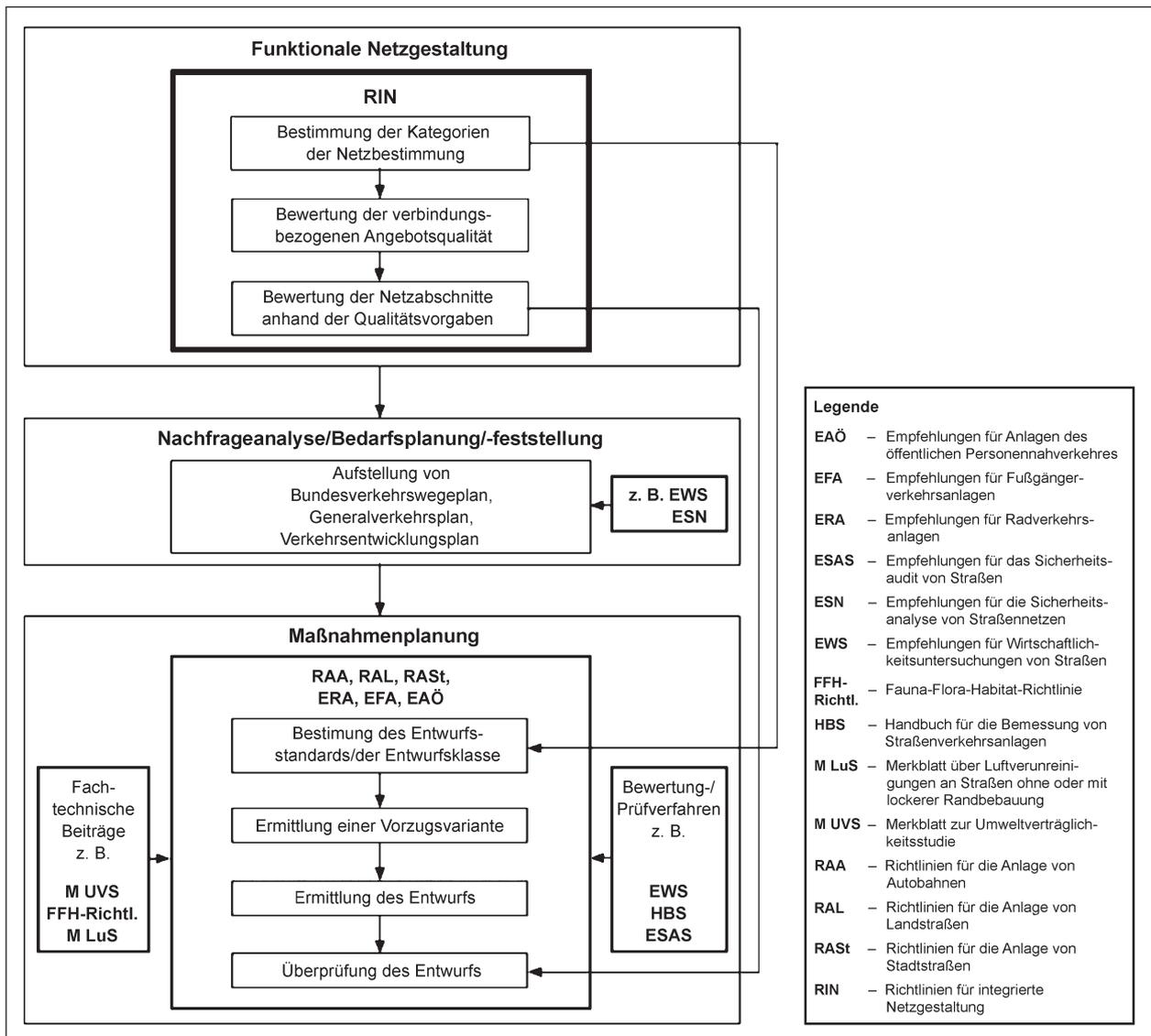


Bild 3-2: Einordnung der RIN in das Regelwerk für den Entwurf und Betrieb von Straßen (FGSV, 2008d)

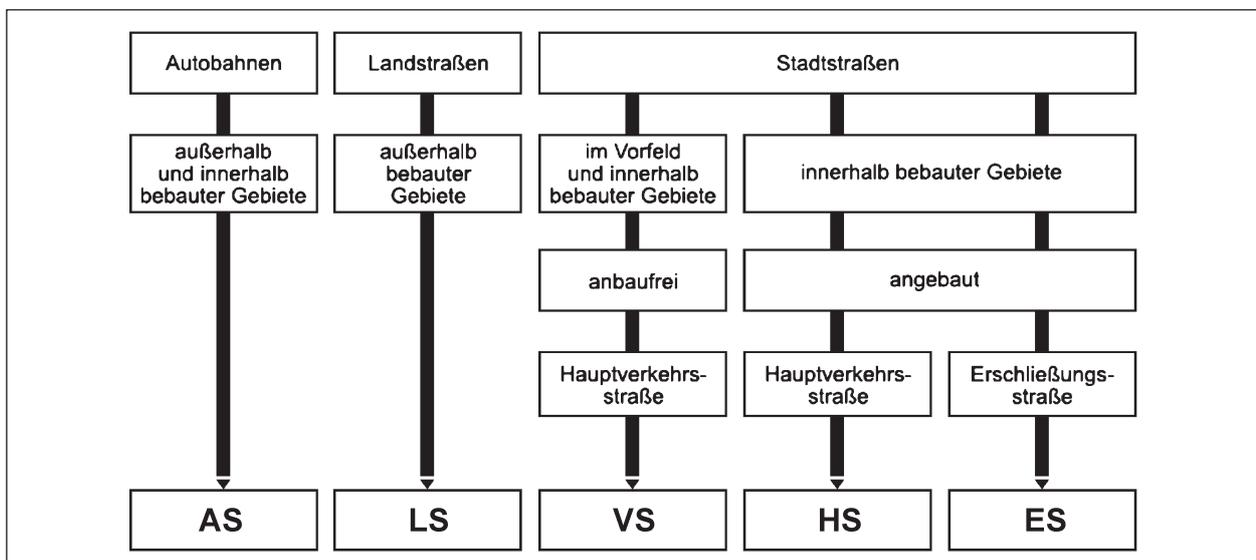


Bild 3-3: Kategoriengruppen der Verkehrswege für den Kraftfahrzeugverkehr nach den RIN (FGSV, 2008d)

(anbaufreie Hauptverkehrsstraßen) umfasst anbaufreie Straßen im Vorfeld oder innerhalb bebauter Gebiete. Diese Straßen übernehmen im Wesentlichen Verbindungsfunktionen. Im Vorfeld bebauter Gebiete handelt es sich um die Fortsetzung der Straßen der Kategoriengruppe LS (Landstraßen) bei der Annäherung an größere zusammenhängende Gebiete. Die Straßen sind einbahnig oder zweibahnig, die Verknüpfung mit dem übrigen Straßennetz erfolgt überwiegend durch plangleiche Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage oder Kreisverkehren. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit beträgt im Vorfeld bebauter Gebiete in der Regel 70 km/h und innerhalb bebauter Gebiete in der Regel 50 km/h. Hinsichtlich der straßenrechtlichen Widmung kann es sich um Bundes-, Landes-, Kreis- oder Gemeindestraßen handeln.

Die Kategoriengruppe HS (angebaute Hauptverkehrsstraßen) umfasst angebaute Straßen innerhalb bebauter Gebiete, die im Wesentlichen der Verbindung dienen bzw. den Verkehr aus den Erschließungsstraßen sammeln. Sie übernehmen in der Regel auch die Linien des öffentlichen Personenverkehrs. Aufgrund der angrenzenden baulichen Nutzungen sind die Straßen häufig auch durch Flächen des ruhenden Verkehrs geprägt. Die Straßen sind einbahnig oder zweibahnig ausgebildet. Die Verknüpfung mit Straßen der gleichen Kategoriengruppe erfolgt im Allgemeinen durch plangleiche Knotenpunkte mit Lichtsignalanlage oder Kreisverkehren. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit beträgt in der Regel 50 km/h. Hinsichtlich der straßenrechtlichen Widmung kann es sich um Bundes-, Landes-, Kreis- oder Gemeindestraßen handeln.

Die Kategoriengruppe ES (Erschließungsstraßen) umfasst angebaute Straßen innerhalb bebauter Gebiete, die im Wesentlichen der unmittelbaren Erschließung der angrenzenden bebauten Grundstücke oder dem Aufenthalt dienen. Die Straßen sind grundsätzlich einbahnig und untereinander mit plangleichen Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage verknüpft. Die Verknüpfung mit Straßen der

Kategoriengruppe HS erfolgt durch plangleiche Knotenpunkte mit oder ohne Lichtsignalanlage oder Kreisverkehren. In besonderen Fällen dienen sie auch dem öffentlichen Personenverkehr; sie nehmen zudem wesentliche Teile des innerörtlichen Radverkehrs auf. Nicht zuletzt deshalb beträgt die zulässige Höchstgeschwindigkeit in vielen Fällen 30 km/h. Hinsichtlich der straßenrechtlichen Widmung handelt es sich in der Regel um Gemeindestraßen.

Der Entwurf und die Gestaltung von Stadtstraßen erfolgt nach den Richtlinien für die Anlage Stadtstraßen (RASt) (FGSV, 2006b). Die RASt behandeln dabei Erschließungsstraßen sowie angebaute und anbaufreie Hauptverkehrsstraßen mit plangleichen Knotenpunkten. Sie gelten damit für die Kategoriengruppen VS, HS und ES der RIN (FGSV, 2008d).

Entsprechend der Aufgabenstellung im Rahmen des Forschungsvorhabens werden Stadtstraßen aller Kategoriengruppen im Folgenden nicht weiter betrachtet. Auf eine weiterführende und vertiefte Darstellung der entwurfstechnischen und verkehrlichen Aspekte von Stadtstraßen wird daher verzichtet.

### 3.1.3 Straßenbauliche/Entwurfstechnische Infrastruktur

#### Autobahnen

Die Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (FGSV, 2008c) bilden die Grundlage für den Entwurf bzw. den Neu-, Um- und Ausbau von sicher befahrbaren und funktionsgerechten Autobahnen. Ihre Entwurfsgrundsätze orientieren sich an der Netzfunktion nach den RIN. Um die Einheitlichkeit von Autobahnen vergleichbarer Netzfunktion und Verkehrsbelastung zu gewährleisten, werden sie nach Entwurfsklassen für Autobahnen (EKA) unterschieden und entworfen (vgl. Tabelle 3-1).

Straßenkategorie	AS 0/AS I		AS II		
	außerhalb oder innerhalb		außerhalb oder innerhalb	außerhalb	innerhalb
Lage zu bebauten Gebieten	außerhalb oder innerhalb		außerhalb oder innerhalb	außerhalb	innerhalb
Straßenwidmung	BAB	nicht BAB	BAB	nicht BAB	alle
Bezeichnung	Fernautobahn	autobahnähnliche Straße	Überregionalautobahn	autobahnähnliche Straße	Stadtautobahn
Entwurfsklasse	EKA 1 A	EKA 2	EKA 1 B	EKA 2	EKA 3

Tab. 3-1: Entwurfsklassen für Straßen der Kategorie AS (FGSV, 2008c)

Autobahnen der Kategorien AS 0 und AS I außerhalb oder innerhalb bebauter Gebiete (Fernautobahnen) sowie Autobahnen der Kategorie AS II innerhalb oder außerhalb bebauter Gebiete (Überregionalautobahnen) werden nach der EKA 1 entworfen (vgl. Tabelle 3-1).

Um die Verbindungsbedeutung bzw. die Verbindungsfunktionsstufe angemessen berücksichtigen zu können, erfolgt eine Differenzierung in die EKA 1A (AS 0 und I) und die EKA 1B (AS II) (vgl. Tabelle 3-1). Ihnen sind jeweils abgestufte Entwurfselemente für die Linienführung zugeordnet (vgl. Tabelle 3-2).

Zu den autobahnähnlichen Straßen der EKA 2 zählen alle Nicht-Bundesautobahnen, aber nicht die

Stadtautobahnen. Autobahnähnliche Straßen der EKA 2 werden überwiegend für mittlere oder kürzere Verbindungen vorgesehen und unterliegen geringeren Anforderungen an angestrebten Reisegeschwindigkeiten. Die Grenzwerte für die Entwurfselemente sind niedriger als für die EKA 1, was eine flexiblere Trassierung ermöglicht (vgl. Tabelle 3-2).

Stadtautobahnen führen weitgehend durch bebauten, städtisches Gebiet. Sie sind in der Regel Bestandteil des städtischen Hauptstraßennetzes und können als Verbindung vom städtischen Straßennetz zum übergeordneten Fernstraßennetz integriert sein. Sie unterliegen fast immer Restriktionen aus dem Umfeld und werden nach der EKA 3 entworfen (vgl. Tabelle 3-2).

	EKA 1 A	EKA 1 B	EKA 2	EKA 3
<b>Betriebsmerkmale</b>				
Netzfunktion	Fernautobahn	Überregionalautobahn	autobahnähnliche Straße	Stadtautobahn
Beschilderung	Z 330 StVO (Autobahn)		Z 331 StVO (Krafffahrstraße)	Z 330 oder 331 StVO
Wegweisung	blau		gelb	blau, gelb
Zulässige Höchstgeschwindigkeit	keine			$V_{zul} \leq 100 \text{ km/h}$
Empfohlene Knotenpunktabstände [m]	> 8.000	> 5.000	> 5.000	keine
Verkehrsführung in Arbeitsstellen vierstreifiger Straßen	4+0 in der Regel erforderlich		4+0 nicht zwingend erforderlich	
<b>Linienführung im Lageplan</b>				
Höchstlänge der Geraden [m]	2.000			
Kurvenmindestradius [m]	900	720	470	280
Klothoidenmindestparameter [m]	300	240	160	90
Kurvenmindestradius bei Querneigung zur Kurvenaußenseite [m]	5.000			1.050
<b>Linienführung im Höhenplan</b>				
Höchstlängsneigung [%]	4,0	4,5	6,0	
Kuppenmindesthalbmesser [m]	13.000	10.000	5.000	3.000
Wannenmindesthalbmesser [m]	8.800	5.700	4.000	2.600
<b>Sichtweite</b>				
Haltesichtweite ( $s = 0 \%$ ) [m]	250			110
<b>Straßenflächengestaltung</b>				
Mindestquerneigung [%]	2,5			
Höchstquerneigung in Kurven [%]	6,0			
Anrampungshöchstneigung [%]	0,9 ( $a \geq 4,0 \text{ m}$ ) 0,225*a ( $a < 4,0 \text{ m}$ )			0,9 ( $a \geq 4,0 \text{ m}$ ) 0,25*a ( $a < 4,0 \text{ m}$ )
Anrampungsmindestneigung [%]	0,10*a			

Tab. 3-2: Entwurfsklassen, Gestaltungsmerkmale und Zusammenfassung der Betriebs- und Entwurfsmerkmale von Autobahnen (FGSV, 2008c)

Die Straßenkategorie und die Entwurfsklasse legen die Merkmale sowie die Grenz- und Richtwerte für die Entwurfs- und Betriebselemente fest. Tabelle 3-1 zeigt die grundsätzliche Zuordnung von Entwurfsklassen und Gestaltungsmerkmalen.

Um die einheitliche Gestaltung von Autobahnen einer Entwurfsklasse zu erreichen, wird für vier-, sechs- oder achtstreifige Autobahnen jeweils nur ein Regelquerschnitt festgelegt. Der gewählte Regelquerschnitt soll auf zusammenhängenden Netzabschnitten mit gleichbleibender Verbindungsfunktionsstufe durchgängig beibehalten werden.

Alle Regelquerschnitte bestehen aus den Bestandteilen Fahrstreifen, Randstreifen, Mittelstreifen, Seitenstreifen und Bankett. Fahrbahn und Seitenstreifen zusammen bilden die befestigte Fläche. Diese entspricht der Breite des Verkehrsraumes.

Für die verschiedenen Verkehrsführungen in Arbeitsstellen (vgl. (BMVBS, 1995/2002) sind die Breiten der erforderlichen befestigten Fläche ebenfalls in den RAA festgelegt:

- 4+0-Verkehrsführung 12,00 m,
- 5+0-/5+1-Verkehrsführung 14,50 m,
- 6+0-/6+2-Verkehrsführung 17,00 m.

Diese Anforderungen bestimmen die Abmessungen der Regelquerschnitte RQ 31 und RQ 36. Tabelle 3-3 zeigt die Abmessungen der in den RAA (FGSV, 2008c) definierten Regelquerschnitte für die Autobahnen der verschiedenen Entwurfsklassen.

Für Querschnitte auf Brücken und in Tunneln sind in den RAA weitere Regelquerschnitte angegeben. Hier gelten besondere Vorgaben.

In den RAA (FGSV, 2008c) werden in Kapitel 8 zusätzliche Hinweise zu entwurfstechnischen und be-

trieblichen Besonderheiten gegeben. Hierzu zählen:

- die Gestaltung und Ausbildung von Zusatzfahrstreifen im Bereich von Steigungsstrecken,
- die Ausbildung von Fahrstreifenreduktionen bei Wechsel des Regelquerschnittes,
- die Gestaltung von Mittelstreifenüberfahrten zur bauzeitlich bedingten Überleitung des Verkehrs von einer Richtungsfahrbahn auf die andere,
- die Querschnittsgestaltung und die Trassierung von Autobahnen auf Brücken,
- die Querschnittsgestaltung und die Trassierung von Autobahnen in Tunneln,
- die Verkehrsführung in Arbeitsstellen im Zuge des Ausbaus von Autobahnen oder auch Erhaltungsarbeiten sowie
- der Umnutzung von Seitenstreifen zur zeitlich befristeten Kapazitätserhöhung.

Auf eine Darstellung dieser entwurfstechnischen und betrieblichen Besonderheiten wird an dieser Stelle verzichtet. Im Rahmen der betrachteten Szenarien und Infrastrukturmaßnahmen werden ausgewählte Aspekte hier vertiefend betrachtet (vgl. Kapitel 5).

## Landstraßen

Landstraßen sollen von Pkw gleichmäßig mit einer für die jeweilige Netzfunktion angemessenen Geschwindigkeit befahren werden. Dazu werden analog den Autobahnen auch für die Entwurfsklassen der Landstraßen alle die wesentlichen die Geschwindigkeit beeinflussenden Entwurf- und Betriebsmerkmale festgelegt. Dies erfolgt in den Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL) (FGSV, 2012b).

Entwurfsklasse und Regelquerschnitt	Fahrstreifen [m]	Mittelstreifen [m]	Randstreifen [m]	Seitenstreifen [m]	Bankett [m]
EKA 1 – RQ 43,5 (8 Fahrstreifen)	3,75/3,50	4,00	0,75/0,50	2,50	1,50
EKA 1 – RQ 36 (6 Fahrstreifen)	3,75/3,50	4,00	0,75/0,50	2,50	1,50
EKA 1 – RQ 31 (4 Fahrstreifen)	3,75	4,00	0,75	3,00	1,50
EKA 2 – RQ 28 (4 Fahrstreifen)	3,50	4,00	0,50	2,50	1,50
EKA 3 – RQ 38,5 (8 Fahrstreifen)	3,50/3,25	2,50	0,50	2,00	1,50
EKA 3 – RQ 31,5 (6 Fahrstreifen)	3,50/3,25	2,50	0,50	2,00	1,50
EKA 3 – RQ 25 (4 Fahrstreifen)	3,50/3,25	2,50	0,50	2,00	1,50

Tab. 3-3: Breiten der Bestandteile der Regelquerschnitte von Autobahnen (Darstellung nach FGSV, 2008c)

Die RAL gelten für Landstraßen der Kategorie LS I bis LS IV gemäß den RIN. Landstraßen im Sinne der RAL sind anbaufreie einbahnige Straßen mit plangleichen oder planfreien Knotenpunkten außerhalb bebauter Gebiete. Auch kurze anbaufreie zweibahnige Straßenabschnitte im Zuge solcher Straßen gelten als Landstraßen. Längere zweibahnige Abschnitte werden nach den RAA geplant.

Die Festlegungen der RAL verfolgen das Ziel, die Ausbildung von Landstraßen soweit wie möglich zu standardisieren. Dazu werden für Landstraßen vier Entwurfsklassen (EKL) definiert (vgl. Tabelle 3-4).

Dabei sollen sowohl die Einheitlichkeit von Straßen einer Entwurfsklasse als auch der Unterschied von Straßen verschiedener Entwurfsklassen für den Kraftfahrer begreifbar sein. Im Sinne der RAL dient dazu insbesondere die unterschiedliche Ausbildung der für den Verkehrsteilnehmer kontinuierlich erkennbaren Längsmarkierung. Von der Entwurfsklasse werden darüber hinaus unmittelbar bestimmt (vgl. auch Tabelle 3-5):

- die Betriebsform,
- der Regelquerschnitt einschließlich des damit verbundenen Überholprinzips,
- die Elemente der Linienführung,
- die Führungsform des Verkehrs in Knotenpunkten und

Straßenkategorie	Entwurfsklasse
LS I	EKL 1
LS II	EKL 2
LS III	EKL 3
LS IV	EKL 4

Tab. 3-4: Entwurfsklassen für Landstraßen in Abhängigkeit von der Straßenkategorie (FGSV, 2012b)

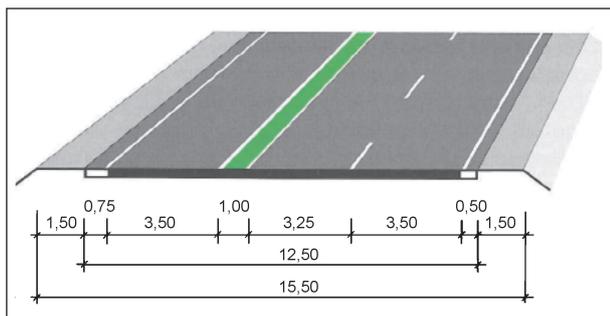


Bild 3-4: Regelquerschnitt RQ 15,5 nach den RAL – Abmessungen in [m] (FGSV, 2012b)

- die weiteren Betriebsmerkmale.

Straßen der Entwurfsklasse EKL 1 sind dreistreifige Straßen mit dem Regelquerschnitt RQ 15,5 (vgl. Bild 3-4). Beide Fahrtrichtungen sind durchgängig durch einen verkehrstechnischen Mittelstreifen voneinander getrennt. Durch den regelmäßigen Wechsel von zwei- und einstreifigen Abschnitten beträgt der Streckenanteil mit verkehrstechnisch gesicherten Überholmöglichkeiten für jede Fahrtrichtung ca. 40 %. Straßen der EKL 1 sollen als Kraftfahrstraßen betrieben werden. Landwirtschaftlicher und nicht motorisierter Verkehr werden dann auf einem gesonderten Wegenetz geführt. Verknüpfungen mit dem gleichrangigen oder nachgeordneten Netz sollen als planfreie oder teilplanfreie Knotenpunkte ausgeführt werden.

Straßen der Entwurfsklasse EKL 2 sind zweistreifige Straßen mit dem Regelquerschnitt RQ 11,5+, bei denen abschnittsweise Überholfahrstreifen für die eine, dann in der Regel für die andere Richtung angelegt werden. Beide Fahrtrichtungen sind in den dreistreifigen Abschnitten immer durch zwei Fahrstreifenbegrenzungen (durchgehende Doppellinie) verkehrstechnisch voneinander getrennt (vgl. Bild 3-5, a)). Dies gilt für die zweistreifigen Abschnitte dort, wo das Überholen untersagt ist (vgl. Bild 3-5, b1)). In den übrigen Abschnitten werden die beiden Fahrtrichtungen durch eine doppelte Leitlinie voneinander getrennt (vgl. Bild 3-5, b2)). Bei Straßen der EKL 2 soll landwirtschaftlicher Verkehr nach Möglichkeit auf gesonderten Wegen geführt werden. Diese Straßen können dann als Kraftfahrstraßen betrieben werden. Nicht motorisierter Verkehr soll auf der Fahrbahn ausgeschlossen und stattdessen auf gesonderten Wegen oder fahrbahnbegleitend auf Geh- und Radwegen geführt werden. Verknüpfungen mit dem gleichrangigen oder nachgeordneten Netz sollen vorzugsweise als teilplangleiche oder plangleiche Einmündungen mit Lichtsignalanlage ausgebildet werden, anderenfalls sind plangleiche Kreuzungen mit Lichtsignalanlage zu planen.

Straßen der Entwurfsklasse EKL 3 sind zweistreifige Straßen mit dem Regelquerschnitt RQ 11 (vgl. Bild 3-6). Die beiden Fahrtrichtungen werden dort, wo das Überholen durch Mitbenutzung des Gegenverkehrsfahrestreifens möglich sein soll, durch eine einfache Leitlinie voneinander abgegrenzt. Wo die Mitbenutzung des Gegenverkehrsfahrestreifens aus Sicherheitsgründen untersagt werden soll, sind sie

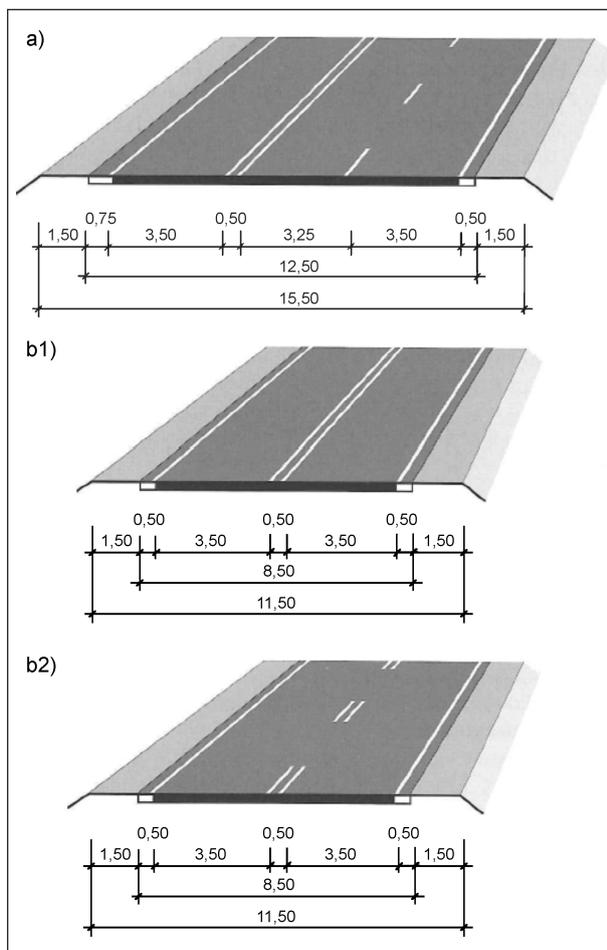


Bild 3-5: Regelquerschnitt RQ 11,5+ nach den RAL – Abmessungen in [m] (FGSV, 2012b)

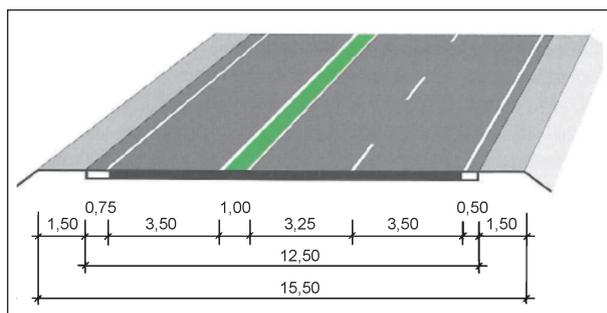


Bild 3-6: Regelquerschnitt RQ 11 nach den RAL – Abmessungen in [m] (FGSV, 2012b)

durch eine einfache Fahrstreifenbegrenzungslinie getrennt.

Straßen der Entwurfsklasse EKL 4 verfügen über den Regelquerschnitt RQ 9. Dies ist ein einbahniger Querschnitt ohne eine Markierung zur Trennung der beiden Fahrrichtungen (vgl. Bild 3-7). Auf beiden Seiten werden im Abstand von 0,50 m vom Rand der befestigten Fläche Leitlinien markiert. Das

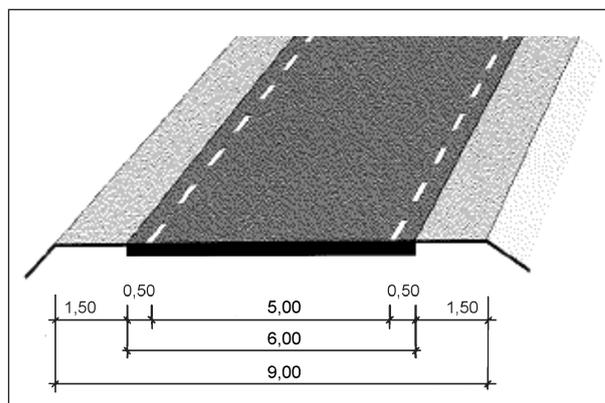


Bild 3-7: Regelquerschnitt RQ 9 nach den RAL – Abmessungen in [m] (FGSV, 2012b)

Strich-Lücke-Verhältnis beträgt 1:1 (1 m Strich – 1 m Lücke).

Entsprechend der Zielsetzung im Rahmen des Forschungsvorhabens werden Landstraßen der EKL 4 nicht weiter betrachtet. Die Darstellung des RQ sowie der grundsätzlichen Gestaltungsmerkmale erfolgt im Rahmen des Berichtes lediglich aus Gründen der Vollständigkeit.

Zusammenfassend sind die vier Entwurfsklassen der RAL danach durch folgende Merkmale geprägt:

- EKL 1: verkehrstechnischer Mittelstreifen zur Trennung der Fahrrichtungen, bestehend aus einer doppelten Fahrstreifenbegrenzung mit grüner Füllung,
- EKL 2: doppelte Fahrstreifenbegrenzung bzw. doppelte Leitlinie zur Kennzeichnung der Fahrrichtungen ohne eine farbige Füllung,
- EKL 3: einfache Leitlinie oder Fahrstreifenbegrenzung zur Kennzeichnung der Fahrrichtungen in Fahrbahnmittle und
- EKL 4: keine Leitlinie oder Fahrstreifenbegrenzung zur Kennzeichnung der Fahrrichtungen in Fahrbahnmittle, aber beidseitig seitliche Leitlinien im Abstand von 0,50 m vom Fahrbahnrand.

Tabelle 3-5 zeigt die Zuordnung der Regelquerschnitte und die grundsätzlichen Gestaltungsmerkmale von Landstraßen verschiedener Entwurfsklassen.

Die Grundlagen für den Entwurf von Landstraßen finden sich grundsätzlich in den RAL (FGSV, 2012b). Dies gilt auch für den Um- und Ausbau bestehender

Entwurfsklasse	Entwurfs- und Betriebsmerkmale				
	Planungsgeschwindigkeit [km/h]	Betriebsform	Querschnitt	gesicherte Überholabschnitte pro Richtung	Führung des Radverkehrs
EKL 1	110	Kraftfahrstraße	RQ 15,5	ca. 40 %	straßenunabhängig
EKL 2	100	Allgemeiner Verkehr	RQ 11,5+	≥ 20 %	straßenunabhängig oder fahrbahnbegleitend
EKL 3	90	Allgemeiner Verkehr	RQ 11	keine	fahrbahnbegleitend oder auf der Fahrbahn
EKL 4*	70	Allgemeiner Verkehr	RQ 9	keine	auf der Fahrbahn
Entwurfsklasse	Führung auf der Strecke				Führung im Knotenpunkt
	Linienführung	empfohlener Radienbereich R [m]	Höchstlängsneigung max. s [%]	empfohlener Kuppenhalbmesser H <sub>k</sub> [m]	Regellösung auf der übergeordneten Straße
EKL 1	sehr gestreckt	≥ 500	4,5	≥ 8.000	Ein-/Ausfädeln
EKL 2	gestreckt	400 – 900	5,5	≥ 6.000	Ein-/Abbiegen/ Kreuzen mit Lichtsignalanlage
EKL 3	angepasst	300 – 600	6,5	≥ 5.000	Ein-/Abbiegen/ Kreuzen mit/ohne Lichtsignalanlage
EKL 4*	sehr angepasst	200 – 400	8,0	≥ 3.000	Ein-/Abbiegen/ Kreuzen ohne Lichtsignalanlage
* keine weitere Betrachtung im Rahmen des Forschungsvorhabens					

Tab. 3-5: Entwurfsklassen und Gestaltungsmerkmale nach den RAL (FGSV, 2012b)

Landstraßen. Sofern jedoch beim Um- und Ausbau oder auch bei Erhaltungsmaßnahmen die Festlegungen der RAL nicht in vollem Umfang verwirklicht werden können, soll mit dem in der Erarbeitung befindlichen Merkblatt für die Übertragung des Prinzips der Entwurfsklassen nach den RAL auf bestehende Straßen (M EKLBest) (FGSV, 2015a) geprüft werden, ob der betreffende Streckenzug in Gänze oder nur Teile davon als Straße einer bestimmten zuvor in der netzweiten Betrachtung festgelegten Entwurfsklasse gekennzeichnet werden kann. Das Merkblatt soll ergänzend zu den RAL Empfehlungen geben, wie bei der Anpassung bestehender Landstraßen an das Prinzip der Entwurfsklassen zu verfahren ist. Das Merkblatt soll auch angeben, ob und unter welchen Voraussetzungen nach der Realisierung von Maßnahmen (Umbau-, Ausbau und Erhaltungsmaßnahmen) an bestehenden Straßen dem Verkehrsteilnehmer die angestrebte Entwurfsklasse durch die zugehörige Markierung sichtbar gemacht werden kann. Das Merkblatt zeigt dabei für einzelne Entwurfselemente auch Toleranzen auf, falls bei den Maßnahmen die Regelwerksvorgaben der RAL nicht in allen

Punkten erreicht werden. Es soll aber auch deutlich machen, welche Mindestvoraussetzungen gegeben sein müssen, bevor eine angestrebte Entwurfsklasse kenntlich gemacht werden kann. Für die jeweils erforderlichen Maßnahmen werden Umsetzungsstrategien benannt und konkrete Anpassungsschritte aufgezeigt.

Das M EKLBest gilt grundsätzlich für alle Landstraßen der LS I bzw. EKL 1 bis LS IV bzw. EKL 4 im Geltungsbereich der RAL.

### 3.1.4 Verkehrstechnische Infrastruktur

#### Allgemeines

Neben der straßenbaulichen/entwurfstechnischen Infrastruktur verfügen Straßen der verschiedenen Kategoriengruppen i. d. R. auch über eine sogenannte verkehrstechnische Infrastruktur. Hierzu zählen in erster Linie Fahrbahnmarkierungen und ortsfeste statische Verkehrszeichen. Darüber hinaus fallen Lichtsignalanlagen, sowie dynamische Verkehrsbeeinflussungsanlagen in diese Kategorie.

Mithilfe dieser technischen Einrichtungen sollen durch situationsangepasste Verhaltensvorschriften, Wegweisungen oder Informationen der Verkehrsablauf und die Verkehrssicherheit positiv beeinflusst werden oder auch eine bessere Ausnutzung der vorhandenen Kapazitäten erreicht werden.

Die grundlegende verkehrstechnische Infrastruktur auf Autobahnen, Land- und Stadtstraßen umfasst die Verkehrszeichen und ist dabei grob betrachtet gleich. Sie besteht aus endgültigen weißen bzw. vorübergehenden gelben Fahrbahnmarkierungen sowie ortsfesten vertikalen Verkehrszeichen. Alle weiteren verkehrstechnischen Elemente können für die genannten Straßenkategorien als grundsätzlich unterschiedlich beschrieben werden. Während an hochbelasteten Streckenabschnitten und in planfreien Knotenpunkten von Autobahnen und autobahnähnlichen Straßen Anlagen und Elemente zur dynamischen Verkehrsregelung sowie zur Lenkung und Beeinflussung des Verkehrs mittlerweile zum Standard gehören, sind diese auf Land- und Stadtstraßen verkehrlich in der Regel nicht erforderlich und daher auch nicht vorhanden. Hier werden lediglich an Knotenpunkten häufig Lichtsignalanlagen angeordnet, um einen sicheren und leistungsfähigen Verkehrsablauf erreichen zu können.

Im Folgenden wird die für Autobahnen und Landstraßen grundsätzlich zur Verfügung stehende verkehrstechnische Infrastruktur zusammenfassend dargestellt.

Analog der Darstellungen der baulichen/entwurfstechnischen Infrastruktur werden in diesem Zusammenhang auch wieder die entsprechenden Regelwerke der FGSV und anderer Quellen aufgeführt.

### Fahrbahnmarkierungen

Bei Fahrbahnmarkierungen handelt es sich gemäß § 39 (5) StVO um Verkehrszeichen, weshalb sie der verkehrstechnischen Infrastruktur zugerechnet werden. In Deutschland existieren verschiedene Regelwerke und Richtlinien, die Vorgaben bzgl. der Materialzusammensetzungen, dem Aufbringen (Applikation) und der Überprüfung von Fahrbahnmarkierungen enthalten. Hier sind insbesondere die Folgenden zu nennen:

- Straßenverkehrsordnung (StVO),
- Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrsordnung (VwV-StVO),

- Richtlinien für Markierungen von Straßen (RMS) sowie
- zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Markierungen auf Straßen (ZTV M).

Laut der StVO § 39 (5) (StVO, 2014) werden Fahrbahnmarkierungen weiß ausgeführt, vorübergehende Markierungen sind dagegen gelb. Durch sie werden die weißen Markierungen aufgehoben. Dies wird beispielsweise in Arbeitsstellen angewendet. Die StVO legt in den Anlagen 2 und 3 verschiedene Vorschrifts- und Richtzeichen fest, darunter insbesondere die Leitlinie (Zeichen 340, vgl. Bild 3-8) und die Fahrstreifen- und Fahrbahnbegrenzung (Zeichen 295, vgl. Bild 3-9).

Die Umsetzung wird durch die zugehörige Verwaltungsvorschrift (VwV-StVO) (VwV-StVO, 2014) geregelt. Hier werden die Vorgaben der StVO bezüglich der Fahrbahnmarkierungen in Abschnitt IV zu den §§ 39 bis 43 konkretisiert. Der Abschnitt enthält u. a. die folgenden Punkte:

- Fahrbahnmarkierungen, die sich auf den fließenden Verkehr beziehen, sind retroreflektierend auszuführen.
- Endgültige Markierungen müssen bei Erneuerung und Änderung eindeutig bleiben. Rückstände von alten Markierungen müssen entfernt werden, wenn dadurch Zweifel über die Verkehrsführung entstehen könnten.

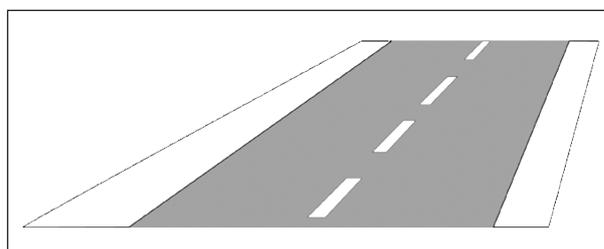


Bild 3-8: Richtzeichen Leitlinie (Zeichen 340) (StVO, 2014)

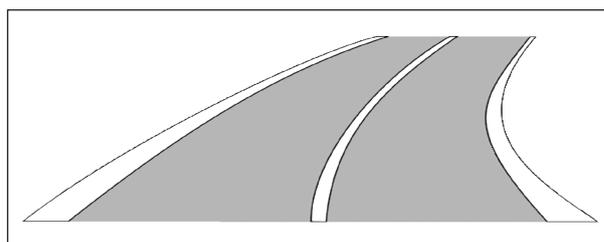


Bild 3-9: Vorschriftzeichen Fahrstreifen- und Fahrbahnbegrenzung (Zeichen 295) (StVO, 2014)

- Markierungsknöpfe können die Fahrbahnmarkierungen sinnvoll ergänzen. Eine Ersetzung ist nur dann zulässig, wenn die entsprechenden technischen Bedingungen dies sinnvoll erscheinen lassen (z. B. Pflasterdecken).

Außerdem erfolgt ein Verweis auf die RMS (FGSV, 1993), (FGSV, 1980), nach denen die Markierungen allgemein auszuführen sind. Hier werden als wichtigste verkehrstechnische Eigenschaften einer Fahrbahnmarkierung eine hohe Tages- und Nachtsichtbarkeit, Griffigkeit, Geometrie und Haltbarkeit beschrieben. Die RMS sind in zwei Teile aufgeteilt und enthalten praktische Vorgaben zu den Abmessungen und der geometrischen Anordnung von Markierungszeichen (Teil 1) sowie der Anwendung von Fahrbahnmarkierungen (Teil 2). In Teil 1 werden konkrete Abmessungen diverser Markierungszeichen (z. B. Leitlinie, Richtungspfeil; vgl. Tabelle 3-6) erläutert. Außerdem finden sich Angaben zu Mar-

kierungen auf Strecken und in Knotenpunkten, sowie für Parkstände. Teil 2 dient der einheitlichen Anwendung aller zuvor benannten Markierungszeichen und erläutert entsprechende Regelungen für Streckenquerschnitte bzw. Knotenpunkte von Land- und Stadtstraßen. So sind beispielsweise Angaben zur Markierung in Kurven und Kuppen, am Beginn und Ende zusätzlicher Fahrstreifen, in plangleichen Knotenpunkten mit (vgl. Bild 3-10) bzw. ohne Linksabbiegefahrstreifen oder in Ein- bzw. Ausfädelungsbereichen von planfreien Knotenpunkten zu finden. Die RMS werden zurzeit in der FGSV überarbeitet.

Die Anforderungen an die verkehrstechnischen Eigenschaften (siehe Tabelle 3-7), Ausführung und Prüfung von Markierungssystemen sind in den ZTV M (aktuelle Fassung von 2013) zusammengestellt. Als Markierungssystem wird dabei das Zusammenwirken von Markierungsstoffen und Beistoffen bezeichnet. Weiterhin wird zwischen den Markierungs-

Benennung	Grundformen (m)	Markierungszeichen
durchgehender Schmalstrich (S)		Fahrstreifenbegrenzung Fahrbahnbegrenzung Radfahrstreifenbegrenzung Parkflächenbegrenzung
unterbrochener Schmalstrich außerhalb von Knotenpunkten 1 : 2 (S)	 1 : 2	Leitlinie
unterbrochener Schmalstrich innerhalb von Knotenpunkten 1 : 1 (S)	 1 : 1	Leitlinie
unterbrochener Schmalstrich 2 : 1 (S)	 2 : 1	Warnlinie
durchgehender Breitstrich (B)		Fahrbahnbegrenzung Sonderfahrstreifenbegrenzung Radfahrstreifenbegrenzung
unterbrochener Breitstrich 1 : 1 (B)	 1 : 1	unterbrochene Fahrbahnbegrenzung
unterbrochener Breitstrich 2 : 1 (B)	 2 : 1	unterbrochene Sonderfahrstreifenbegrenzung
Doppelstrich aus einem durchgehenden und einem unterbrochenen Schmalstrich 1 : 2 (S)	 1 : 2	↔ - 0,12/0,15 einseitige Fahrstreifenbegrenzung
Doppelstrich aus zwei durchgehenden Schmalstrichen (S)	 ↔ - 0,12/0,15	Fahrstreifenbegrenzung
Doppelstrich aus zwei unterbrochenen Schmalstrichen 2 : 1 (S)	 2 : 1	↔ - 0,12/0,15 Fahrstreifenmarkierung für den Richtungswechselbetrieb/ Wechselfahrstreifen

Tab. 3-6: Grundformen von Leit- und Begrenzungslinien (FGSV, 1993)

systemen Typ I und Typ II unterschieden. Gegenüber Typ I-Markierungssystemen weisen Typ II-Markierungssysteme besonders ausgeprägte Retroreflexionseigenschaften bei Nacht und Nässe auf. Es werden die folgenden Systeme unterschieden:

- Systeme mit groben Nachstreumitteln: Retroreflexion bei Nacht und Nässe entsteht durch Reflexperlen (ggf. mit erhöhtem Brechungsindex).
- Systeme mit groben Inhaltsstoffen: Retroreflexion durch Zusammenwirken von Nachstreumitteln und der strukturierten Oberfläche, die durch Beimischung grober Materialien entsteht.
- Profilierte Systeme: Retroreflexion durch Zusammenwirken von Nachstreumitteln und strukturierter Oberfläche, die durch die Formung des Materials entsteht.
- Agglomerate: Grobstrukturierte, aus Einzelteilen bestehende Markierung, die aus (un-)regelmäßig angeordneten Markierungsstoffen und Beistoffen besteht.

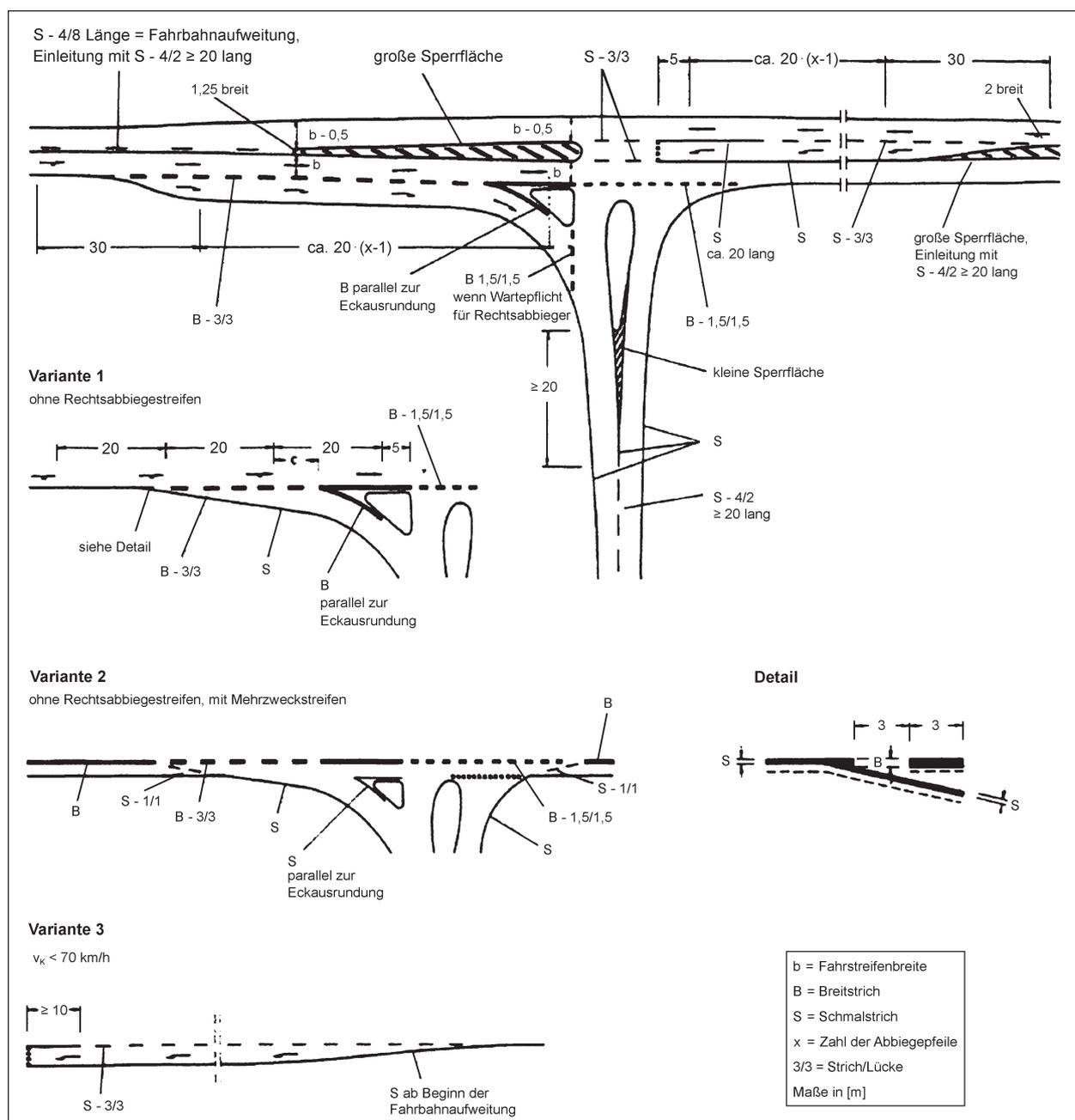


Bild 3-10: Markierung der Knotenpunktbereiche an zweistreifigen Straßen mit Linksabbiegestreifen außerhalb bebauter Gebiete (FGSV, 1980)

Die Anforderungen an Markierungen sind für verschiedene Kriterien in Tabelle 3-7 dargestellt.

Die Auswahl eines geeigneten Markierungssystems ist von verschiedenen Faktoren abhängig, darunter die Verkehrsbelastung, Umgebungsbedingungen und vorgesehene Nutzungsdauer. Aufgrund der Retroreflexionseigenschaften bei Nacht und Nässe sollen aus Gründen der Verkehrssicherheit Typ-II-Markierungen vorrangig eingesetzt werden. Für Bundesautobahnen sowie autobahnähnlich ausgebaute Bundes- bzw. Landstraßen stellen Typ-II-

Markierungen die Pflicht dar. Die Ausführung als profilierte Markierung mit akustischen und/oder haptischen Effekten (Vibration) besonders für Baumalleen und Straßen mit einer Unfallhäufung (Abkommen von der Fahrbahn) empfohlen. Eine Übersicht über die Auswahlkriterien für Markierungssysteme gibt Tabelle 3-8. Verschiedene Beanspruchungen werden hier in drei Gruppen eingeteilt:

- Gruppe A  
Wenig beanspruchte Markierungen (z. B. Fahrbahnbegrenzungen von einbahnigen Straßen),

Kriterium	Beschreibung, Kenngrößen
Geometrie und Toleranzen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ausführung im Neuzustand gemäß RMS</li> <li>• Strichbreite: <math>\pm 10</math> mm der Sollbreite</li> <li>• Strichlänge: Unterschreitung max. 50 mm, Überschreitung max. 150 mm</li> <li>• Zykluslänge (Strich und Lücke): <math>\pm 150</math> mm der vereinbarten Länge</li> <li>• Abstand der Eckpunkte (Pfeile, Buchstaben, Ziffern): Abweichung vom Sollbild max. <math>\pm 20</math> mm (Breite) bzw. <math>\pm 50</math> mm (Länge)</li> <li>• Fluchtgerechte Ausführung: Nur geringe (vom Kraftfahrer kaum wahrnehmbare) Abweichungen</li> <li>• Permanente Unterschreitung der Vorgaben (auch innerhalb der Toleranzen) ist nicht zulässig</li> </ul>
Tagessichtbarkeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Leuchtdichtekoeffizient bei diffuser Beleuchtung <math>Q_d</math> auf trockener sauberer Fahrbahn</li> <li>• Normfarbwertanteile <math>x, y</math></li> </ul>
Nachtsichtbarkeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Leuchtdichtekoeffizient bei Retroreflexion <math>R_L</math> auf trockener sauberer Markierungsoberfläche (Typ I/II-Markierungssysteme), Leuchtdichte-koeffizient bei Retroreflexion <math>R_L</math> auf feuchter Markierungsoberfläche (Typ II-Markierungssysteme). Wenn Markierungsoberfläche hydrophob (wasserabweisend), erfolgt erneute Prüfung der Nachtsichtbarkeit bei Feuchtigkeit 4 Wochen nach Applikation</li> </ul>
Griffigkeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Messung mit SRT-Gerät</li> <li>• Griffigkeit für alle Markierungssysteme im Neu- und Gebrauchszustand <math>\geq 45</math> SRT-Einheiten</li> </ul>
Verschleißfestigkeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prozentualer Anteil der vom Sollbild (ursprünglich zu markierende Fläche) noch vorhandene Teil der Markierung</li> <li>• Vorgabe: 90 % vor Ablauf der Verjährungsfrist für Mängelansprüche</li> </ul>
Überrollbarkeit (Trocknungszeit)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gegeben, wenn beim Überrollvorgang keine Markierungsreste am Reifen haften bleiben und keine starken Verformungen des Markierungsmaterials auftreten</li> <li>• Einteilung in vier Klassen (Bspw.: max. 1 min = sehr schnell trocknend, max. 30 min = langsam trocknend)</li> </ul>
Regenfestigkeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einsatz nur, wenn spätestens nach 60 min nicht mehr durch Regen ablösbar</li> </ul>
Rissbildung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Risse in der Markierung zählen als Mangel, wenn die Funktionstüchtigkeit beeinträchtigt wird,</li> <li>• Markierungen dürfen keine Fahrbahnrisse verursachen, die zu Deckenschäden führen können</li> </ul>
Schichtdicken	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unterscheidung zwischen Nassfilmdicke und Trockenschichtdicke</li> <li>• Festgelegte Schichtdicke darf nicht unterschritten und max. 20 % überschritten werden</li> <li>• Markierungsfläche muss frei von offensichtlichen Unregelmäßigkeiten in der Schichtdicke sein</li> <li>• Angaben für Markierungen aus Farben, Markierungen aus reaktiven Stoffen, thermoplastischen Stoffen und High-Solid-Dispersionen, Folien, Agglomeratmarkierungen</li> </ul>
Maximale Schichtdicken	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 4 mm bei ebenen, vollflächigen Markierungssystemen</li> <li>• 7 mm bei profilierten oder strukturierten Markierungssystemen und Agglomeraten</li> </ul>
Schichtdicken eingelegter Markierungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zusammengesetzt aus Höhenüberstand und Einlegetiefe</li> <li>• Höhenüberstand (mit Nachstreumitteln): 2 bis 4 mm</li> <li>• Einlegetiefe: min. 3 mm</li> </ul>
Erneuerung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erneuerung endgültiger Markierungen empfohlen, wenn bestimmte Mindestwerte für Tages- und Nachtsichtbarkeit oder Griffigkeit unterschritten</li> </ul>

Tab. 3-7: Anforderungen an Fahrbahnmarkierungen nach ZTV M (FGSV, 2013b)

Beanspruchung	Gruppe	Tägliche Verkehrsmenge (Fahrzeuge je Fahrstreifen)	Auszuwählende Systeme	Verkehrsklasse
wenig	A	≤ 5.000	spritzbare Systeme Typ I	P 4, P 5
	B	< 2.500	oder Typ II	P 6
stark	A	> 5.000 bis ≤ 15.000	alle Systeme außer Farben und außer Dispersionen	P 6
	B	≥ 2.500 bis ≤ 15.000		
		> 10.000 bei Erstmarkierung	alle Systeme außer Farben und außer Dispersionen; Schichtdicke ≥ 1,2 mm	P 7
besonders stark	A, B	> 15.000	alle Systeme Schichtdicke ≥ 2,0 mm	P 7
	C	alle	Agglomeratmarkierungen	

Tab. 3-8: Auswahl der Verkehrsklassen für endgültige Markierungen nach ZTV M (FGSV, 2013b)

- Gruppe B  
Stark beanspruchte Markierungen (z. B. Leitlinien),
- Gruppe C  
Besonders stark beanspruchte Markierungen (z. B. Quermarkierungen).

Der ZTV M können darüber hinaus Informationen zu Prüfverfahren für die wesentlichen Anforderungen (z. B. Tages- und Nachtsichtbarkeit, Griffigkeit, Verschleißfestigkeit etc.) entnommen werden.

Zusätzlich zu den erläuterten Regelwerken enthalten die folgenden Schriften ebenfalls Bezüge zum Thema Fahrbahnmarkierungen:

- Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Sicherungsarbeiten an Arbeitsstellen an Straßen (ZTV SA),
- technische Lieferbedingungen für Markierungsmaterialien (TL M),
- Hinweise für Markierungen auf neuen Fahrbahnoberflächen,
- Merkblatt für Agglomeratmarkierungen,
- Merkblatt zur örtlichen Unfalluntersuchung in Unfallkommissionen (M Uko),
- Merkblatt für die Durchführung von Verkehrsschauen (M DV),
- Hinweise zu variablen Fahrstreifenzuteilungen.

Für weitere Informationen wird außerdem auf den „Leitfaden Fahrbahnmarkierung“ (REINBERG & FRANK, 2014) verwiesen.

## Beschilderung

Laut den Begriffsbestimmungen für Verkehrsplanung, Straßenentwurf und Straßenbetrieb (FGSV, 2012c) wird allgemein zwischen wegweisender und verkehrsregelnder Beschilderung unterschieden. Eine Beschilderung stellt dabei ein vertikales Verkehrszeichen dar. Gemäß § 39 (2) der StVO (StVO, 2014) werden die Verkehrszeichen in Gefahrzeichen (z. B. Zeichen 101: Gefahrstelle), Vorschriftzeichen (z. B. Zeichen 205: Vorfahrt gewähren) und Richtzeichen (z. B. Zeichen 306: Vorfahrtsstraße) unterschieden. Die Zusatzzeichen, die Symbolbilder oder Aufschriften enthalten können, fallen laut § 39 (3) ebenfalls in die Kategorie der Verkehrszeichen.

Der § 39 (4), der besonders für Autobahnen relevant erscheint, besagt zudem, dass Verkehrszeichen abweichend der vorgesehenen Farbgebung (schwarzes Symbol auf weißem Grund) auf Wechselverkehrszeichen auch als weißes Symbol auf schwarzem Untergrund ausgeführt werden dürfen. Dies betrifft selbst leuchtende Wechselverkehrszeichen.

Die VwV-StVO (VwV-StVO, 2014) enthält ferner Hinweise und Vorgaben zur Anordnung von Verkehrszeichen. So sollen nach §§ 39 bis 43 (2) beispielsweise Verkehrszeichen, welche nur die gesetzliche Regelung wiedergeben, nicht aufgestellt werden. Ein Beispiel hierfür ist die erlaubte Höchstgeschwindigkeit auf einbahnigen Landstraßen, für die ein entsprechendes Verkehrszeichen nur dann angeordnet wird, wenn von dem gesetzlich vorgeschriebenen Wert 100 km/h abgewichen wird. Es wird ferner darauf verwiesen, dass nur solche Zeichen angeordnet werden dürfen, die in der StVO abgebildet sind bzw. durch das BMVI im Verkehrsblatt zugelassen werden (§§ 39-43 Rdnr. 7).

Weitere Vorgaben finden sich bezüglich der Größe von Verkehrszeichen, Schrift und Farben, Retroreflexion bzw. Beleuchtung von innen, sowie Sichtbarkeit und Sicherheit am Aufstellort.

Die Anforderungen an ortsfeste Verkehrszeichen sind in den zusätzlichen technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für vertikale Verkehrszeichen (ZTV VZ) (FGSV, 2011b) sowie den technischen Liefer- und Prüfbedingungen für vertikale Verkehrszeichen (TLP VZ) (FGSV, 2011a) zu finden. Hier erfolgt die Unterscheidung zwischen nicht beleuchteten, von außen beleuchteten oder durchleuchteten Verkehrszeichen. Verkehrszeichen ohne eigene Beleuchtung sind i. d. R. mit speziellen Folien beklebt, die bei Beleuchtung durch z. B. Fahrzeugscheinwerfer eine retroreflektierende Wirkung haben. Die beiden letztgenannten Typen sind dagegen mit einer eigenen Beleuchtungseinrichtung ausgestattet, die das Verkehrszeichen entweder von vorne an- oder von hinten durchleuchtet.

Neben konstruktiven Angaben, welche z. B. die Gründungen, Aufstellvorrichtungen und Befestigungen betreffen, werden in den Regelwerken insbesondere geometrische und materielle Anforderun-

gen wie z. B. an Werkstoffe, Blechdicken, Abmessungen, Folieneigenschaften oder Schlagfestigkeiten behandelt.

Für die Sichtbarkeit von nicht beleuchteten Verkehrszeichen sind darüber hinaus besonders die Retroreflexionseigenschaften relevant. Diese werden anhand des spezifischen Rückstrahlwertes  $R_A$  (Einheit:  $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$ ) bewertet. Die Ermittlung erfolgt im Neuzustand gemäß der CIE-Publikation Nr. 54 mit einer genormten Lichtart. Die Mindestanforderungen an das Material werden durch die drei Retroreflexions-Klassen RA1, RA2 und RA3 charakterisiert. Die geforderten Rückstrahlwerte sind in der Tabelle 3-9 bis Tabelle 3-11 gegeben.

Für innen beleuchtete Verkehrszeichen wird dagegen die Leuchtdichte (Einheit  $\text{L}/\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ ) sowie deren Kontrast und Gleichmäßigkeit herangezogen. Für alle Verkehrszeichenarten existieren zudem Normfarbwertanteile, die von den verwendeten Farben des Signalbildes eingehalten werden müssen.

Die lichttechnischen Grundlagen werden in dem Merkblatt für die Wahl der lichttechnischen Leis-

Messgeometrie		Aufsichtfarbe								
$\alpha$	$\beta_1$ ( $\beta_2 = 0$ )	weiß	gelb	rot	grün	blau	braun	orange	grau	purpur
0,33°	+ 5°	40	28	8	5,5	1,5	#	16	24	1,5
0,33°	+ 30°	19	12	3	2,0	#	#	6	11	#

# bedeutet „Mindestwerte größer als Null, aber nicht anwendbar“

Tab. 3-9: Spezifische Rückstrahlwerte  $R_A$  [ $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$ ]: RA1 nach ZTV VZ (FGSV, 2011b)

Messgeometrie		Aufsichtfarbe								
$\alpha$	$\beta_1$ ( $\beta_2 = 0$ )	weiß	gelb	rot	grün	blau	braun	orange	grau	purpur
0,33°	+ 5°	144	96	20	16	11	6	52	72	1,5
0,33°	+ 30°	80	56	11	9,5	6	4	32	40	#

# bedeutet „Mindestwerte größer als Null, aber nicht anwendbar“

Tab. 3-10: Spezifische Rückstrahlwerte  $R_A$  [ $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$ ]: RA2 nach ZTV VZ (FGSV, 2011b)

Messgeometrie		Aufsichtfarbe								
$\alpha$	$\beta_1$ ( $\beta_2 = 0$ )	weiß	gelb	rot	grün	blau	braun	orange	grau	purpur
0,33°	+ 5°	240	156	48	24	15	8	120	120	7
0,33°	+ 30°	132	88	26	13	8,5	5	66	66	4

Tab. 3-11: Spezifische Rückstrahlwerte  $R_A$  [ $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$ ]: RA3 nach ZTV VZ (FGSV, 2011b)

tungsklasse von vertikalen Verkehrszeichen und Verkehrseinrichtungen (M LV) zusammengefasst. Eine Leistungsklasse beschreibt dabei das Zusammenwirken sämtlicher lichttechnischer Eigenschaften eines Verkehrszeichens. Diese Eigenschaften sind verantwortlich für die Wahrnehmbarkeit, Erkennbarkeit und Lesbarkeit von Verkehrszeichen. Beeinflusst werden sie von beobachtungsspezifischen Größen (z. B. Aufmerksamkeit des Fahrers), verkehrszeichenspezifischen Größen (z. B. Größe, Farbe, Kontrast) und umwelt- bzw. umfeldspezifischen Größen (z. B. Helligkeit des Umfeldes, meteorologische Sichtbedingungen). Die Wahl der anzusetzenden Leistungsklasse ist abhängig von der Bedeutung des Verkehrszeichens, dem Straßentyp (z. B. Autobahn bzw. autobahnähnliche Straße), dem Aufstellort (rechts, links, Überkopf) sowie seiner Umfeldhelligkeit (normal, hell erleuchtet). Mit diesen Kriterien kann aus Tabelle 3-12 eine entsprechende Leistungsklasse (z. B. RA1) ausgewählt werden, mit der dann anhand der ZTV VZ bzw. TLP VZ Anforderungen an die Retroreflexion bzw. Leuchtdichte und weitere materielle Eigenschaften des Verkehrszeichens ableiten lassen.

Im Zusammenhang mit Verkehrszeichen existieren darüber hinaus weitere Regelwerke und Hinweise, die im Folgenden nicht näher erläutert werden:

- Technische Lieferbedingungen für Aufstellvorrichtungen für Schilder und Verkehrseinrichtungen an Arbeitsstellen (TL-Aufstellvorrichtungen),
- Richtlinien für die wegweisende Beschilderung außerhalb von Autobahnen (RWB),
- Hinweise für die Wahl der Bauart von Verkehrszeichen und Verkehrseinrichtungen hinsichtlich ihrer lichttechnischen Eigenschaften (HWBV),
- Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen (RSA),
- Merkblatt zur Qualitätssicherung von dauerhaft verwendeten Verkehrsschildern (M QVS).

### Leiteinrichtungen

Als Leiteinrichtungen werden allgemein alle Maßnahmen zur „Verdeutlichung der Verkehrsführung“ (FGSV, 2012c) bezeichnet. Dazu gehören beispielsweise Baken an Arbeitsstellen oder Leitpfos-

Zeichen nach § 39 bis § 43 StVO		Normales Umfeld			Hell erleuchtetes Umfeld und/oder viele externe Lichtquellen		
		Autobahn	außerorts	innerorts	Autobahn	außerorts	innerorts
Alle Zeichen außer den nachstehend aufgeführten*	Aufstellort: <b>rechts</b>	RA2	RA1/RA2	RA2	RA2/RA3	RA2	RA3/be
	Aufstellort: <b>hoch/links</b>	RA2	RA2	RA2	RA3	RA2/RA3	RA3/be
Warte- und Haltegebote an Bahnübergängen		–	RA2/RA3	RA2/RA3	–	RA3	RA3
Warte- und Haltegebote an Kreuzungen, Einmündungen und bei verengter Fahrbahn; Zeichen für vorgeschriebene Fahrtrichtung und vorgeschriebene Vorbeifahrt		RA2/RA3	RA2	RA2/RA3	RA3	RA3	RA3/be
Zeichen in Arbeitsstellen		RA2	RA2	RA2**	RA2/RA3	RA2	RA2
Sonderwege, Haltverbote und Parken; touristische Unterrichtstafeln gemäß Z 386 StVO und VwV-StVO zu Zeichen 386***		RA1					
* Sofern für diese nicht in gesonderten Regelwerken Festlegungen getroffen werden (z. B. Zeichen 350 in den R-FGÜ)							
** Vorhandene Bestände an Materialien der Retroreflexions-Klasse 1 (RA1) können aufgebraucht werden							
*** Sofern nicht in Form eines braunen Farbensatzes in einem Wegweiser nach RWB integriert							
Erläuterung:							
RA1 Retroreflexions-Klasse 1 (früher Typ 1)							
RA2 Retroreflexions-Klasse 2 (früher Typ 2)							
RA3 Retroreflexions-Klasse 3 (früher Typ 3)							
be von innen oder außen beleuchtet							
/ Auswahl nach Randbedingungen							
links wenn das Zeichen nur links steht, wird eine höherwertige Leistungsklasse gegenüber der Rechtsaufstellung ( <b>rechts</b> ) empfohlen							

Tab. 3-12: Wahl der Leistungsklasse bezüglich Retroreflexion und/oder Leuchtdichte nach M LV (FGSV, 2011c)

ten. Letztere werden gemäß § 43 StVO (StVO, 2014) als Zeichen 620 geführt. Sie zählen zu den Verkehrseinrichtungen. Laut § 45 (3) StVO erfolgt die Aufstellung auf Anordnung der örtlich zuständigen Straßenbaubehörden. Diese können die Leiteinrichtungen gemäß § 45 (56) VwV-StVO (VwV-StVO, 2014) in Ergänzung zu den vorhandenen Verkehrszeichen als zusätzliche Absicherungsmaßnahme einsetzen. Der Regelabstand beträgt laut Anlage 4 StVO 50 m, wobei die Distanz in Kurven verringert werden kann.

Die Beschaffenheit der Leitpfosten (z. B. Reflektoren) ist in der europäischen Norm für Leitpfosten DIN EN 12899, Teil 3 beschrieben. Die Umsetzung in nationale technische Lieferbedingungen und Prüfvorschriften für Leitpfosten (TLP Leitpfosten) ist geplant (FGSV, 2015c).

Laut den Hinweisen für die Anordnung und Ausführung von senkrechten Leiteinrichtungen (HLB) (FGSV, 1992) sind Leitpfosten in Deutschland grundsätzlich weiß und verfügen über ein Tages- und ein Nachtkennzeichen. Das Tageskennzeichen besteht aus einem zur Fahrbahn geneigten schwarzen Streifen, in dessen Mitte das Nachtkennzeichen angebracht ist. Dieses besitzt retroreflektierende Eigenschaften und zeigt in Fahrtrichtung rechts einen senkrechten Streifen, bzw. in Fahrtrichtung links zwei übereinander angeordnete Punkte. Die Pfosten sollen auf einbahnigen Straßen auf beiden Seiten der Fahrbahn, auf Straßen mit baulicher Mitteltrennung der Fahrbahnen nur jeweils auf der rechten Seite jeder Richtungsfahrbahn aufgestellt werden.

Leiteinrichtungen können darüber hinaus an vorhandene Fahrzeug-Rückhaltesysteme angebracht werden. Dies wird z. B. durch Reflektoren an temporär eingesetzten Fahrzeug-Rückhaltesystemen realisiert. Diesbezügliche Anforderungen (z. B. Mindestrückstrahlwerte für Reflektoren) können den Hinweisen zur Nutzung von Fahrzeug-Rückhaltesystemen als Träger von Leiteinrichtungen (H FL) (FGSV, 2008e) entnommen werden.

### **Verkehrsbeeinflussungsanlagen auf Autobahnen**

Mit stetig wachsendem Verkehrsaufkommen steigen die Anforderungen an die Erhöhung der Verkehrssicherheit, die Verbesserung des Verkehrsablaufs und die Schonung der Umwelt. Verkehrsbeeinflussungsanlagen (VBA) leisten hierzu

auf Autobahnen einen wichtigen Beitrag. Sie steuern den Verkehrsablauf situationsangepasst durch Wechselverkehrszeichen. Je nach Anwendungsfall kommen hierbei unterschiedliche Systeme zum Einsatz.

Das System Verkehrsbeeinflussung gliedert sich in Streckenstationen, die die Datenerfassung und die Ansteuerung von Wechselverkehrszeichen durchführen, in Unterzentralen, von denen aus die einzelnen Anlagen gesteuert werden, und in die Verkehrsrechnerzentralen für größere Regionen.

Um den Anforderungen an ein modernes Verkehrsmanagementsystem gerecht zu werden, ist es in der Regel erforderlich, Verkehrsbeeinflussungsanlagen als Teile eines umfassenden Gesamtsystems zu konzipieren und zu betreiben. Es ist zu gewährleisten, dass die Funktionen der einzelnen Verkehrsbeeinflussungsanlagen an zentraler Stelle koordiniert werden. In den Verkehrsrechnerzentralen ist jederzeit ein aktueller Überblick über den Verkehrs- und den Schaltzustand der angeschlossenen Wechselverkehrszeichenanlagen vorhanden. Von hier aus erfolgt die Weitergabe der Informationen über Staus und Umleitungsempfehlungen an die Landesmeldestellen der Polizei, die diese Meldungen weiter an den Rundfunk leiten.

Verkehrsbeeinflussungsanlagen lassen sich grundsätzlich wie folgt differenzieren:

- Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA) zur Erhöhung der Verkehrssicherheit und Harmonisierung des Verkehrsablaufs durch verkehrsabhängige Geschwindigkeitsbeschränkung und Gefahrenwarnung,
- Netzbeeinflussungsanlagen (NBA) zur Umleitung von Verkehrsströmen auf alternative Routen,
- Knotenbeeinflussungsanlagen (KBA) zur Regelung des Zusammenflusses an Einfahrten/Verflechtungsstrecken sowie der Fahrstreifensignalisierung in Ausfahrten,
- temporäre Freigabe von Seitenstreifen in Spitzenzeiten des Verkehrs.

Die Streckenbeeinflussungsanlagen werden in der Regel auf hochbelasteten Streckenabschnitten aufgebaut. Sie geben durch Wechselverkehrszeichen Warnungen an den Autofahrer weiter, regeln die Geschwindigkeit durch Anzeige von flexiblen Geschwindigkeitsbeschränkungen und sperren bzw.



den Verkehrsfluss und die Verkehrsstärke zu gewinnen. Die erfassten Daten dienen dann im Folgenden u. a. als Entscheidungshilfe für eventuell erforderlich werdende Verkehrsbeeinflussungsanlagen bzw. anderer baulicher oder verkehrlicher Maßnahmen sowie zur Erzeugung von Verkehrsinformationen. Die Steuerung, Überwachung und Koordinierung von Verkehrsbeeinflussungsanlagen geschieht in Unterzentralen und Verkehrsrechnerzentralen.

Die Aufgaben, verkehrstechnischen Anforderungen der Zentralen sowie die Anforderungen an Hard- und Software und die Art der Datenübertragung zwischen den Zentralen sind im Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen (BASt, 1999) beschrieben. Eine Systembeschreibung der Verkehrsbeeinflussungsanlagen an Bundesfernstraßen ist in den Richtlinien für Wechselverkehrszeichenanlagen (BMVBS, 1997a) enthalten.

### **Verkehrsbeeinflussungsanlagen auf Landstraßen**

Strecken- und/oder netzbezogene Verkehrsbeeinflussungsanlagen sind an Land- und Stadtstraßen in der Regel nicht erforderlich. Vereinzelt finden sich an zweibahnigen autobahnähnlich ausgebauten Straßen, welche jedoch als Bundesstraße gewidmet sind, derartige Anlagen (z. B. B 14/B 29 Stuttgart). Im Rahmen des Projektes werden Verkehrsbeeinflussungsanlagen an Streckenabschnitten sowie Netzbereichen von Bundesstraßen daher nicht weiter betrachtet.

Die verkehrstechnische Infrastruktur auf Landstraßen beschränkt sich dagegen auf Lichtsignalanlagen. Für Stadtstraßen kommen dynamische Parkleitsysteme und vereinzelt auch Systeme zur Schaltung eines Richtungswechselbetriebs für bestimmte Streckenabschnitte hinzu.

Lichtsignalanlagen<sup>1</sup> werden zur Verbesserung der Verkehrssicherheit und der Qualität des Verkehrsablaufs eingerichtet. Die Steuerung von Lichtsignalanlagen bestimmt maßgeblich die Verkehrsabwicklung in Verkehrsnetzen, an Streckenabschnitten und an Knotenpunkten. Sie ist damit ein wichtiges Instru-

ment im Rahmen übergeordneter Verkehrskonzepte, bei denen auch Maßnahmen zur Beschleunigung des öffentlichen Verkehrs, zur sicheren Führung des Fußgänger- und Radverkehrs und zur Bündelung der Kraftfahrzeugströme auf bestimmten Routen ineinandergreifen. Als dynamisches Element ist die Lichtsignalsteuerung ein wichtiger Bestandteil des Verkehrsmanagements.

Da mit Lichtsignalanlagen unmittelbar in den Verkehrsablauf eingegriffen wird, indem Verkehrsströme mit gemeinsamen Konfliktflächen abwechselnd angehalten oder freigegeben werden, müssen Lichtsignalanlagen besonders sorgfältig entworfen, gebaut und betrieben werden.

Grundlage sind die Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RiLSA) der FGSV (FGSV, 2015b). Diese Richtlinien enthalten wichtige verkehrstechnische Bestimmungen und Empfehlungen für die Einrichtung und den Betrieb von Lichtsignalanlagen.

Dies umfasst Grundlagen der Signalsteuerung sowie Wechselwirkungen zwischen Lichtsignalsteuerung und Straßenentwurf. Der Verkehrsablauf, der mithilfe der Lichtsignalsteuerung erreicht werden soll, stellt spezielle Anforderungen an den Entwurf der Straßenverkehrsanlage. Umgekehrt ergeben sich aus dem Entwurf von Knotenpunkten und Streckenabschnitten sowie aus der Beachtung des Umfelds häufig wesentliche Auswirkungen auf die Lichtsignalsteuerung. Der Entwurf der Straßenverkehrsanlage und die Lichtsignalsteuerung sind daher als Einheit zu betrachten und schrittweise in wechselseitiger Abstimmung zu entwickeln.

### **3.1.5 Informationstechnische Infrastruktur**

Die informationstechnische Infrastruktur beinhaltet die für das automatisierte Fahren bereitgestellten Daten sowie alle Einrichtungen zur Erzeugung und Pflege dieser Daten, zur Datenübertragung und Kommunikation. Diese bilden die Basis für einen sicheren und leistungsfähigen Verkehrsablauf.

Für das automatisierte Fahren sind in diesem Zusammenhang vor allem die Routenplanung (Navigation) sowie Informationen über den Straßen- und Verkehrszustand auf dieser Route von übergeordneter Bedeutung. An dieser Stelle werden daher die Aspekte digitale Karte und Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation bzw. Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation betrachtet.

<sup>1</sup> Verkehrsrechtlich werden Lichtsignalanlagen als „Lichtzeichenanlage“ bezeichnet.

Eine digitale Karte bildet die Grundlage jeder Navigation und damit auch für aktuelle auf dem Markt vorhandene und in der Entwicklung bzw. Erprobung befindliche automatisiert fahrende Fahrzeuge. Die digitale Karte besteht aus einem Knoten-Kanten-Netz mit einer Vielzahl von Zusatzinformationen (z. B. Verkehrsregeln und Fahrstreifenanzahl) und verorteten Points-of-Interest (PoI). Aktuell am Markt verfügbare digitale Karten verfügen in der Regel nur über statische Informationen. Vereinzelt werden dynamische Informationen, wie z. B. Informationen über die Verkehrslage oder auch das Vorhandensein von Arbeitsstellen, übertragen. Letzteres lässt sich beispielsweise über die V2I-Kommunikation direkt von einem Arbeitsstellenfahrzeug auf eine Zentrale übermitteln (Beispiel: Road Works Warning<sup>2</sup>).

### Navigation-Data-Standard

Bedingt durch die Vielzahl von Anbietern von Fahrzeugen, Navigationssystemen oder auch Zusatzdienstleistungen ist aktuell kein einheitlicher Kartenstandard am Markt vorhanden. Mit dem Navigation-Data-Standard (NDS) wird daher das Ziel verfolgt, ein standardisiertes binäres Datenbankformat einzuführen, welches den Austausch von Kartendaten zwischen verschiedenen Navigationssystemen ermöglicht. Der NDS trennt Kartendaten und Navigationssoftware, sodass auf Grundlage von NDS verschiedene Navigationsprodukte für Endanwender entwickelt werden können. Das Format des NDS soll

- in der Navigationsbranche vielfältige Anwendung finden und von führenden Herstellern von Navigationssystemen verwendet werden,
- interoperabel für verschiedene Systeme einsetzbar sein,
- Kartenaktualisierungen unterstützen,
- weltweit einsetzbar sein und
- die spezifischen Anforderungen verschiedener Länder erfüllen.

Die Qualitätsanforderungen an den NDS werden vom den Standard entwickelnden Konsortium (<http://www.nds-association.org>) wie folgt beschrieben:

- Der NDS soll gemeinsam von führenden Automobilherstellern und -zulieferern entwickelt werden, darunter z. B. BMW, Navigon und Bosch.
- Der NDS soll alle Anwendungsfälle der Automobilindustrie für Kartendaten unterstützen.
- Der NDS soll künftige Navigationstechnologien wie z. B. eHorizon, automatisiertes Fahren und Cloud-Anwendungen unterstützen.
- Die weiträumige Anwendung und die Implementierung in verschiedenen Systemen sollen dafür sorgen, dass der NDS kontinuierlich geprüft und weiterentwickelt wird.

Der NDS verwendet das Datenbankformat SQLite. Eine NDS-Datenbank kann aus mehreren Produktdatenbanken bestehen, die wiederum in einzelne Aktualisierungsregionen unterteilt sein können. Dieser Aufbau ermöglicht flexible, aber konsistente Aktualisierungen sowie die Integration von Datenbanken verschiedener Hersteller in eine gemeinsame NDS-Datenbank.

### Straßendatenbanken und Informationssysteme der Länder

Am Markt verfügbare digitale Karten verfügen über eine Vielzahl von statischen (z. T. auch dynamischen) Informationen, die vom Anbieter selbst erhoben oder auch durch die Fusion mit anderen Datenquellen gewonnen werden. In diesem Zusammenhang sind auch vorhandene Straßendatenbanken und Informationssysteme bei den Bundesländern zu nennen. Hier liegt eine Vielzahl von Informationen vor, die ggf. auch für die Weiterentwicklung von am Markt vorhandenen Karten oder auch im Rahmen der Standardisierung (NDS) verwendet werden könnten.

Mit dem Bundesinformationssystem Straße (BISStra) wird der Bestand an Bundesfernstraßen, Brücken und Tunneln, deren Alter und Zustand informationstechnisch erfasst. Auch die Verkehrsbelastung der Straßen und Bauwerke sowie die Anzahl der durch den Verkehr oder die Zahl der Verletzten und Getöteten können mit BISStra erfasst werden. BISStra ist dabei ein geografisches Informationssystem, welches aus einem Kernsystem und verschiedenen Fachsystemen besteht. Im Kernsystem sind die alphanumerischen und geometrischen Straßennetzdaten der Bundesfernstraßen gespeichert. Damit können der Verlauf und die Geometrie

<sup>2</sup> Projekt Drive C2X: <http://www.drive-c2x.eu>

der Bundesfernstraßen auf Rasterhintergrundkarten geografisch dargestellt werden.

Das Fachsystem „Verkehrsdaten“ stellt aggregierte Daten von etwa 1.500 automatischen und 12.000 manuellen Zählstellen auf Bundesfernstraßen zur Verfügung. Das Fachsystem „Zustandsdaten“ beinhaltet die bei der BAST zentral vorgehaltenen Informationen zum Zustand der Fahrbahnen. Hierzu zählen beispielsweise die Quer- und Längsebenheit. Das Fachsystem „Streckenbezogene Unfallanalyse auf BAB“ erleichtert die Arbeit bei der Herstellung von themenbezogenen Karten und Analysen unter dem Gesichtspunkt der Unfallforschung.

Die Daten im Kernsystem sowie in den verschiedenen Fachsystemen werden turnusmäßig aktualisiert bzw. fortgeschrieben. So wird beispielsweise die Zustandserfassung und -bewertung auf den Bundesfernstraßen in einem Vierjahres-Zyklus realisiert. Die Erfassung erfolgt dabei stets in drei Teilprojekten: Ebenheit, Griffigkeit und Substanzmerkmale (Oberfläche). Zusätzlich werden die Längs- und Querneigung sowie die Krümmungen erfasst. Seit dem Jahr 2006 werden darüber hinaus die Streckenbilder sowie seit 2009 auch Oberflächenbilder aufgenommen und archiviert.

Für die Auswertung und Verbreitung der erhobenen Daten wurde von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) ein umfassendes Online ZEB-Auskunftssystem eingeführt (IT-ZEB Server). Das System stellt das gesamte Spektrum auf ZEB-Daten (einschließlich Netz- und Geometriedaten, Streckenbilddaten und Visualisierungsdienste) bereit.

Grundsätzlich stellt BISStra damit Daten zur Verfügung, die stichtagsbezogen (in der Vergangenheit) erhoben wurden. Eine Aktualisierung findet in relativ großen Zeiträumen statt.

### **Mobilitäts Daten Marktplatz (MDM)<sup>3</sup>**

Mit dem Mobilitäts Daten Marktplatz (MDM) wurde unter der Federführung des Bundesverkehrsministeriums im Jahr 2012 eine zentrale Plattform von Verkehrsdaten entwickelt. Differenziert werden die Datenarten: Verkehrsdaten, Verkehrsinformationen, Verkehrslage, Umfelddaten, Parkdaten. Anbieter und Nutzer von Verkehrsdaten der öffentlichen Hand und der Privatwirtschaft finden hier eine neutrale Plattform mit definierten Daten- und Qualitätsstandards für die Angebote und für den Datentransfer. Verkehrsdaten können dabei sowohl statische wie auch dynamische bzw. online Daten sein.

Der MDM soll die Geschäftsprozesse aller Beteiligten vereinfachen. Die Plattform soll dabei als Marktplatz fungieren und das Anbieten, Suchen und Abonnieren von verkehrsrelevanten Daten ermöglichen. Der Austausch von Daten erfolgt über den MDM zu rechtlich klar definierten Rahmenbedingungen unter den Datengebern, den Datennehmern und den Datenaufbereitern (Akteure). Die Nutzung der Plattform ist kostenfrei. Der Datengeber bestimmt jedoch darüber, ob er seine Daten entgeltlich oder unentgeltlich zur Verfügung stellt.

Für den Datenaustausch stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung. Zum einen kann das gängige DATEX-II-Format verwendet werden, zum anderen können die Daten in einen Container überführt gepackt werden und so dem Abnehmer angeboten werden. Hier muss der Anbieter dafür sorgen, dass der Abnehmer mit dem Inhalt bzw. den zur Verfügung gestellten Daten im Container arbeiten kann.

### **Datenportal mCLOUD<sup>4</sup>**

Seitens des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) werden seit Mitte des Jahres 2016 über das offene Datenportal mCLOUD Mobilitäts-, Geo- und Wetterdaten zur Verfügung gestellt. Das BMVI stellt mit der Rechercheplattform mCLOUD einen zentralen Zugangspunkt zu allen offenen Daten seines Geschäftsbereiches zur Verfügung und öffnet das Portal auch für private Anbieter aus dem Mobilitätsbereich, um ihre Daten dort anzubieten. Weiterhin ist beabsichtigt, auch weitere offene Daten aus Behörden weiterer Verwaltungsebenen (Länder, Kommunen) einzubinden.

Die mCLOUD soll in erster Linie Entwicklern in Unternehmen, Forschung und Verwaltung einen direkten Zugang zu Daten bieten und damit die Entwicklung neuer Ideen fördern. Der Datenumfang, welcher über die mCLOUD zugänglich gemacht wird, soll beständig steigen. Auch sollen die Funktionalitäten der Plattform laufend verbessert werden.

Alle Informationen in mCLOUD sind in die Kategorien Mobilität (Straße, Schiene und Wasserwege), Wetter und Klima sowie Gewässer unterteilt. Auch sind die Ergebnisse der ca. 1.700 automatischen Zählstellen auf Autobahnen und Bundesstraßen

<sup>3</sup> [www.mdm-portal.de](http://www.mdm-portal.de)

<sup>4</sup> <http://mcloud.de/mCLOUD/SubSiteGlobals/Forms/Suche/Expertensuche.html>

enthalten. Hinzu kommen Flutzeiten und Wasserstände an der Deutschen Bucht, Echtzeitdaten über die Pegelstände der Bundeswasserstraßen und die Zeitreihen der über 1.000 deutschen Klimastationen. Bzgl. der Verfügbarkeit der Daten in mCLOUD werden historische (Tag, Monat, Jahr) und Echtzeit-Daten differenziert. Zusätzlich sind Daten vorhanden, die das Ergebnis einer Modellierung darstellen.

### 3.2 Streckenwartung und Streckenkontrolle

Die straßenbauliche und verkehrstechnische Infrastruktur unterliegt mit der Inbetriebnahme bzw. dem Aufstellen ständigen Beanspruchungen. Für einen sicheren Verkehrsablauf auf Straßen ist ein technisch einwandfreier Zustand dieser Infrastruktur erforderlich. Mängel in der Ausbildung des Straßenraumes sowie an der Ausstattung mit Verkehrszeichen und Verkehrseinrichtungen können zu Verkehrsunfällen führen. Die Vollständigkeit und Richtlinien-Konformität der straßenbaulichen (Fahrbahnoberfläche) und verkehrstechnischen (Fahrbahnmarkierung und Beschilderung) Infrastruktur sollte daher immer gewährleistet werden. Dies setzt eine regel- bzw. turnusmäßige Prüfung voraus.

Im Rahmen ihrer Zuständigkeit sind für den Zustand und die Erhaltung der Straßen die jeweiligen Straßenbaulastträger verantwortlich, für die Sicherheit im Verkehrsablauf in erster Linie die Straßenverkehrsbehörden.

Die Verantwortung der Straßenbaulastträger bzgl. der Verkehrssicherungspflicht besagt für den Straßenverkehr, dass derjenige, der auf Straßen, die seiner Verfügung unterstehen, Straßenverkehr zulässt, die Pflicht hat, hier für einen sicheren Verkehrsablauf zu sorgen. In die Verantwortung der Straßenverkehrsbehörden fällt die Verkehrsregelungspflicht. Diese beschreibt die Aufgabe, den Verkehr durch Verkehrszeichen und -einrichtungen möglichst gefahrlos zu lenken.

In der Regel ist eine Streckenkontrolle immer Bestandteil der Streckenwartung durch den Straßenbetriebsdienst. Während der Streckenwartung werden betriebliche Tätigkeiten geringen Umfangs sofort durchgeführt. Streckenwartungen werden vom Straßenbetriebsdienst in der Regel in Abhängigkeit von Verkehrsbedeutung der Strecke durchgeführt.

Aufgrund immer knapper werdender Haushaltsmittel kann eine bedarfsgerechte Kontrollhäufigkeit jedoch nicht immer sichergestellt werden.

Als Grundlage für den Turnus, in dem die Streckenkontrolle durchzuführen ist, gilt in der Regel ungeachtet von der Klassifizierung der Straße, der auf den einzelnen Streckenabschnitten vorhandene durchschnittlich tägliche Verkehr (DTV) in Kfz/24h. Der DTV wird in der Regel flächendeckend für das klassifizierte Straßennetz alle 5 Jahre erhoben, so dass eine abgestimmte Planung und Durchführung der Streckenwartung erfolgen kann.

So ist beispielsweise eine Streckenkontrolle in Niedersachsen demnach wie folgt zu planen und durchzuführen:

- Straßen mit einem DTV > 9.000 Kfz/24h sind 2-mal pro Woche zu kontrollieren. Die Kontrolle erfolgt pro Woche gegenläufig.
- Straßen mit einem DTV < 9.000 Kfz/24h sind 1-mal pro Woche zu kontrollieren. Somit erfolgt die Kontrolle 14-tägig gegenläufig.
- Bei Straßen mit einem DTV < 2.000 Kfz/24h kann bei der Routenbildung auf die gegenläufige Kontrolle verzichtet werden.
- Bei Vorliegen besonderer Verhältnisse, die insbesondere die Fahrbahnbeschaffenheit betreffen, kann es notwendig werden, über die o. g. Häufigkeiten hinaus zu kontrollieren.
- Nach außergewöhnlichen Ereignissen wie z. B. Sturm, Hochwasser o. Ä. sind zusätzliche Streckenkontrollen durchzuführen.
- Zentrale Einrichtungen, wie Notrufsäulen, Notruftelefone o. Ä., sind gesondert 1-mal im Monat oder aus besonderem Anlass zu kontrollieren.
- In angemessenen Zeitabständen (in der Regel 1-mal pro Jahr) soll eine Nachtkontrollfahrt stattfinden.

Aus Gründen der Rechtssicherheit dürfen die Kontrollhäufigkeiten nicht unterschritten werden. Auch dann nicht, wenn sie sich im Rahmen einer Routenbildung als wirtschaftliche Lösung ergeben. Ungeachtet dessen kann es durchaus wirtschaftlich sein, Streckenabschnitte häufiger als vorgegeben zu kontrollieren, wenn dadurch bei der Routenbildung zeit- und kostenaufwendige Leerfahrten vermieden werden.

### 3.3 Verkehrsschauen

In der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrs-Ordnung (VwV-StVO) zu § 45 Abs. 3 sind regelmäßige Verkehrsschauen vorgeschrieben, die von der Straßenverkehrsbehörde unter Beteiligung der Straßenbaubehörde und der Polizei zu veranlassen sind. Diese werden in der Regel unabhängig von der Streckenwartung und Streckenkontrolle in einem deutlichen größeren zeitlichen Abstand durchgeführt.

Gegenstand der Verkehrsschauen ist vorbeugend die Überprüfung des Zustands und der Sichtbarkeit der Verkehrszeichen und Verkehrseinrichtungen sowie die Beseitigung möglicher Gefahren im öffentlichen Verkehrsraum. Es ist auch zu überprüfen, ob und auf welche vorhandenen Verkehrszeichen und Verkehrseinrichtungen verzichtet werden kann, weil sie nicht mehr zwingend erforderlich sind. In diesem Zusammenhang sollten immer die Gründe, die in der Vergangenheit zur Aufstellung der Verkehrszeichen geführt haben, berücksichtigt werden.

Das „Merkblatt für die Durchführung von Verkehrsschauen“ (M DV) (FGSV, 2013a) beschreibt die Aufgaben von Verkehrsschauen und deren Durchführung für alle Straßen innerhalb und außerhalb geschlossener Ortschaften einschließlich der Bundesautobahnen.

Das M DV unterscheidet regelmäßige und anlassbezogene Aufgaben. Deshalb wird zwischen den in festen Abständen durchzuführenden Regel-Verkehrsschauen und thematischen Verkehrsschauen sowie den Verkehrsschauen aus besonderem Anlass, für die kein Turnus vorgesehen ist, unterschieden (vgl. Tabelle 3-13).

Im M DV werden hier im Einzelnen differenziert:

- Nachtverkehrsschau,
- Bahnübergangsschau,
- Wegweisungsschau.

Für die thematischen Verkehrsschauen gelten grundsätzlich die Ausführungen der Regel-Verkehrsschau. Im M DV werden noch einzelne Aspekte ergänzt, die im Folgenden zusammenfassend dargestellt sind:

- Nachtverkehrsschau
  - Überprüfung der Sichtbarkeit von Verkehrszeichen, Markierung, Verkehrseinrichtungen und Streckenführung bei Dunkelheit,
  - auch Prüfung der Beeinträchtigung durch Lichtquellen des Straßenumfelds sowie
  - Prüfung bei trockener Witterung und aus der Sicht aller Verkehrsteilnehmer.
- Bahnübergangsschau
  - Im Detail ist dies im Leitfaden zur Durchführung von Bahnübergangsschauen geregelt (Eisenbahnbundesamt, 2002).
- Wegweisungsschau
  - Prüfung der Anforderungen an die Erforderlichkeit, Erkennbarkeit, Lesbarkeit und Kontinuität.

Gegenstand einer Regel-Verkehrsschau sind alle Verkehrszeichen einschließlich Fahrbahnmarkierungen und die Verkehrseinrichtungen sowie Gefahren am Fahrbahnrand und im Seitenraum. Dies

Art	Gegenstand der Überprüfung	Straßenkategorien	Turnus
Regel-Verkehrsschau	Verkehrszeichen einschließlich Fahrbahnmarkierungen und Verkehrseinrichtungen, Gefahren am Straßenrand und im Seitenraum	Bundesautobahnen, Bundes-, Landes- und Kreis- sowie Hauptverkehrsstraßen	alle 2 Jahre
		alle übrigen Straßen sowie Straßen und Plätze mit tatsächlich öffentlichen Verkehr	alle 4 Jahre
Nachtverkehrsschau	Verkehrszeichen einschließlich Fahrbahnmarkierungen und Verkehrseinrichtungen, Streckenführung, Beleuchtung von Querungsstellen, Gefahren am Fahrbahnrand und im Seitenraum	Bundesautobahnen, Bundes-, Landes- und Kreis- sowie Hauptverkehrsstraßen	alle 4 Jahre
Bahnübergangsschau	Verkehrszeichen und Verkehrseinrichtungen im Zusammenhang mit schienengleichen Bahnübergängen	alle Straßen	alle 4 Jahre
Wegweisungsschau	Wegweisung	alle Straßen	alle 4 Jahre

Tab. 3-13: Aufgaben und Turnus von Verkehrsschauen nach dem M DV (FGSV, 2013a)

gilt für alle Straßenbestandteile und Sonderwege, z. B. auch für Radverkehrsanlagen und Gehwege. Dynamische Verkehrszeichen wie Wechselverkehrszeichen, Wechselwegweisungen, sonstige dynamische Verkehrsinformationstafeln, Parkleitsysteme, Einrichtungen zur Routenempfehlung sowie alle weiteren veränderlichen Verkehrszeichen und Verkehrseinrichtungen sind ebenso wie die statischen Verkehrszeichen und Verkehrseinrichtungen einzubeziehen.

Zu einer Regel-Verkehrsschau gehören:

- Knotenpunkte: zu überprüfen sind Notwendigkeit, Standort, Zustand, Erkennbarkeit und Widerspruchsfreiheit von
  - vorfahrtregelnder Beschilderung,
  - Fahrtrichtungsbeschilderung und -markierung,
  - weiterer Markierung,
  - Wegweisung und Straßennamensschildern.

Zu beurteilen sind die Sichtbedingungen der Verkehrsteilnehmer bei Annäherung (ausreichende Sichtdreiecke, kein Parken in Sichtdreiecken) sowie die Sicht auf die Verkehrszeichen und Verkehrseinrichtungen). Lichtzeichenanlagen sind bei der Verkehrsschau zu prüfen im Hinblick auf:

- Standort, Zustand und Erkennbarkeit der Signalgeber,
- Übereinstimmung von Pfeilen in Signalgebern und Fahrbahnmarkierung,
- Eindeutigkeit der Vorfahrtsregelung bei Lichtzeichenanlagen außer Betrieb sowie
- Widerspruchsfreiheit zwischen Pfeilen in Signalgebern und Wegweisungen.
- Streckenabschnitte zu überprüfen sind zwingende Notwendigkeit, Standort, Zustand, Erkennbarkeit und Widerspruchsfreiheit von
  - geschwindigkeitsregelnden Verkehrszeichen,
  - Überholverbote durch Verkehrszeichen einschließlich Fahrbahnmarkierungen,
  - übriger Fahrbahnmarkierung,
  - Wegweisung und Straßennamensschildern.

Zu beurteilen sind auch die Erkennbarkeit und Sicht auf Gefahrenstellen. Dazu gehört auch die Über-

prüfung der Beschilderung von Fahrbahnmarkierung an diesen Stellen.

- Fahrbahnränder und Seitenräume: zu überprüfen sind
  - die Seitenräume: gefährliche Hindernisse und Stellen,
  - passive Schutz- und Leiteinrichtungen: Sinnhaftigkeit, richtiger Standort (Beginn/Ende), offensichtliche Mängel,
  - die Flächen des nichtmotorisierten Verkehrs: Nutzbarkeit, Stolpergefahren.
- Tunnel: Ausstattung und Instandhaltung von Tunneln einschließlich der Verkehrszeichen und Verkehrseinrichtungen sind in den Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (FGSV, 2006c) geregelt. Die Strecke innerhalb des Tunnels ist Bestandteil des Straßennetzes und daher wird die dortige Verkehrsregelung im Rahmen der Regelverkehrsschau überprüft.

Nach dem M DV sollte die Regel-Verkehrsschau ein Bestandteil des laufenden Dienstbetriebes werden. Nur so können eine kontinuierliche Pflege und Überprüfung des Straßenraums sichergestellt werden.

### 3.4 Arbeitsstellen

Arbeitsstellen sind unerlässlich, um die Straßeninfrastruktur dauerhaft zu erhalten und gezielt zu erweitern. Dabei muss fast immer in den Verkehr eingegriffen werden, was zu Staus und Reisezeitverzögerungen führen kann. Um diese Störungen möglichst gering zu halten, kommt es auf die richtige Planung und Organisation von Arbeitsstellen sowie eine eindeutige und sichere Verkehrsführung vor, in und nach den Arbeitsstellen an.

Das Ziel der Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen (RSA) (BMVBS, 1995/2002) ist es, Einheitlichkeit und hohe Qualität bei der Ankündigung und Sicherung von Arbeitsstellen auf der Grundlage heutiger verkehrstechnischer Erkenntnisse zu erreichen. Ferner sollen sie dazu beitragen, den Verkehrsablauf im Bereich von Arbeitsstellen zu verbessern.

Die RSA behandeln in Teil A allgemeine Grundsätze für alle möglichen Arten von Arbeitsstellen. Im Ein-

zelen werden die für die Ausstattung notwendigen Elemente wie Verkehrszeichen, Verkehrseinrichtungen, Leitmale, Sicherheitsfahrzeuge und Schutzkleidung für Bedienstete beschrieben. Besonders hervorgehoben wird die Forderung, dass Verkehrszeichen und Einrichtungen an Arbeitsstellen eine gute Nachsichtbarkeit besitzen müssen.

Der Teil B behandelt Arbeitsstellen an Stadtstraßen, wobei auch auf Arbeitsstellen von Geh- und Radwegen sowie im Bereich von Schienenbahnen eingegangen wird.

In Teil C werden Arbeitsstellen an Landstraßen abgehandelt, mit besonderer Aufmerksamkeit für die Festlegung von Höchstgeschwindigkeiten.

Der Teil D enthält die Anforderungen, die an Arbeitsstellen von Autobahnen gestellt werden. In übersichtlichen Tabellen sind u. a. die Mindestbreiten der Behelfsstreifen in Abhängigkeit von der Länge der Arbeitsstelle und an Überleitungen auf die Gegenfahrbahn zusammengestellt.

Die Bereiche B, C und D werden durch systematisch aufgebaute Regelpläne für die verschiedenen Möglichkeiten der Verkehrsführung ergänzt.

### 3.5 Zwischenfazit

Bezüglich der Straßenverkehrsinfrastruktur werden in den Regelwerken für den Neu-, Um- und Ausbau die Verkehrswege Autobahnen, Landstraßen und Stadtstraßen differenziert. In den Richtlinien, Empfehlungen und Hinweisen finden sich detaillierte Regelungen und Hinweise zur baulichen/entwurfstechnischen sowie zur verkehrstechnischen Infrastruktur. Bzgl. der informationstechnischen Infrastruktur liegen zusätzlich Regelungen und Standards für die Datenübertragung (z. B. von einer Streckenstation zu einer Verkehrszentrale) vor. Die Standards (BASt, 1999) (BASt, 2012) sind zu beachten.

Darüber hinaus ist auch eine Vielzahl von Regelungen und Hinweisen vorhanden, die vertieft auf die Kontrolle und den Erhalt der Straßen sowie die Einrichtung von Arbeitsstellen eingehen. Allen diesen Regelungen liegt ein Kontrollturnus zugrunde, der in der Regel in Abhängigkeit von der verkehrlichen Bedeutung oder auch der Verkehrsstärke der Straße variiert. Eine dauerhafte Überwachung bzw. Kontrolle (täglich, stündlich, ...) bestimmter Eigenschaften bzw. Qualitäten ist grundsätzlich nicht ge-

geben. Ausnahmen stellen hier Straßentunnel dar, die aus Sicherheitsgründen einer besonderen Überwachung bedürfen.

Digitale Karten bilden die Grundlage jeder Navigation oder auch der Verortung aller denkbaren verkehrstechnischen Einrichtungen. Zwar steht mit dem World Geodetic System 1984 (WGS 84) seit längerem ein geodätisches Referenzsystem als einheitliche Grundlage für Positionsangaben auf der Erde zur Verfügung, ein einheitlicher hierauf basierender Kartenstandard ist aktuell jedoch noch nicht vorhanden. Dies resultiert vor allem aus den verschiedenen Anforderungen und Anwendungen auf Seiten der Straßenbauverwaltungen oder auch der Automobilindustrie. Der NDS-Standard soll hier künftig eine Lösung darstellen. Unklar ist an dieser Stelle aber noch, ob beispielsweise andere Daten (z. B. vom Datenportal mCLOUD) diesen Standard bereits nutzen.

Sämtliche Regelungen wurden entsprechend der Anforderungen von menschlichen Verkehrsteilnehmern gestaltet und orientieren sich daher an den Möglichkeiten eines vom Menschen gesteuerten Fahrzeugs. Abweichende Anforderungen an die Infrastruktur durch automatisiertes Fahren wurden bislang in den Regelwerken nicht berücksichtigt. Eine Anpassung ist wünschenswert, sodass die Belange des automatisierten Fahrens zum Beispiel bei Streckenkontrollen oder auch Verkehrsschauen mitberücksichtigt werden. Ansätze finden sich vereinzelt in ausgewählten Forschungs- und Entwicklungsvorhaben für ausgewählte Teilnetze oder auch Zeiträume.

## 3.6 Technologie für automatisiertes Fahren

### 3.6.1 Einleitung

Im Folgenden wird ein Überblick über vergangene und aktuelle Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Themengebiet der Fahrzeugautomatisierung gegeben. Besonders die aktuellen Schwächen der Verwendung bordeigener Sensorik von automatisierten Fahrzeugen bieten Potenzial für die Ableitung von sinnvollen Infrastrukturmaßnahmen. Das Kapitel beginnt mit einem kurzen Abschnitt zur Terminologie und einer Beschreibung einer möglichen funktionalen Systemarchitektur für automatisierte Fahrzeuge, gefolgt von einem Überblick über vergangene Forschungsprojekte zur Automatisierung

von Fahrzeugen mit und ohne Bezug zur Infrastruktur. Abschließend werden die aktuellen Herausforderungen skizziert.

### 3.6.2 Automatisierungsgrade

Unter automatisiertem Fahren wird die Forschung im Hinblick auf die Erhöhung des Automatisierungsgrads von Fahrzeugen verstanden. Hierfür hilfreich sind die Automatisierungsgrade nach (GASSER et al., 2012), die eine Abstufung der Automatisierung unter der Berücksichtigung verschiedener Merkmale ermöglichen.

Eine Erweiterung dieser Automatisierungsgrade wurde von der Society of Automotive Engineers (SAE International, 2014 (überarbeitet 2016)) vorgenommen.

Wesentlicher Aspekt der von (GASSER et al., 2012), als hochautomatisiert beziehungsweise von (SAE International, 2014 (überarbeitet 2016)) als Conditional Automation bezeichneten Fahrzeugführungssysteme ist die nicht mehr notwendige dauerhafte Überwachung des elektronischen Fahrzeugführungssystems durch den Menschen. Diese stellt technisch eine sehr große Herausforderung dar. Bisher sind keine Fahrzeuge im öffentlichen Straßenverkehr bekannt, die ohne eine dauerhafte Überwachung durch den Menschen bzw. Fahrer auskommen.

Unter automatisiertem Fahren werden im Folgenden das nach (GASSER et al., 2012), hochauto-

matisiert genannte Fahren und Funktionen mit darüberhinausgehendem Automatisierungsgrad verstanden.

Die Definition der Automatisierungsgrade wird in diesem Projekt aus (GASSER et al., 2012), und (SAE International, 2014 (überarbeitet 2016)) übernommen. Eine Zusammenfassung der daraus resultierenden Automatisierungsgrade wird beispielsweise in (BARTELS, EBERLE & KNAPP, 2015) gegeben.

Tabelle 3-14 gibt die Automatisierungsgrade und Definitionen an, die im Deutschen verwendet werden.

Nach dem SAE Standard J3016 werden folgende Level 0 bis Level 5 der Automatisierung unterschieden<sup>5</sup>:

- Level 0 – Keine Automatisierung,
- Level 1 – Fahrassistentz,
- Level 2 – Teil-Automatisierung,
- Level 3 – Bedingte Automatisierung,
- Level 4 – Hohe Automatisierung,
- Level 5 – Voll-Automatisierung.

<sup>5</sup> Quelle: [https://www.sae.org/standards/content/j3016\\_201806/](https://www.sae.org/standards/content/j3016_201806/) (SAE International, 2014 (überarbeitet 2016))

Nomenklatur	Beschreibung Automatisierungsgrad und Erwartung des Fahrers	Beispielhafte Systemausprägung
Driver Only	Fahrer führt dauerhaft (während der gesamten Fahrt) die Längsführung (Beschleunigen/Verzögern) und die Querrführung (Lenken) aus	Kein in die Längs- oder Querrführung eingreifendes (Fahrerassistenz-)System aktiv
Assistent	Fahrer führt dauerhaft <u>entweder</u> die Quer- <u>oder</u> die Längsführung aus. Die jeweils andere Fahraufgabe wird in gewissen Grenzen vom System ausgeführt: <ul style="list-style-type: none"> <li>• der Fahrer muss das System dauerhaft überwachen</li> <li>• der Fahrer muss jederzeit zur vollständigen Übernahme der Fahrzeugführung bereit sein</li> </ul>	Adaptive Cruise Control: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Längsführung mit adaptiver Abstands- und Geschwindigkeitsregelung</li> </ul> Parkassistent: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Querrführung durch Parkassistent (automatisches Lenken in Parklücken, der Fahrer steuert die Längsführung)</li> </ul>
Teilautomatisiert	Das System übernimmt Quer- <u>und</u> Längsführung (für einen gewissen Zeitraum und/oder in spezifischen Situationen): <ul style="list-style-type: none"> <li>• der Fahrer muss das System <u>dauerhaft</u> überwachen</li> <li>• der Fahrer muss jederzeit zur vollständigen Übernahme der Fahrzeugführung bereit sein</li> </ul>	Autobahnassistent: <ul style="list-style-type: none"> <li>• automatische Längs- und Querrführung</li> <li>• auf Autobahnen bis zu einer oberen Geschwindigkeitsgrenze</li> <li>• Fahrer muss dauerhaft überwachen und bei Übernahmeaufforderung sofort reagieren</li> </ul>

Tab. 3-14: Benennung und Klassifizierung automatisierter Fahrfunktionen aus (GASSER et al., 2012)

Nomenklatur	Beschreibung Automatisierungsgrad und Erwartung des Fahrers	Beispielhafte Systemausprägung
Hochautomatisiert	<p>Das System übernimmt Quer- und Längsführung für einen gewissen Zeitraum in spezifischen Situationen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• der Fahrer muss das System dabei <u>nicht</u> dauerhaft überwachen</li> <li>• bei Bedarf wird der Fahrer zur Übernahme der Fahraufgabe mit ausreichender Zeitreserve aufgefordert</li> <li>• Systemgrenzen werden alle vom System erkannt. Das System ist nicht in der Lage, aus jeder Ausgangssituation den risikominimalen Zustand herbeizuführen</li> </ul>	<p>Autobahn-Chauffeur:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• automatische Längs- und Querführung</li> <li>• auf Autobahnen bis zu einer oberen Geschwindigkeitsgrenze</li> <li>• Fahrer muss nicht dauerhaft überwachen und nach Übernahmeaufforderung mit gewisser Zeitreserve reagieren</li> </ul>
Vollautomatisiert	<p>Das System übernimmt Quer- und Längsführung vollständig in einem definierten Anwendungsfall:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• der Fahrer muss das System dabei <u>nicht</u> überwachen</li> <li>• vor dem Verlassen des Anwendungsfalles fordert das System den Fahrer mit ausreichender Zeitreserve zur Übernahme der Fahraufgabe auf</li> <li>• erfolgt dies nicht, wird in den risikominimalen Systemzustand zurückgeführt</li> <li>• Systemgrenzen werden alle vom System erkannt; das System ist in der Lage in den risikominimalen Systemzustand zurückzuführen</li> </ul>	<p>Autobahnpiilot:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• automatische Längs- und Querführung</li> <li>• auf Autobahnen bis zu einer oberen Geschwindigkeitsgrenze</li> <li>• Fahrer muss nicht überwachen</li> <li>• reagiert Fahrer nicht auf eine Übernahmeaufforderung so bremst das Fahrzeug in den Stillstand herunter</li> </ul>

Tab. 3-14: Fortsetzung

Im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens werden im Folgenden nur die Automatisierungsgrade hoch- und vollautomatisiert nach (GASER et al., 2012) bzw. die SAE-Level 3 bis 5 nach (SAE International, 2014 (überarbeitet 2016)) betrachtet. Dabei entspricht hochautomatisiert dem Level 3 und vollautomatisiert dem Level 4 und 5.

### 3.6.3 Definition des sicheren Zustandes

Ein häufig verwendeter Begriff im Zuge der Automatisierungsgrade ist der „sichere Zustand“. Häufig wird in diesem Zusammenhang auch von einem „risikominimalen“ Zustand gesprochen (vgl. Tabelle 3-14). Dieser Zustand soll erreicht werden, wenn es zu technischen Problemen kommt oder sich das Fahrzeug in Szenarien außerhalb seiner Systemgrenzen befindet.

Im Folgenden sollen diese Begriffe näher betrachtet werden. Als Basis werden dafür die Veröffentlichung (RESCHKA & MAURER, 2015) und (RESCHKA, 2016) verwendet.

Nach Norm ISO 26262 befindet sich ein System in einem „sicheren Zustand“, wenn von dem System oder der Anordnung von Systemen kein unzumutbares Risiko für involvierte Personen ausgeht ((ISO), 2011). Ein System muss also stets in einem sicheren Zustand betrieben werden. Daraus folgt, dass ein automatisiertes Fahrzeug keinen unsicheren Zustand erreichen darf. Das Erreichen eines sicheren

Zustands muss daher ein Erhalten des sicheren Zustands sein – selbst bei technischen Fehlern und Änderungen des Umfelds. Für automatisierte Fahrzeuge ist der sichere Zustand ein sicherer Fahrzustand, von dem kein unzumutbares Risiko für die Insassen und weitere Verkehrsteilnehmer ausgeht.

Bei dieser Definition wird davon ausgegangen, dass es gemäß Norm ISO 26262 eine je nach Automobilsicherheitslevel (ASIL) resultierende Wahrscheinlichkeit gibt, dass es dennoch zu unsicheren Zuständen kommen kann.

Der Begriff „risikominimaler Zustand“ ist in diesem Zusammenhang ungeeignet. Ein minimales Risiko besteht bei einem automatisierten Fahrzeug im Stillstand, wenn keine Passagiere an Bord sind und keine weiteren Verkehrsteilnehmer in der Nähe sind. Dies würde seinen Nutzen ebenfalls minimieren. Gemeint ist daher die Minimierung des Risikos innerhalb eines Szenarios. Dies ist jedoch ebenfalls nichtzutreffend, da ein solcher Zustand unsicher sein kann.

Des Weiteren ist eine Minimierung des Risikos nicht immer notwendig. Der Straßenverkehr birgt ein inhärentes Risiko, welches von menschlichen Fahrern akzeptiert wird. Es ist derzeit noch nicht erforscht, ob sich diese Akzeptanz auf maschinelle Fahrer übertragen lässt. Es kann somit zunächst davon ausgegangen werden, dass zur Erhaltung eines sicheren Zustands daher keine Minimierung

des Risikos erforderlich ist, sondern ein Risikomanagement, das stets ein vertretbares Risiko erhält.

Für die Praxis bedeutet dies, dass beispielsweise auf einer Autobahn nur so schnell und so dicht hinter einem anderen Verkehrsteilnehmer gefahren werden darf, dass ein eigener technischer Defekt, eine Beschädigung der Straße, ein plötzlich auftauchendes Hindernis oder auch eine anderweitige Störung rechtzeitig wahrgenommen werden können, um hierauf sicher reagieren zu können. Es gilt hierbei mit zu berücksichtigen, dass viele Defekte sich praktisch nicht beherrschen lassen wie z. B. ein platzender Reifen oder eine ESP-Fehlregelung.

### 3.6.4 Funktionale Systemarchitektur für automatisierte Fahrzeuge

Mit einer gewissen Abstraktion weisen heutige sowie historische Ansätze bezogen auf ihre funktionale Systemarchitektur große Ähnlichkeit auf. Die von MATTHAEI und MAURER (2015) entworfene funktionale Systemarchitektur bietet solch eine abstrakte Sicht auf Systeme zur Automation von Fahrzeugen. Sie ermöglicht die Darstellung von assistierten bis zu vollautomatisierten Systemen (wie auch fahrerlosen Systemen).

Im Folgenden wird diese Architektur bzw. der aktuell diskutierte Stand am Institut für Regelungstechnik der TU Braunschweig genutzt, um den Stand der Wissenschaft und Technik bezogen auf Komponenten eines automatisierten Fahrzeugs zu diskutieren.

Bild 3-12 zeigt diese funktionale Systemarchitektur für automatisierte Fahrzeuge.

Eine automatisierte Fahrfunktion wird in diesem Schema in drei wesentliche Komponenten unterteilt:

- Lokalisierung und Karten,
- Umfeld- und Selbstwahrnehmung,
- Planung und Regelung.

Über die bordeigene Umfeld- und Fahrzeugsensoren werden das Umfeld sowie der Zustand des Fahrzeugs wahrgenommen. Der Wahrnehmungsprozess erzeugt eine interne Repräsentation der Umwelt. In diesem Prozess können auch Informationen aus digitalen Karten genutzt werden. Dazu ist es notwendig, das eigene Fahrzeug relativ zu der Karte zu lokalisieren. Auf Basis dieser internen Repräsentation wird das Verhalten des Fahrzeugs gemäß der Spezifikation der automatisierten Fahrfunktion

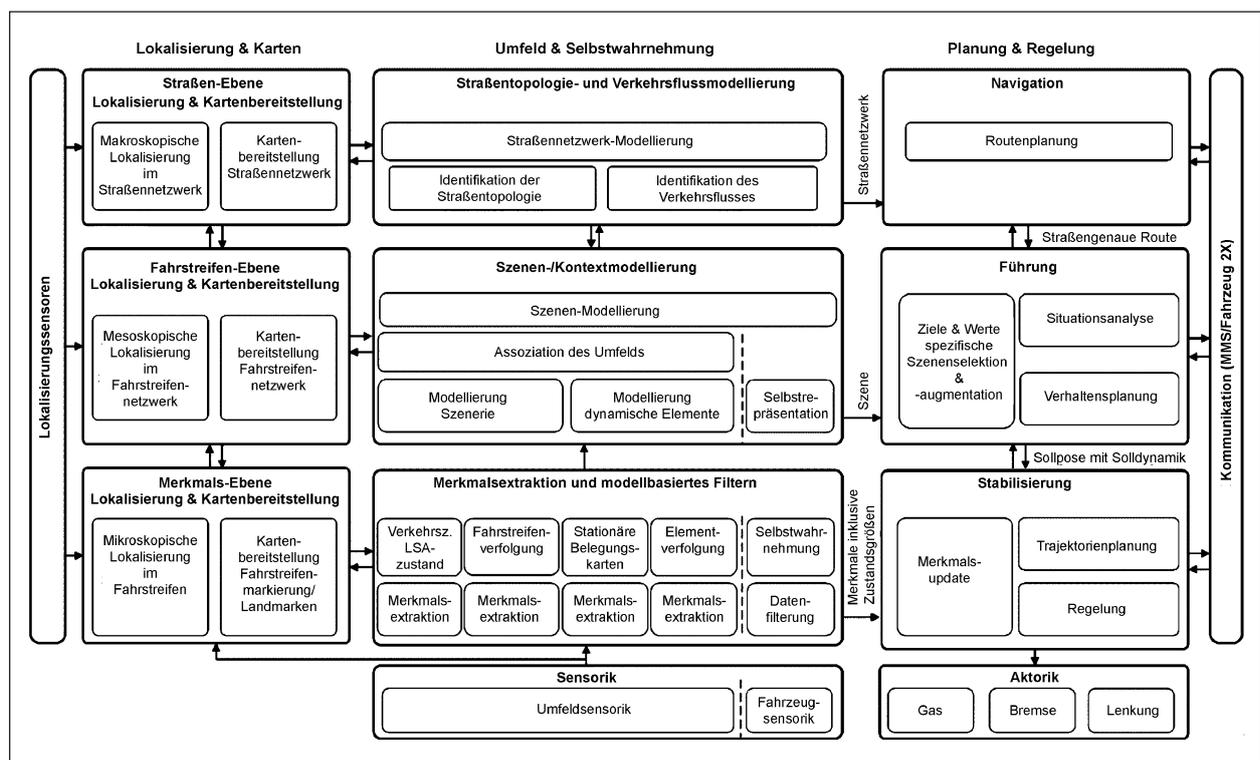


Bild 3-12: Funktionale Systemarchitektur für automatisierte Fahrzeuge; Diskussionsstand am Institut für Regelungstechnik, TU Braunschweig

generiert. In heutigen Systemen wird im Prozess der Verhaltensgenerierung in der Regel zunächst das zukünftige Verhalten des Fahrzeugs für einen gewissen Zeithorizont geplant. Ein wesentliches Ergebnis der Verhaltensplanung ist ein Bewegungsplan in Form einer Trajektorie oder Bahn, der das Fahrzeug folgen soll. Die Stellwerte für die Aktoren zur Beeinflussung der Längs- und Querverführung ergeben sich dann aus einer geeigneten Vorsteuerung und Regelung. Im Prozess der Verhaltensgenerierung werden zudem Eingaben des Fahrers sowie von anderen Verkehrsteilnehmern oder der Verkehrsinfrastruktur übermittelte Informationen berücksichtigt.

Eine im Folgenden wichtige Unterscheidung ist die zwischen bordautonomen und nicht bordautonomen Systemen. Ein System wird nachfolgend als bordautonom bezeichnet, wenn es sein Umfeld nur über die bordeigene Sensorik wahrnimmt und dazu nicht auf Kartendaten oder andere externe Informationsquellen zurückgreift. Ein System kann zudem rein bordautonom arbeiten oder eine bordautonome Grundfunktionalität bieten, zur Steigerung der Performanz aber externe Daten mit einbeziehen (um zum Beispiel frühzeitiger und somit komfortabler verzögern zu können). Für die folgende Diskussion ist vor allem interessant, ob ein System zwingend auf externe Daten angewiesen ist.

### 3.6.5 Planung und Regelung

Der Prozess der Verhaltensplanung und Bewegungsregelung wird von MATTHAEI und MAURER (2015) nach DONGES (1982) (siehe auch DONGES (2015)) in drei Ebenen unterteilt. Diese unterscheiden sich im betrachteten Planungshorizont und im Abstraktionsgrad bezogen auf die Repräsentation von Umwelt, eigenen Handlungsfähigkeiten und eigenen Handlungszielen.

Die Navigationsebene hat den weitesten Planungshorizont und stellt die höchste Abstraktionsebene dar. Die Aufgabe auf dieser Ebene ist das Fahrzeug durch das Straßennetz beispielsweise zu einem Zielort zu navigieren. Auf der Führungsebene wird die Situation des Fahrzeugs in Hinblick auf die eigenen Ziele, z. B. abgeleitet aus der geplanten Route, unter der gegebenen lokalen Verkehrsszene betrachtet. Basierend auf der Bewertung der Situation werden die Werte der Führungsgrößen für die Stabilisierungsebene generiert. Auf dieser Ebene wird beispielsweise entschieden, ob ein Über-

holmanöver durchgeführt wird oder ob die Lücke zum Vorderfahrzeug vergrößert wird, um einem anderen Fahrzeug einen Fahrstreifenwechsel zu ermöglichen. Die Navigations- und die Führungsebene werden wegen der unterschiedlichen Planungshorizonte (global gegenüber lokal bzw. langfristig gegenüber kurzfristig) häufig auch als strategische und taktische Ebene bezeichnet. Die Stabilisierungsebene arbeitet rein operativ, die Aufgabe ist hier, die Vorgaben der überlagerten Ebenen möglichst genau umzusetzen. Eine solche Vorgabe kann beispielsweise eine abzufahrende Trajektorie sein. Eine Trajektorie reicht in der Regel mehrere Sekunden in die Zukunft, im Regelfall wird sie allerdings mehrmals pro Sekunde neu geplant. Aus diesem Grund kann die Trajektoriengenerierung, von MATTHAEI et al. (2015) bewusst Trajektorienberechnung genannt, auch der Stabilisierungsebene zugerechnet werden.

### 3.6.6 Umfeld- und Selbstwahrnehmung

Wahrnehmungsseitig werden von MATTHAEI und MAURER (MATTHAEI & MAURER, 2015) entsprechende Abstraktionsebenen identifiziert. Auf unterster Ebene werden aus den Daten der Umfeldsensoren Merkmale straßenbaulicher Infrastruktur, verkehrstechnischer Infrastruktur, verschiedenartiger Verkehrsteilnehmer und von Hindernissen extrahiert und zeitlich verfolgt. Auf diese Weise werden beispielsweise Informationen über Position und Verlauf von Fahrbahnmarkierungen, Lage und Bedeutung von vertikalen Verkehrszeichen oder Lage, Bewegung und Form anderer Fahrzeuge gewonnen. Über die Fahrzeugsensoren werden beispielsweise Raddrehzahlen, Beschleunigungen oder der Füllstand des Kraftstofftanks gemessen. Für die Stabilisierung des Fahrzeugs sind insbesondere Position und gegebenenfalls die Dynamik von Elementen des Umfelds sowie die Eigenbewegung relevant.

Auf der nächst höheren Ebene, von MATTHAEI (2015) Kontextmodellierung genannt, werden die zunächst voneinander unabhängigen Informationen miteinander verknüpft. Beispielsweise werden aus separaten Fahrstreifen- oder Fahrbahnbegrenzungen Fahrstreifen gebildet. Des Weiteren werden Schilder, Wechselverkehrszeichen, Lichtsignalanlagen oder andere Fahrzeuge (je nach ihrer Position) den gebildeten Fahrstreifen zugeordnet oder es wird anhand der gefahrenen Trajektorie erkannt, ob andere Fahrzeuge den gebildeten Fahrstreifen fol-

gen oder auch einen Fahrstreifenwechsel durchführen.

Diese abstrahierte Repräsentation der Umwelt des Systems wird häufig als Szene bezeichnet (ULBRICH, RESCHKA, MENZEL, SCHULDT & MAURER, 2015). Sie dient als Grundlage für die Planung auf der Führungsebene.

### 3.6.7 Lokalisierung und Karten

Neben der Wahrnehmung über die bordeigene Sensorik können Informationen über das Umfeld auch durch externe Quellen erlangt werden, dazu gehören auf dem Fahrzeug hinterlegte Kartendaten. Sie können Informationen in verschiedenen Detaillierungsstufen enthalten, von der Topologie des Straßennetzes bis hin zur Geometrie von Fahrstreifenverläufen. In diesen digitalen Karten können weiter Verkehrszeichen und prinzipiell beliebige für die Fahraufgabe nützliche Informationen eingetragen sein (beispielsweise Abschnitte, in denen eine besonders vorsichtige Fahrweise angebracht ist). Um die Daten nutzen zu können, muss die Lage des eigenen Fahrzeugs relativ zum Bezugssystem der Karte bestimmt werden. Der Prozess der kartenrelativen Lokalisierung ist in der Regel zugleich eine globale Lokalisierung, da die Kartendaten üblicherweise in einem erdfesten, globalen Koordinatensystem verwaltet werden.

### 3.6.8 Fahrzeug-zu-X-Kommunikation

Weitere externe Informationsquellen sind die Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Kommunikation und Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation, zusammengefasst unter dem Begriff Vehicle-to-X (V2X). Entsprechend ausgerüstet können Fahrzeuge beispielsweise Eingriffe der elektronischen Stabilitätsregelung (ESC) oder Notbremsungen melden und so den nachfolgenden Verkehr warnen. Lichtsignalanlagen können Informationen über ihre aktuelle Phase und deren zukünftigen Verlauf übermitteln, außerdem lassen sich von einem zentralen Server aggregierte Informationen über einen vorausliegenden Stau kommunizieren. Die übertragenen Informationen haben allgemein einen Bezug zu einem Ort oder einem Gebiet und können daher mit den digitalen Karten verknüpft werden. Prinzipiell ist es über diesen Kanal auch möglich die auf dem Fahrzeug hinterlegten Kartendaten zu aktualisieren oder Abweichungen zwischen digitaler Karte und dem über die

bordeigene Sensorik wahrgenommenen Umfeld zurückzumelden. Zum Austausch der Informationen ist ein gemeinsames Bezugssystem notwendig, die globale Lokalisierung des eigenen Fahrzeugs ist also auch hier Voraussetzung.

### 3.6.9 Mensch-Maschine-Schnittstelle

Die Interaktion des Systems mit dem Fahrer (sofern präsent) kann ebenfalls auf verschiedenen Abstraktionsebenen stattfinden. Über die heutigen primären Bedienelemente wie Lenkrad und Pedalerie kann der Fahrer direkt die Aktorik des Fahrzeugs steuern. Eine kooperative Fahrzeugführung von Fahrer und System über die primären Bedienelemente im Sinne der H-Metapher (der Betrachtung des Fahrer-Fahrzeug-Systems analog zum Reiter-Pferd-System) findet auf der Stabilisierungsebene und der Führungsebene statt. Manöver können beispielsweise vom System vorgeschlagen und vom Fahrer ausgelöst werden. Die Ausführung des Manövers, das heißt die Ausgestaltung der gefahrenen Trajektorie, erfolgt kooperativ. Als Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine dienen Bedienelemente wie ein aktives Lenkrad oder aktive Sidesticks.

Bei einer manöverbasierten Fahrzeugführung im Sinne von Conduct-by-Wire löst der Fahrer Manöver aus, die vom System alleine ausgeführt werden. Hier findet die Interaktion auf der Führungsebene statt. Auf der Navigationsebene kann der Fahrer beispielsweise ähnlich wie bei herkömmlichen Navigationssystemen einen Zielort angeben und Parameter einstellen, nach denen eine Route optimiert wird. Die Route dient dann – je nach Einbindung des Fahrers in die Fahrzeugführung – zur Generierung von Manöverempfehlungen oder als Vorgabe für eine vollständig automatisierte Führungsebene.

## 3.7 Überblick über die Leistungsfähigkeit automatisierter Fahrzeuge als Gesamtsystem

Die Forschung und Entwicklung zum automatisierten Fahren lässt sich bislang grob in drei Phasen unterteilen: angefangen mit auf der Modifikation der Straßeninfrastruktur basierenden Ansätzen (infrastrukturbasierte Ansätze); gefolgt von bordautonomen Ansätzen in autobahnähnlichen Umgebungen

ab Mitte der 1980er Jahre; gefolgt von auf hochgenauen digitalen Karten der Straßeninfrastruktur basierenden Ansätzen ab Mitte der 2000er Jahre (kartenbasierte Ansätze).

### 3.7.1 Infrastrukturbasierte Ansätze

Aufgrund der zunächst nicht vorhandenen Fähigkeit Fahrbahnen und Fahrbahnmarkierungen über Sensorik wahrzunehmen, basierten erste Versuche zum automatisierten Fahren auf einer Modifikation der Straßeninfrastruktur (Schwerpunkt bis Anfang der 1990er Jahre). So wurden Fahrbahnen beispielsweise mit elektrischen Leitungen ausgestattet, die von der Sensorik eines automatisierten Fahrzeugs erkannt werden konnten (FENTON, 1970; ZHANG, PARSONS & WEST, 1990).

Dadurch war es dem Fahrzeug möglich, den Leitungen und somit einem Fahrbahn- oder Fahrstreifenverlauf zu folgen. Bei ähnlichen Ansätzen zu tomatisierten Querführung wurden Fahrstreifen durch in die Fahrbahn integrierte Permanentmagnete oder durch eine in schmalen Streifen aufgetragene Beschichtung mit erhöhter Reflektivität für Radarwellen markiert (SHLADOVER, 2007; THORPE, JOCHEM & POMERLEAU, 1997).

Wesentlicher Aspekt dieser Ansätze war die Führung des Fahrzeugs innerhalb eines dafür ausgerüsteten Fahrstreifens. Fahrmanöver, wie z. B. dem Verkehrsgeschehen angepasste Fahrstreifenwechsel, waren mit dieser Technologie nicht möglich.

### 3.7.2 Bordautonome Ansätze

Durch die Fortschritte in der Bildsensorik und der Bildverarbeitung, ermöglicht vor allem durch die Leistungszunahme von Rechnersystemen, wurde es möglich, Fahrbahnmarkierungen maschinell mithilfe von Kamerasensorik wahrzunehmen. Diese Technik ermöglichte in den 1980er und 1990er Jahren Erprobungsfahrten im öffentlichen und nicht öffentlichen Straßenverkehr unter ausschließlicher Verwendung der bordeigenen Sensorik und ohne Modifikationen der Infrastruktur (DICKMANNNS et al., 1994; ULMER, 1994; POMERLEAU & JOCHEM, 1996).

Das Einsatzgebiet war auf Straßen beschränkt, auf denen Fahrstreifen in der Regel durchgängig und gut sichtbar markiert sind, beispielsweise Autobahnen oder Highways. 1994 konnte auf einer Auto-

bahnfahrt in Paris und 1995 auf einer 1.758 km langen Autobahnfahrt von München nach Odense ein Großteil der Strecke mit automatisierter Quer- und Längsführung zurückgelegt werden (MAURER, BEHRINGER, FÜRST, THOMANEK & DICKMANNNS, 1996; DICKMANNNS et al., 1994). Fahrstreifenwechsel wurden manuell ausgelöst und automatisiert ausgeführt. Die maximal im automatisierten Betrieb erreichte Geschwindigkeit betrug 180 km/h. Andere Versuchsträger mit ausschließlich automatisierter Querführung erreichten einen Anteil an automatisierter Fahrt von 98 % bei einer Gesamtdistanz von 4.587 km auf amerikanischen Highways (POMERLEAU & JOCHEM, 1996) und von 85 % bis 95 % bei einer Gesamtdistanz von 1.860 km (BROGGI, BERTOZZI & FASCIOLI, 1999).

Bei den Erprobungsfahrten war jeweils ein Sicherheitsfahrer dauerhaft bereit die Fahrzeugführung unverzüglich zu übernehmen. Komplexere Situationen wie Arbeitsstellen wurden nicht beherrscht. Der Funktionsumfang der Versuchsträger war im Wesentlichen auf die Stabilisierungsebene beschränkt, da hauptsächlich das Halten des Fahrstreifens, das Halten einer Geschwindigkeit oder das Halten eines Abstandes zu anderen Verkehrsteilnehmern automatisch realisiert wurde.

### 3.7.3 Kartenbasierte Ansätze

Die Entwicklung in den 2000er Jahren wurde in großem Maße von drei Wettbewerben der Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) der Vereinigten Staaten von Amerika zu autonomen Fahrzeugen getrieben. Nach zwei Wettbewerben mit der Aufgabe, ein fahrerloses Fahrzeug eine Fahrmission (hier das Passieren einer Folge von Wegpunkten) in freiem Gelände erfüllen zu lassen (THRUN et al., 2006; SINGH, 2006) schloss sich 2007 mit der DARPA Urban Challenge ein Wettbewerb zum autonomen Fahren in städtischen Umgebungen an. Die Aufgabe für die Teilnehmer war, ein fahrerloses Straßenfahrzeug eine Fahraufgabe in einer Umgebung ähnlich eines amerikanischen vorstädtischen Wohngebiets erfüllen zu lassen.

Im Unterschied zu früheren Demonstrationen erweiterte sich die Menge der zu beherrschenden Domänen um einfache plangleiche Kreuzungen (all-way-stops) ohne Lichtsignalanlagen und Parkplätze. Dabei war gefordert die kalifornische Straßenverkehrsordnung einzuhalten, insbesondere die Vorfahrtsre-

regelung an den Kreuzungen. Neben der (frei wählbaren) bordeigenen Sensorik stand den Fahrzeugen als externe Informationsquelle eine digitale, fahrstreifengenaue Karte des Straßennetzes zur Verfügung. Zur Lokalisierung war die Nutzung eines globalen Navigationssatellitensystems erlaubt. Alle am Wettbewerb teilnehmenden Fahrzeuge fuhren (bis zu ihrem möglichen Ausscheiden) gleichzeitig und mussten somit miteinander interagieren. Weitere Verkehrsteilnehmer waren Fahrzeuge mit menschlichen Fahrern.

Der Wettbewerb wurde von mehreren Teilnehmern erfolgreich beendet (URMSON et al., 2008; MONTEMERLO et al., 2008; SINGH, 2008; SINGH, 2008; SINGH, 2008). In allen Wettbewerben wurden die Fahrzeuge während ihrer fahrerlosen Fahrt von außen überwacht und im Notfall über Funk gestoppt.

Aufbauend auf den Erfahrungen der Urban Challenge wurden an verschiedenen Forschungseinrichtungen neue Versuchsträger aufgebaut (GOEBL et al., 2008; WILLE, SAUST & MAURER, 2010; LEVINSON et al., 2011). Um automatisierte Fahrfunktionen im öffentlichen Straßenverkehr und vor allem in komplexen innerstädtischen Umgebungen zu erproben, verwendeten nachfolgende Forschungsprojekte weiterhin kartenbasierte Ansätze (WILLE, SAUST & MAURER, 2010; THRUN, 2010; ARDELT & WALDMANN, 2011; ZIEGLER et al., 2014; GOEBL et al., 2008). Zu weiteren Demonstrationsfahrten gibt es keine oder nur unklare Angaben darüber, inwieweit die dargestellten automatisierten Fahrfunktionen unabhängig von Kartendaten beziehungsweise bordautonom waren (BROGGI et al., 2014; AUDI AG, 2015; Delphi Automotive PLC, 2015).

### **3.8 Leistungsfähigkeit der Umfeldwahrnehmung und Kontextmodellierung von automatisierten Fahrzeugen**

Eine Einschätzung der Leistungsfähigkeit der Umfeldwahrnehmung der verschiedenen Versuchsträger in Bezug auf bestimmte automatisierte Fahrfunktionen ist auf Grundlage der zugänglichen wissenschaftlichen Literatur nur schwer möglich, da öffentliche Erprobungsfahrten weder unter streng kontrollierten Bedingungen wie bei der DARPA Urban Challenge stattfanden noch die Performanz der Systeme in ähnlicher Weise öffentlich dokumentiert

wurde wie bei den Erprobungsfahrten der 1990er Jahre. Aufgrund dessen wird im Folgenden der Stand der Wissenschaft und Technik in Bezug auf abstrakte Komponenten eines automatisierten Fahrzeugs unter Berücksichtigung der zugänglichen wissenschaftlichen Literatur diskutiert. Dabei sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass zu vielen Forschungsprojekten keine oder nur einzelnen Subkomponenten betreffende wissenschaftliche Publikationen vorhanden sind. Ein Versuch Projekte miteinander zu vergleichen wurde in MATTHAEI et al. (MATTHAEI & MAURER, 2015) unternommen. Die darin und hier behandelten Projekte verfügten alle über einen Sicherheitsfahrer an Bord des Fahrzeugs.

Die größte Herausforderung für das automatisierte Fahren ist heutzutage das maschinelle Wahrnehmen und Verstehen des Fahrzeugumfelds über die bordeigene Sensorik (MATTHAEI et al., 2015). Vor allem das Wahrnehmen und Verstehen des stationären Umfelds, das heißt der straßenbaulichen und der verkehrstechnischen Infrastruktur (BAR HILLEL, LERNER, LEVI & RAZ, 2014), stellt hohe Anforderungen. Ein starkes Indiz hierfür ist, dass Demonstrationen automatisierter Fahrfunktionen im öffentlichen Straßenverkehr in den vergangenen Jahren, soweit technische Details veröffentlicht wurden, auf hochgenauen Kartendaten basierten (WILLE, SAUST & MAURER, 2010; THRUN, 2010; ARDELT & WALDMANN, 2011; ZIEGLER et al., 2014).

Auch Ansätze, die hauptsächlich auf der bordeigenen Wahrnehmung basieren, waren mindestens teilweise auf Kartendaten angewiesen (LEONARD et al., 2009; BROGGI et al., 2014) oder stark für eine ausgewählte Strecke optimiert (BROGGI et al., 2014). Auch waren die Ansätze häufig auf vergleichsweise einfach strukturierte Umgebungen wie unbefestigte Wege beschränkt (MANZ, HIMMELSBACH, LUETTEL & WUENSCHEN, 2011; BAYERL & WUENSCHEN, 2014).

Die Systeme der 1990er Jahre stellten im Wesentlichen einen Regelkreis auf der Stabilisierungsebene dar (POMERLEAU & JOCHEM, 1996). Die heutige Forschung hat vor allem das Verständnis einer Verkehrsszene zum Ziel, um darauf aufbauend Entscheidungen auf Führungsebene treffen zu können. Das Verstehen der Verkehrsszene ist zudem Voraussetzung für das Prädizieren der Szene über einen Zeitraum von mehreren Sekunden. Beispielsweise ermöglicht eine Zuordnung von Fahrzeugen zu Fahrstreifen Fahrzeugbewegungen entlang von

Fahrstreifen zu präzisieren. Die Information über vorausliegende Geschwindigkeitsbegrenzungen ermöglicht ggf. ein baldiges Verzögern eines Vorderfahrzeugs vorauszuahnen.

Bei der Wahrnehmung von Fahrbahn und verkehrstechnischer Infrastruktur stellt vor allem das Verständnis der Straßeninfrastruktur eine große Herausforderung dar. Die Zuordnung von Verkehrszeichen und Lichtsignalanlagen zu Fahrstreifen und die Bedeutung dieser für die Fahrentscheidung erfordern eine höhere Leistungsfähigkeit der Umfeldwahrnehmung als deren reine Erkennung in Bildern oder anderen Daten. Besonders das rechtzeitige Erkennen von Gefahrenstellen mit kurzen Reaktionszeiten und plötzlich auftretenden Hindernissen erscheint aktuell als noch nicht gelöst. Beispiele hierfür sind: Wild, das plötzlich auf die Fahrbahn springt, Glätte und Aquaplaning, kleine Hindernisse, die nur schlecht oder überhaupt nicht wahrnehmbar sind, sowie weitere Verkehrsteilnehmer mit sehr hohen relativen Fahrgeschwindigkeiten zum automatisierten Fahrzeug.

### 3.8.1 Umfeldsensorik

Für heutige Fahrzeuge sind vor allen Dingen die vier folgenden Technologien in der Umfeldsensorik im Einsatz: Kamerasensorik, Radarsensorik, Lidar-sensorik und Ultraschallsensorik.

Der Radarsensor emittiert elektromagnetische Wellen in einem bestimmten Frequenzspektrum und empfängt das vom Objekt reflektierte Echo. Somit lassen sich mittels eines Radars die Entfernung, Höhe und die Richtung in dem ein Objekt sich vom Sender aus betrachtet befindet feststellen. Kleinere Objekte, die in Gruppen auftreten, wie z. B. Fußgänger, werden aufgrund von Echoüberlagerungen bisweilen als ein Objekt erkannt. Anwendung findet ein im Fahrzeug verbauter Radarsensor zur Ab-

standsbestimmung beim Adaptive Cruise Control (ACC).

Ebenso wie das Radar, ist Lidar ein Messverfahren zur Ortung und Messung der Entfernung von Objekten im Raum. Anstelle von Mikrowellen werden beim Lidar Ultraviolett-, Infrarot- oder Strahlen aus dem Bereich des sichtbaren Lichts verwendet. Durch atmosphärische Störungen wie z. B. Nebel, kann es zur Streuung der Lichtwellen kommen und somit zum Verrauschen des Messergebnisses. Hauptsächlich findet die Lidar-Technologie in der Distanz- und Geschwindigkeitsmessung von Objekten ihren Einsatzbereich (H. WINNER, 2015).

Ultraschallsensorik eignet sich vor allem für das Messen geringer Abstände (NOLL & RAPPS, 2015) im Niedergeschwindigkeitsbereich, z. B. beim automatisierten Einparken.

Die Gestaltung des Verkehrsraums ist aktuell grundsätzlich auf die menschliche visuelle Wahrnehmung ausgelegt. Daher ist Kamerasensorik als technologisches Äquivalent potenziell sehr vielversprechend, um die visuellen Reize, die im Straßenverkehr die größten Auswirkungen auf das Handeln haben, ausreichend wahrzunehmen. Nachteile gegenüber anderen Sensorarten sind hohe Datenraten, geringere Reichweite, aufwendige Extraktion von Tiefeninformationen in Bildern und das Bildverständnis.

In Tabelle 3-15 sind Beispiele enthalten, mit welcher Technologie welche Eigenschaften von Verkehrsteilnehmern mit welcher Qualität (✓ = gut, O = mittel, ✗ = schlecht/nicht möglich) wahrgenommen werden können. Man sieht, dass mit keiner der drei betrachteten Technologien alle Eigenschaften eines Verkehrsteilnehmers wahrgenommen werden können. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit für den Einsatz von kombinierter Sensorik für die Wahrnehmung von Verkehrsteilnehmern. Zur redundanten Wahrnehmung, die aus sicherheitstech-

Verkehrsteilnehmer	Kraftfahrzeuge			Radfahrer			Fußgänger		
	Geometrie	Dynamik	Typ	Geometrie	Dynamik	Typ	Geometrie	Dynamik	Typ
Radar	✓	✓	✗	✗	O	✗	✗	O	✗
Lidar	✓	O	O	✓	O	✗	✓	O	✗
Kamera	✓	O	✓	✓	O	✓	✓	O	✓

✓ = gut, O = mittel, ✗ = schlecht/nicht möglich

Tab. 3-15: Wahrnehmungsmöglichkeiten anderer Verkehrsteilnehmer

nischer Sicht notwendig erscheint, müssen alle drei Technologien kombiniert werden.

In Tabelle 3-16 sind Beispiele für die grundsätzlich mögliche Wahrnehmung von Infrastrukturelementen und deren Eigenschaften enthalten. In dieser Tabelle wurde auch eine digitale Karte als Informationsquelle aufgenommen. Für diese ist zu beachten, dass nur eine aktuelle, der Realität entsprechende Karte sinnvoll genutzt werden kann. Ist dies nicht gegeben, so müssen die Infrastrukturelemente mit bordeigener Umfeldsensorik wahrgenommen werden. Über eine Kombination auf aktueller digitaler Karte und Kameratechnologie scheinen alle Elemente redundant wahrnehmbar zu sein. Dies gilt jedoch nur für gute Wetter- und Sichtbedingungen und ohne Verschmutzung und Beschädigung der Elemente. Daraus folgt, dass insbesondere bei ungünstigen Bedingungen weitere Maßnahmen erforderlich sein können. Es könnten weitere bordeigene Wahrnehmungstechnologien verwendet werden, die auch bei ungünstigen Bedingungen funktionieren. Es könnten weitere Infrastrukturelemente installiert werden oder die Eigenschaften der bestehenden Infrastrukturelemente könnten verändert werden. Außerdem stehen Kommunikationsmöglichkeiten zur Verfügung, beispielsweise durch Übertragung von Position und Typ eines Verkehrszeichens direkt von der Aufstellvorrichtung zum Fahrzeug. Unter Position/Verlauf ist hier zu verstehen, dass eine Sensorart etwas wahrnimmt, das sich an einer bestimmten Position befindet und gegebenenfalls einen geometrischen Verlauf hat. Dadurch ist jedoch noch nicht klar, um welche Art von Element es sich handelt. Beispielsweise wird eine Lichtsignalanlage von einem Lidar oder einem Radar als stehendes Hindernis wahrgenommen. Dass es sich dabei um eine LSA handelt, können diese Sensortechnologien nicht ermitteln.

### 3.8.2 Kontextmodellierung

Die Basis für die Kontextmodellierung ist das Wahrnehmen und Verstehen der straßenbaulichen/entwurfstechnischen und der verkehrstechnischen Infrastruktur. (BAR HILLEL, LERNER, LEVI & RAZ, 2014) identifizieren hier eine noch große Forschungslücke, insbesondere beim Erkennen der Fahrbahn und beim Erkennen und Verstehen von Fahrbahnmarkierungen. Als Herausforderungen werden dabei die erforderliche Vergrößerung des Sichtbereichs der Sensorik und die für automatisierte Fahrfunktionen zu erreichende Zuverlässigkeit (bei gegebener Vielfalt und Komplexität von Straßenszenen und möglicher Witterungsbedingungen) genannt. Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, ist bereits das zuverlässige Wahrnehmen von Elementen der Infrastruktur herausfordernd. Die Modellierung des Kontexts muss daher mit Unsicherheiten resultierend aus der Wahrnehmung umgehen können.

Bislang gibt es nur wenige Arbeiten, die sich mit dem Wahrnehmen und Verstehen von Fahrbahn und Fahrstreifen befassen. Auf der einen Seite ist für heutige Assistenzsysteme (z. B. einen Spurhalteassistenten) das Erkennen des eigenen Fahrstreifens mit geringeren Anforderungen an Vorausschau, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit ausreichend. Auf der anderen Seite hat die Forschung zum automatisierten Fahren bislang vor allem Ansätze basierend auf hochgenauen Karten in Kombination mit einer hochgenauen Lokalisierung genutzt (BAR HILLEL, LERNER, LEVI & RAZ, 2014).

TÖPFER et al. (2015) stellen einen Ansatz vor, der basierend auf detektierten Fahrstreifen- und Fahrbahnbegrenzungen die Fahrstreifen einer Fahrbahn schätzt. Es wird ein probabilistisches hierarchisches Modell verwendet, bei dem zunächst Hypothesen über Fahrstreifenabschnitte in Längsrich-

Element	Leitelemente (Baken, Leitpfosten etc.)		Fahrbahnmarkierungen, Bordsteine etc.		Verkehrszeichen, Lichtsignale etc.	
	Position/Verlauf	Bedeutung	Position/Verlauf	Bedeutung	Position	Typ/Bedeutung
Radar	✓	✗	✗	✗	✓	✗
Lidar	✓	✗	✓	○	✓	✗
Kamera	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Digitale Karte	✓	✓	✓	✓	✓	✓

✓ = gut, ○ = mittel, ✗ = schlecht/nicht möglich

Tab. 3-16: Wahrnehmungsmöglichkeiten von Infrastrukturelementen

tung zu Fahrstreifenhypothesen und anschließend Fahrstreifenhypothesen in Querrichtung zu Fahrbahnhypothesen zusammengesetzt werden. Basierend auf dieser Multi-Hypothesen-Repräsentation wird dann unter Berücksichtigung typischer Fahrstreifenbreiten und -verläufe auf die wahrscheinlichste Straßenszene geschlossen. Der Ansatz ermöglicht zudem den Rückschluss auf den Straßentyp (Autobahn, Landstraße etc.). Das Verfahren wird allerdings bislang ausschließlich für Straßenabschnitte zwischen Knotenpunkten beschrieben. Die experimentellen Ergebnisse zeigen allerdings, dass es selbst in diesen Szenarien noch nicht möglich ist die Fahrbahn mit all ihren Fahrstreifen gleichzeitig zu einem hohen Grad vollständig sowie fehlerfrei wahrzunehmen.

Ein rein kamerabasierter Ansatz zum Erkennen und Verstehen von innerstädtischen Verkehrsszenen inklusive Kreuzungen wird von GEIGER et al. (GEIGER, LAUER, WOJEK, STILLER & URTASUN, 2014) vorgestellt. Im Unterschied zu (TÖPFER, SPEHR, EFFERTZ & STILLER, 2015) werden neben der Geometrie und Topologie der straßenbaulichen Infrastruktur und der Fahrstreifen gleichzeitig auch die Objekte und ihre Zuordnung zu den Fahrstreifen geschätzt. Es wird argumentiert, dass für innerstädtische Szenarien nur ein solch kombinierter Ansatz erfolversprechend sei, da Fahrbahnmarkierungen beispielsweise häufig durch Fahrzeuge verdeckt seien, in diesen Fällen die gefahrenen Trajektorien aber Rückschlüsse auf die Fahrstreifenverläufe zuließen. Mit diesem Ansatz wurden bei einer Stichprobe von 113 innerstädtischen Straßenszenarien in 90 % der Fälle die Topologie von Kreuzungen, hier ist die Anzahl der einmündenden Straßen gemeint, sowie deren geometrischer Mittelpunkt und die Orientierung der Kreuzungsarme als richtig geschätzt gewertet. Zudem wurde gezeigt, dass durch die kombinierte Schätzung der Verkehrsszene auch die Genauigkeit bei der Schätzung der Orientierung anderer Fahrzeuge erhöht werden konnte. Bei der heutigen Leistungsfähigkeit von Rechnersystemen ist das Verfahren allerdings nicht echtzeitfähig.

MANZ et al. (2011) sowie BAYERL und WÜNSCHE (2014) beschreiben Verfahren zum Detektieren und zeitlichen Verfolgen von einfachen Wegen und Kreuzungen (unbefestigte Wege, Straßen ohne markierte Fahrstreifen), die es dem Versuchsfahrzeug ermöglichen, autonom auf diesen Wegnetzen

zu navigieren. In diesem Fall ist aber nur das Erkennen und Verstehen der straßenbaulichen Infrastruktur notwendig, wobei das Verstehen aufgrund der einfachen Struktur zudem weit weniger komplex ist.

### 3.9 Zwischenfazit: Stand der Technik Automatisiertes Fahren

Im Gegensatz zu Fahrerassistenzsystemen, die primär das Ziel verfolgen, auf Basis von Unfallanalysen identifizierte Lücken der menschlichen Fähigkeiten zu kompensieren (CHIELLINO et al., 2010; BUSCHARDT, DONNER, GRAAB, HÖRAUF & WINKLE, 2006) oder Routinefahrtsituationen unter der Überwachung des Menschen zu automatisieren, müssen Fahrzeugführungssysteme mindestens die Fähigkeiten des aufmerksamen menschlichen Fahrers erreichen<sup>6</sup>. Erst dann können autonome Systeme über die Fähigkeiten des Menschen hinausgehen und zu einer weiteren Reduktion der Unfallzahlen führen.

Ein nicht zu unterschätzender Schritt besteht darin, ein aktuelles Assistenzsystem so abzusichern, dass es zukünftig in einem autonomen Fahrzeug ohne Beaufsichtigung durch den Fahrer erwartungsgemäß (das heißt unter anderem fehlerfrei in allen Verkehrssituationen) funktioniert. Dabei ist die Wahrscheinlichkeit hoch, unvorhersehbare Konstellationen nicht berücksichtigt zu haben, die gegebenenfalls zu ausbleibenden oder inadäquaten Systemreaktionen führen.

Es gibt bisher beispielsweise keine Strategie, die Wahrnehmungs- bzw. Interpretationsleistung eines Systems auf semantischer Ebene zu bewerten. Das Thema Redundanz ist häufig noch gar nicht akut, da beispielsweise in städtischer Umgebung selbst bei Bemühung aller zur Verfügung stehenden Mittel nicht einmal eine nicht-redundante Lösung umsetzbar ist. Im Gegensatz zur Stabilisierungsebene kann hier aber vermutlich nicht auf Redundanzkonzepte auf anderen Disziplinen wie z. B. der Luft- und Raumfahrttechnik oder Kraftwerkstechnik zurückgegriffen werden.

<sup>6</sup> Ob dies ausreichend ist, ist bisher noch nicht erforscht und in der Gesellschaft diskutiert.

### 3.10 Künftige Fahrfunktionen

Aufgrund der skizzierten Herausforderungen ist eine schrittweise Einführung von Fahrfunktionen zu erwarten. Der Automobilindustrie zufolge ist in den kommenden Jahren zunächst mit dem Autobahnchauffeur zu rechnen, bevor dieser dann von der Autobahn auf Landstraßen ausgeweitet wird (Pendlerchauffeur). Die Bezeichnung Chauffeur wird für Systeme des SAE-Level 3 genutzt. Diese beiden Systeme bilden die Grundlage für die Analyse des Infrastrukturbedarfs innerhalb dieses Projekts und werden im Folgenden vorgestellt. Die Erweiterung des Funktionsumfangs auf SAE-Level-4-Systeme wie AutobahnpiLOT, PendlerpiLOT und StadtpiLOT wird nicht explizit, sondern abschließend im Ausblick auf zukünftige Aktivitäten betrachtet. Es wird davon ausgegangen, dass Anforderungen in der Regel sowohl für Level 3 als auch für Level 4 gelten.

#### 3.10.1 Autobahnchauffeur

Der Autobahnchauffeur kombiniert in einer minimalen Ausführung die Fahrfunktionen des Abstandsregeltempomates, mit dem Fahrstreifenhalteassistenten und der automatischen Notbremse. Dadurch kann das System ohne permanente Überwachung durch den Fahrer auf Autobahnen und autobahnähnlichen Straßen (Landstraßen der Entwurfsklasse 1) eingesetzt werden. Zusätzlich muss das System die rechtlichen Rahmenbedingungen umsetzen, wie z. B. die Einhaltung von dauerhaften oder temporär geltenden Höchstgeschwindigkeiten, das Rechtsfahrgebot oder das Verbot des Rechtsüberholens.

Der Autobahnchauffeur ist in der Lage, in jeder Situation an den Fahrer zu übergeben. Diese Übergabe erfolgt durch Vorwarnung des Fahrers, wodurch sich dieser auf die Übernahme der Fahrzeugführung vorbereiten kann. Damit der Fahrer auch in der Lage ist die Fahraufgabe wieder zu übernehmen, kann davon ausgegangen werden, dass dem Fahrer nur bestimmte Nebentätigkeiten gestattet sind während das System aktiv ist. Die Zeit zwischen der Aufforderung zur Übernahme und Notwendigkeit der Übernahme, bzw. die Bedingungen, die zur Übernahme erfüllt sein müssen, ist noch genauer zu erforschen.

Der Autobahnchauffeur ist nicht zwingend an die Navigation gekoppelt. Dadurch ist es prinzipiell

möglich, den Autobahnchauffeur ohne Kartenmaterial zu nutzen. Seine Mission ist dann das Folgen einer Straße, bis der Nutzer eingreift.

#### 3.10.2 Pendlerchauffeur

Der Pendlerchauffeur umfasst den minimalen Funktionsumfang des Autobahnchauffeurs und erweitert den Einsatzbereich auf Landstraßen der Entwurfsklassen 2 und 3. Durch diese Erweiterung erhöhen sich die funktionalen Anforderungen, da es sich bei diesen Straßen nicht um planfrei geführte Straßen handelt. Somit können beispielsweise Einmündungen und Kreuzungen mit und ohne Lichtsignalanlagen sowie Kreisverkehre vorkommen. Zusätzlich erweitert sich die Menge der Klassen von Verkehrsteilnehmern auf langsame Fahrzeuge, Fahrräder und Fußgänger.

Auf Landstraßen ist zudem häufiger mit Verschmutzungen, Wildwechsel und weiteren Herausforderungen zu rechnen.

#### 3.10.3 Systeme mit SAE-Level 4

Die als Pilot bezeichneten Funktionsausprägungen gehen noch einen Schritt weiter und können zukünftig innerhalb ihres Einsatzbereichs ohne Übergabe an den Fahrer auskommen. Dadurch haben diese Systeme noch einmal gesteigerte Sicherheitsanforderungen. Obwohl bereits SAE-Level-3-Systeme im Fehlerfall oder bei Verlassen der funktionalen Systemgrenzen eine gewisse Zeit ohne den Fahrer auskommen müssen, ist diese Zeitdauer bei SAE-Level-4-Systemen noch einmal größer, da der Fahrer beliebige Tätigkeiten nebenbei ausführen darf.

Eine weitere Steigerung des Schwierigkeitsgrads bringen städtische Szenarien mit sich. Schmalere Straßen, eine höhere Verkehrsdichte und eine erhöhte Anzahl von Einmündungen, Kreuzungen und unterschiedlichen Verkehrsteilnehmern steigern die Anzahl der zu berücksichtigenden Objekte in der Umfeldwahrnehmung und Parameter in der Entscheidungsfindung.

Da bereits für SAE-Level-3-Systeme auf der Autobahn über notwendige Infrastrukturmaßnahmen diskutiert wird, erscheint die Notwendigkeit im städtischen Bereich noch höher und eine Einführung der Systeme ist dadurch zeitlich nachgelagert. Im

Rahmen des vorliegenden Grundlagenprojektes werden städtische Szenarien aufgrund der vorab dargestellten Komplexität und der hieraus resultierenden Anforderungen jedoch nicht weiter betrachtet.

### 3.11 Ausgewählte Forschungsprojekte und Aktivitäten mit Bezug zum automatisierten Fahren

#### 3.11.1 PEGASUS<sup>7</sup>

Im Projekt zur „Etablierung von generell akzeptierten Gütekriterien, Werkzeugen und Methoden sowie Szenarien und Situationen zur Freigabe hochautomatisierter Fahrfunktionen“ (PEGASUS) arbeiten seit Anfang 2016 zahlreiche Automobilhersteller, Zulieferer sowie Forschungseinrichtungen an Testmethoden und Freigabekriterien für hochautomatisiertes Fahren auf Autobahnen. Die Projektpartner sollen Methoden entwickeln, die eine Absicherung von hochautomatisierten Fahrzeugen für die Freigabe im Massenmarkt ermöglichen. Dazu gehören Studien über die tatsächliche Qualität der Infrastrukturelemente auf deutschen und europäischen Autobahnen zur Ableitung der Anforderungen an einen Autobahnchauffeur.

#### 3.11.2 Ko-HAF<sup>8</sup>

Das Projekt Kooperatives automatisiertes Fahren (Ko-HAF) beschäftigt sich mit den funktionalen Aspekten des hochautomatisierten Fahrens bei höheren Geschwindigkeiten. Teil des Projekts ist ein Server-Backend-System, das als zusätzliche Informationsquelle für automatisierte Fahrzeuge zur Verfügung steht und Defizite der bordeigenen Technologien ausgleichen soll. Die Fahrzeuge unterschiedlicher Partner kommunizieren über Mobilfunk mit dem Safety-Server und speisen die Umfeldwahrnehmung (z. B. Qualität der Fahrbahnmarkierung oder auch Objekte bzw. Hindernisse auf der Fahrbahn) ihrer bordeigenen Sensorik ein. Im Safety-Server werden diese Informationen im Sinne einer kollektiven Wahrnehmung gesammelt, ausgewertet und verdichtet. Dadurch kann den Fahrzeugen eine um sicherheitsrelevante Informationen angereicherte digitale Karte zur Verfügung gestellt werden, die der für hochautomatisiertes Fahren benötigten Vorausschaureichweite Rechnung trägt. Weitere Aufgabenstellungen des Projekts Ko-HAF sind:

- Die präzise Eigenlokalisierung, die für die Fusion der vom Safety-Server bereitgestellten Informationen mit den von der eigenen Fahrzeugsensorik ermittelten Daten notwendig ist,
- die Einbindung des Fahrers in das hochautomatisierte System,
- die Funktionserweiterungen für hochautomatisiertes Fahren sowie
- die Absicherung und Erprobung des Gesamtsystems.

#### 3.11.3 Digitales Testfeld Autobahn<sup>9</sup>

Mit dem Aufbau des digitalen Testfeldes Autobahn wurde im Jahr 2015 unter der Federführung des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur auf der Autobahn A 9 zwischen München und Nürnberg begonnen.

Das übergeordnete Ziel der Aktivitäten im digitalen Testfeld Autobahn ist die Erprobung von Systemen und Technologien zur Gefahrenerkennung, zu individuellen Routenempfehlungen sowie für das automatisierte Fahren. Hierzu zählen Kommunikationseinrichtungen und intelligente Infrastrukturelemente, die den Informationsaustausch zwischen Fahrzeugen und von Fahrzeugen mit der Infrastruktur verbessern.

#### 3.11.4 Mobilitätskonzept Niedersachsen<sup>10</sup>

Im Mobilitätskonzept des Landes Niedersachsen (Niedersächsisches Ministerium für Wirtschaft, 2016) wird der Aufbau eines Testfelds für autonomes Fahren angekündigt. Demnach soll mit der Einrichtung eines Testfeldes eine Forschungsinfrastruktur geschaffen werden, die auf den Erfahrungen der Braunschweiger Anwendungsplattform Intelligente Mobilität (AIM) aufbaut. Insgesamt ist ein

<sup>7</sup> <https://www.pegasusprojekt.de/de/>

<sup>8</sup> <https://www.ko-haf.de/startseite/>

<sup>9</sup> weitere Details siehe: <https://www.bmvi.de/DE/Themen/Digitales/Digitale-Testfelder/Digitale-Testfelder.html>

<sup>10</sup> weitere Details siehe: [http://www.mw.niedersachsen.de/startseite/digitalisierung/testfeld\\_autonomes\\_fahren\\_fuer-die-mobilitaet-von-morgen-das-testfeld-niedersachsen-150012.html](http://www.mw.niedersachsen.de/startseite/digitalisierung/testfeld_autonomes_fahren_fuer-die-mobilitaet-von-morgen-das-testfeld-niedersachsen-150012.html)

zusammenhängendes Testfeld geplant, welches bei maximalem Ausbau eine Streckenlänge von ca. 260 km erreicht. Details zu möglichen Anwendungen oder auch zum Einsatz kommender Technologien liegen aktuell noch nicht vor.

### 3.11.5 Cooperative ITS Corridor<sup>11</sup>

Das Einführungsprojekt Cooperative ITS Corridor fokussiert auf Systeme und Anwendungen zur Vernetzung von Fahrzeugen und Infrastruktur (V2X). Die wichtigsten Ziele im Rahmen des Projektes sind die Entwicklung eines europäischen Standards für die V2X-Kommunikation, die Etablierung eines Systems, das zukünftig um andere kooperative Dienste erweitert werden kann, die Bereitstellung eines grenzübergreifenden Frequenzbereiches für V2X-Applikationen sowie die weltweite Harmonisierung von V2X-Standards.

Auf einem Corridor von den Niederlanden über Deutschland bis nach Österreich soll die straßenseitige kooperative Infrastruktur für die ersten Anwendungen im Cooperative ITS Corridor Rotterdam – Frankfurt/Main – Wien aufgebaut werden. Seitens der Fahrzeughersteller sollen parallel Fahrzeuge und telematische Infrastruktur auf den Markt gebracht werden, die kooperative Dienste ermöglichen. In einem ersten Schritt sollen hierzu zunächst zwei kooperative Anwendungen zum Einsatz kommen:

- **Arbeitsstellenwarnung:** Dazu sollen Fahrzeuge, die sich einer mobilen Arbeitsstelle nähern, frühzeitig über die fahrzeugeigenen Anzeigesysteme gewarnt werden. Die Fahrer erhalten einen Hinweis auf die Position der Arbeitsstelle und deren Verkehrsfluss. Die Warnung erfolgt ergänzend zur statischen Beschilderung. Darüber hinaus wird die exakte Lage der Arbeitsstelle in die Verkehrsrechnerzentrale übermittelt.
- **Verkehrslageerfassung:** Daten über die Verkehrsbelastung werden aktuell in der Regel mithilfe stationärer Sensorik erhoben. Allerdings steht die dazu erforderliche Infrastruktur nicht für das gesamte Straßennetz zur Verfügung. Viele ereignisorientierte Informationen werden überhaupt nicht erfasst. Die Integration von Fahr-

zeugdaten in das Verkehrsmanagement könnte zur Stauvermeidung durch optimierte Strecken- und Netzbeeinflussung sowie zur Verbesserung des Störfallmanagements beitragen.

Grundsätzlich steht der Aspekt des automatisierten Fahrens nur bedingt im Fokus des Projekts. Dennoch lassen sich aus den Anwendungen wichtige Aspekte für den künftigen Einsatz der eingesetzten Technologien ableiten. Diese sind dann wiederum auch bzgl. des automatisierten Fahrens hilfreich (vgl. auch Kapitel 3.11.3).

## 3.12 Zusammenfassung

In heutigen Versuchsträgern werden automatisierte Fahrfunktionen in zwei Ausprägungen umgesetzt: Bordautonome Ansätze sind bislang auf Autobahnen beschränkt, für alle anderen Umgebungen wird auf kartenbasierte Ansätze zurückgegriffen.

Grund für den Rückgriff auf hochgenaue Karten ist die für hoch- und vollautomatisierte Fahrfunktionen noch nicht ausreichende Leistungsfähigkeit beim maschinellen Wahrnehmen und insbesondere beim Verstehen der Straßeninfrastruktur unter ausschließlicher Verwendung der bordeigenen Sensorik (BAR HILLEL, LERNER, LEVI & RAZ, 2014). Aufgrund dessen ist in anderen Umgebungen als Autobahnen und autobahnähnlich ausgebauten Bundesstraßen innerhalb des betrachteten Zeithorizonts nicht mit der Markteinführung hoch- und vollautomatisierter Fahrfunktionen zu rechnen, die ohne hochgenaue Karten funktionieren. Auch auf Autobahnen können hochgenaue Karten aber vorteilhaft und sinnvoll sein.

Voraussetzung für die Ausführung einer kartenbasierten automatisierten Fahrfunktion ist die Aktualität/Korrektheit der digitalen Karte sowie eine hinreichend genaue kartenrelative Lokalisierung. Eine Verteilung von Kartendaten über eine informationstechnische Infrastruktur ist grundsätzlich umsetzbar. Die Aktualität/Korrektheit der Kartendaten muss entweder durch die bordeigene Wahrnehmung verifiziert oder durch den infrastrukturseitigen Aktualisierungs- und Verteilungsprozess sichergestellt werden. Zu beiden Varianten sind noch keine Forschungsarbeiten bekannt, jedoch gibt es bereits Ansätze in der Industrie, die sich aufgrund fehlender Veröffentlichungen jedoch nicht nachvollziehen und bewerten lassen (vgl. Tesla Motors Inc, Waymo Inc.,

<sup>11</sup> Weitere Details siehe: <http://www.c-its-korridor.de/>

HERE Deutschland GmbH). Eine fehlerhafte Karte, die für eine sicherheitskritische Fahrfunktion eingesetzt und nicht anhand der bordeigenen Wahrnehmung verifiziert wird, kann zu Unfällen führen. Das Bereitstellen einer hochgenauen digitalen Karte sowie deren kollektive Aktualisierung durch die Umfeldwahrnehmung einzelner Fahrzeuge ist Teil des Forschungsprojekts Ko-HAF (vgl. Kapitel 3.11.2).

Eine hinreichend genaue globale Lokalisierung über ein Navigationssatellitensystem ist nach dem Stand der Technik nur in Verbindung mit zusätzlichen Referenzstationen am Boden und hochgenauer Inertialsensorik zur Eigenbewegungsschätzung möglich, allerdings nicht im Falle zu großer Funkabschattung, wie sie beispielsweise in innerstädtischen Bereichen regelmäßig gegeben ist. Wird die Straßeninfrastruktur zusätzlich über die bordeigene Sensorik wahrgenommen, kann der Lokalisierungsfehler möglicherweise hinreichend korrigiert werden. Eine Lokalisierung über in die Karte eingetragene Landmarken erfordert, dass diese aktuell gehalten werden sowie möglicherweise auch von verschiedenen Lokalisierungssystemen erkennbar sind. Auch die hinreichend genaue Lokalisierung für die Fusion von Kartendaten mit der bordeigenen Wahrnehmung ist noch eine der zentralen Herausforderungen, die im Forschungsprojekt Ko-HAF adressiert werden.

Das als wahrscheinlich einzuschätzende Einführungsszenario von hoch- und vollautomatisierten Fahrfunktionen beinhaltet daher Systeme, die in ihrer Grundfunktionalität bordautonom und zunächst auf Autobahnen beschränkt sind. Ein naheliegender Entwicklungsschritt wäre dann die Erweiterung auf Landstraßen der EKL 1-3. Trotz der bordautonomen Grundfunktionalität werden externe Daten in Form von digitalen Karten und Fahrzeug-zu-X-Kommunikation voraussichtlich einen wichtigen Beitrag zur Steigerung von Sicherheit und Komfort leisten.

Bekanntere heutige Systeme sind vor allem auf eine für die bordeigene Sensorik gut detektier- und erkennbare verkehrstechnische Infrastruktur auf gewiesen. Aufgrund der noch nicht weit entwickelten Fähigkeit, die Straßeninfrastruktur zu verstehen, gilt dies insbesondere für Fahrbahnmarkierungen, sodass für die automatisierten Fahrzeuge ein eindeutiges, wohlstrukturiertes Straßenumfeld wahrnehmbar ist. Komplexere Situationen wie Arbeitsstellen stellen aus diesem Grund noch eine Herausforderung für automatisierte Fahrfunktionen dar. Die Leistungsfähigkeit der kamerabasierten Wahrnehmung

und damit der Wahrnehmung der Fahrstreifen hängt stark von der Witterung und den Lichtverhältnissen ab. Ein potenziell wichtiger Faktor ist daher das Vorhandensein von Leitelementen, die über Radar- oder Lidarsensorik wahrnehmbar sind, beispielsweise Leitpfosten und passive Schutzeinrichtungen. Sie bieten die Möglichkeit, über ein weiteres Sensorprinzip Rückschlüsse auf Fahrbahn- und Fahrstreifenverlauf zu ziehen, sofern dies nicht durch eine digitale Karte ersetzt wird. Hierbei sind aber folgende Einschränkungen infrastrukturseitig zu berücksichtigen: Fahrzeugrückhaltesysteme sind i. d. R. auf Autobahnen nur auf der linken Seite vorhanden und können sehr unterschiedlich ausgeführt sein (Stahl, Beton, Übergänge etc.). Fahrzeugrückhaltesysteme können aufgrund eines Anpralls stark verformt sein, was zu Problemen bei der Verwendung als Leitelement führen kann. In der Regel sind dauerhaft eingesetzte Rückhaltesysteme derzeit nicht mit Reflektoren bestückt und auch bei temporär eingesetzten Fahrzeugrückhaltesystemen können eingesetzte Reflektoren beschädigt oder abgefahren sein. Zuletzt ist zu berücksichtigen, dass Leitpfosten nur auf der rechten Seite der Autobahn vorhanden sind. Eine weitere Herausforderung im Hinblick auf hoch- und vollautomatisierte Fahrfunktionen ist in diesem Zusammenhang und auch allgemein die fehlende Fähigkeit die Wahrnehmungsleistung zu präzisieren (DIETMAYER, 2015). In Kombination mit den heute technisch realisierbaren Sensorsichtweiten macht es dies schwierig eine Zeitreserve von mehreren Sekunden für die Übergabe an den Fahrer aufzubauen. Zudem sind bezogen auf die heutigen Sensorsichtweiten hohe Absolut- und Relativgeschwindigkeiten, wie sie insbesondere auf deutschen Autobahnen vorherrschen, problematisch. Kartendaten, Verkehrsinformationen und Fahrzeug-zu-X-Kommunikation können hier genutzt werden, um beispielsweise frühzeitig die Geschwindigkeit zu reduzieren, bevor die Notwendigkeit dazu über die bordeigene Sensorik wahrgenommen wird.

Allgemein ist in Hinblick auf den Schritt von der Teil- zur Hoch- und Vollautomation festzuhalten, dass eine nicht zu unterschätzende Herausforderung darin besteht ein System so abzusichern, dass es ohne Verfügbarkeit eines Fahrers in der gegebenen Vielfalt möglicher Verkehrssituationen sicher funktioniert und dennoch der Fahrkomfort nicht leidet. Die Wahrscheinlichkeit ist hoch, selten auftretende Situationen nicht berücksichtigt zu haben, was im Eintrittsfall zu ausbleibenden oder inadäquaten Systemreaktionen führen kann.

Wenn bordeigene Verfahren auf das Vorhandensein von Infrastrukturelementen und/oder die Verfügbarkeit von infrastruktureitigen Maßnahmen angewiesen sind, so müssen diese dieselben Sicherheitsziele erreichen wie die bordeigenen Verfahren. Maßgebend dafür ist die Norm ISO 26262 für die funktionale Sicherheit von elektrischen/elektronischen Fahrzeugsystemen. Zu diesen zählen Fahrerassistenz- und Fahrzeugführungssysteme. Konkret bedeutet dies, dass eine Garantie der notwendigen Zuverlässigkeit einer Infrastrukturmaßnahme technologisch und organisatorisch sehr herausfordernd sein kann. Beispielsweise erscheint dies für die Garantie des Vorhandenseins und der notwendigen Eigenschaften von Fahrstreifenmarkierungen oder auch der Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche bisher nicht möglich. Zugleich gilt, dass sich technische Regelwerke zur Anlage von Autobahnen bereits heute zu einem hohen Maß zur Vereinheitlichung von Straßenquerschnitten und damit der Infrastruktur beitragen. Dies kann als positive Entwicklung für das automatisierte Fahren gewertet werden.

## **4 Herausforderungen beim automatisierten Fahren auf Autobahnen und Landstraßen**

### **4.1 Einleitung**

Um die auftretenden Herausforderungen beim automatisierten Fahren auf Autobahnen und Landstraßen seitens der Automobilhersteller und seitens der Infrastrukturbetreiber ermitteln und diskutieren zu können, wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens ein gemeinsamer Workshop durchgeführt. Dieser wurde am 16.10.2015 im Niedersächsischen Forschungszentrum Fahrzeugtechnik in Braunschweig mit 18 Teilnehmern aus der Automobilindustrie, der Straßenbauverwaltung des Bundes und der Länder, des Deutschen Städtetages, des Deutschen Verkehrssicherheitsrates sowie des Gesamtverbandes der Deutschen Versicherungswirtschaft durchgeführt.

Die auf dem Workshop geführten Diskussionen haben grundsätzlich gezeigt, dass ein intensiver Austausch zwischen Infrastrukturbetreibern und Automobilherstellern wichtig und erforderlich ist, damit beiderseitig ein Verständnis für die Abläufe und Technologien geschaffen wird. Erst dann wird eine

effektive und effiziente Zusammenarbeit möglich. Ein wesentliches Werkzeug kann hier die Demonstration – das Erleben – von Fahrfunktionen für Infrastrukturbetreiber, Behörden, Versicherungen und andere Beteiligte sein, die nicht in der Automobilindustrie arbeiten.

Im Folgenden werden zunächst die Besonderheiten bei der Erhöhung des Automatisierungsgrades von Fahrzeugen abgeleitet. Nachfolgend werden daraus resultierende allgemeine Schlüsse gezogen, bevor dann die beiden bereits vorgestellten Fahrfunktionen Autobahnchauffeur und Pendlerchauffeur betrachtet werden.

In den anschließenden erarbeiteten Fahrscenarien sollten möglichst viele der domänenspezifischen Herausforderungen abgebildet werden. Die Entwicklung der Szenarien erfolgte dabei aufbauend auf den Ergebnissen des 1. Workshops in enger Abstimmung mit dem forschungsbegleitenden Betreuerkreis.

Für die meisten Szenarien und Herausforderungen gilt, dass sie zumindest in abgewandelter Form sowohl auf den Autobahnchauffeur wie auf den Pendlerchauffeur übertragbar sind (bspw. nicht/schlecht sichtbare Fahrbahnmarkierungen oder hohe Relativgeschwindigkeiten zu anderen Verkehrsteilnehmern/Hindernissen). Im vorliegenden Bericht werden diese daher nicht doppelt aufgeführt und diskutiert.

### **4.2 Erhöhung des Automatisierungsgrades**

Bei der Automatisierung von Fahrzeugen werden aktuell zwei Übergänge zwischen Automatisierungsgraden diskutiert – zum einen der Übergang von SAE-Level 2 auf SAE-Level 3, zum anderen von SAE-Level 3 auf SAE-Level 4. Beide Übergänge haben Gemeinsamkeiten und Eigenheiten, die im Folgenden vorgestellt werden.

Im Rahmen des Workshops wurde festgestellt, dass die Qualität und Vollständigkeit der Infrastruktur auch die Verfügbarkeit von Fahrfunktionen bedingen wird. Das heißt, je nachdem welche Infrastruktur vorhanden ist und in welcher Qualität diese vorhanden ist, können unterschiedliche Automatisierungsgrade erreicht werden. Es wurde auch festgehalten, dass die in Deutschland vorhandene Verkehrsinfrastruktur im regelkonformen Zustand be-

reits sehr gut zum automatisierten Fahren geeignet ist. Zudem sind Anpassungen in großem Umfang sowohl zeitlich als auch finanziell kaum möglich. Anpassungen im geringeren Umfang, wie zum Beispiel der Einsatz von Typ II-Fahrbahnmarkierungen im Erneuerungszyklus von ca. 3 Jahren oder auch einheitliche Beschilderung, helfen zudem nicht nur automatisierten Fahrzeugen, sondern auch menschlichen Fahrern. Hierbei stellt sich die Frage, ob ein automatisiertes Fahrzeug Szenarien beherrschen muss, die ein menschlicher Fahrer in der Regel nicht beherrscht. Dies führt zu einer notwendigen Diskussion des Sicherheitsniveaus und auch von ethischen Aspekten, die beispielsweise in (MAURER, GERDES, LENZ & WINNER, 2015) angeregt wird.

Nach aktueller Rechtslage zur Typgenehmigung von Fahrzeugen ist der Einsatz eines genehmigten Fahrzeugs pauschal auf anderen Straßen erlaubt. Es wäre vorstellbar die Typgenehmigung so zu gestalten, dass der Einsatz einer automatisierten Fahrfunktion auf bestimmte Straßen oder Straßenabschnitte beschränkt ist. Das erscheint jedoch in der Praxis nicht umsetzbar, da sich mit der Zeit der Zustand und die Ausstattung von Straßen verändern und dadurch auch die Anforderungen an die automatisierte Fahrfunktion. Die Beschränkung einer automatisierten Fahrfunktion auf Straßen oder Straßenabschnitte mit einer bestimmten Ausstattung und Qualität der Infrastruktur muss daher unabhängig von der Typgenehmigung und vom Automatisierungsgrad in der Fahrfunktion selbst realisiert werden.

#### **4.2.1 Übergang von SAE-Level 2 auf SAE-Level 3**

Der Übergang von Level 2 auf Level 3 hat den unüberwachten Betrieb des Fahrzeugs innerhalb seiner Systemgrenzen zum Ergebnis. Unüberwacht heißt, dass es keine permanente Überwachung des Systems durch einen Menschen gibt. Daraus folgt, dass das Fahrzeug nicht kurzfristig auf die Rückfallebene Mensch zurückgreifen kann und darf. Aktuell wird ein Zeitraum von ca. 10 s diskutiert, der benötigt wird, damit der Fahrer die Fahraufgabe wieder sicher übernehmen kann (DAMBÖCK, 2013).

Dies bedeutet, dass sich schwierige Szenarien durch Übergabe an den Fahrer lösen lassen, falls sich diese Szenarien frühzeitig ankündigen oder das Fahrzeug sich bis zur Übernahme im sicheren

Zustand befindet. Ist der Stillstand oder ein anderer Fahrzustand, der niemanden gefährdet (sicherer Fahrzustand, vgl. Kapitel 3.6.3) erreichbar, so entsteht keine erhöhte Gefährdung bis zur Übernahme durch den Menschen. Für entsprechende Fahrfunktionen fehlt bis heute die Definition des sicheren Zustands.

In (RESCHKA & MAURER, 2015) wird dies ebenfalls diskutiert. Im Straßenverkehr kommt es jedoch zu gefährlichen Situationen, die sich nicht über einen solchen Zeitraum ankündigen, wie das plötzliche Platzen eines Autoreifens. Zudem kann der Fall eintreten, dass es aufgrund der gegebenen Situation nicht möglich ist, einen sicheren Fahrzustand zu erreichen, wie z. B. durch Anhalten auf dem linken Fahrstreifen einer Autobahn. In beiden Fällen muss die Fahrfunktion die Situation sicher lösen, bzw. es muss im Vorfeld verhindert werden, dass es zu einer Gefährdung kommt. Dies gilt sowohl für SAE-Level 3 als auch für SAE-Level 4.

#### **4.2.2 Übergang von SAE-Level 3 auf SAE-Level 4**

Gefährliche Situationen lassen sich in SAE-Level 4 nicht mehr durch eine Übergabe an den Fahrer lösen. Daraus folgen zwar keine höheren funktionalen Anforderungen an die Fahrfunktion, jedoch muss diese robuster sein, um nicht mehr auf den Fahrer angewiesen zu sein. Diese Robustheit kann möglicherweise fahrzeugseitig erreicht werden. Für das Fahren im SAE-Level 4 bzw. für das Fahren im nicht überwachten Betrieb sind mehrere redundante Systeme im Fahrzeug erforderlich. Es ist wahrscheinlich, dass Infrastrukturmaßnahmen helfen können, dies zu erreichen.

Beispielsweise könnte als Steuerungsstrategie eine rechtzeitige Aufforderung (mehr als 60 s vorher) zur Fahrerübernahme erfolgen, wenn auf dem folgenden Streckenabschnitt keine Möglichkeit zum sicheren Abstellen des automatisierten Fahrzeuges gegeben ist. Dies würde zu einer notwendigen hohen Verfügbarkeit dieser Informationen führen z. B. mittels einer aktuellen digitalen Karte.

#### **4.2.3 Fazit**

Aufgrund der geringen Unterschiede in den funktionalen Anforderungen und den voraussichtlich eher kurzzeitig auftretenden Gefährdungen, die von besonderer Relevanz sind, wird in diesem Projekt

nicht mehr generell zwischen Level 3 und Level 4 unterschieden, da die Anforderungen an die Infrastruktur sehr ähnlich sein werden. Eine wesentliche Fragestellung für das weitere Projekt wird daher sein: Wie können besondere Szenarien durch die Infrastruktur unterstützt werden? (z. B.: Arbeitsstellen, fehlende Seitenstreifen, Hindernisse, Stauden etc.).

### 4.3 Standardszenarien

Das automatisierte Fahren auf Autobahnen sowie Bundes- und Landstraßen lässt sich in Bezug auf die vorhandene Infrastruktur und die herrschenden äußeren Bedingungen grob in die Fälle „Fahren im Regelfall“ und „Fahren bei Abweichungen vom Regelfall“ unterteilen. Im Folgenden werden zunächst die Standardszenarien der Fahrfunktionen Autobahnchauffeur und Pendlerchauffeur betrachtet. Im anschließenden Kapitel werden dann verschiedene Szenarien beschrieben, in denen eine deutliche Abweichung vom Regelfall zu beobachten ist. Die Entwicklung dieser Szenarien erfolgte anhand der kritischen Situationen, die während des ersten Expertenworkshops am 16.10.2015 identifiziert wurden.

#### 4.3.1 Standardszenario: Autobahnchauffeur

Die Aufgabe des Autobahnchauffeurs besteht im automatisierten Fahren auf Autobahnen oder autobahnähnlichen Landstraßen. Die Fahrfunktion muss dabei lediglich die Führung des Fahrzeugs auf der Hauptfahrbahn ausführen, d. h. die Prozesse des Auf- bzw. Abfahrens sowie die Führung innerhalb eines Autobahnkreuzes werden nicht betrachtet. Die wesentlichen Eigenschaften des Standardszenarios können wie folgt charakterisiert werden:

Das Fahrzeug befährt eine Straße mit mindestens zwei Fahrstreifen pro Richtung. Die Fahrbahn ist baulich (Mittelstreifen, Rückhalteeinrichtungen) von der Fahrbahn der Gegenrichtung getrennt, sodass ein direkter Kontakt mit dem Gegenverkehr ausgeschlossen werden kann. Am rechten Fahrbahnrand befindet sich ein Seitenstreifen, der zum Abstellen in Pannensituationen genutzt werden kann und lediglich an Ein- oder Ausfahrten bzw. Verflechtungsstrecken (z. B. Autobahnkreuze, Rastanlagen etc.) unterbrochen wird. Knotenpunkte sind grundsätzlich planfrei gestaltet, d. h. dass keine Konfliktpunkte mit kreuzenden Fahrzeugströmen (wie z. B. an

innerstädtischen Knotenpunkten) vorhanden sind. Arbeitsstellen sind vom Standardszenario ausgenommen.

Neben den allgemeingültigen Verkehrsregeln (Rechtsfahrgebot, Verbot des Überholens auf der rechten Seite), müssen lokale Anordnungen durch Verkehrszeichen nach StVO eingehalten werden. Dazu gehören vor allem Geschwindigkeitsbeschränkungen und Verbote den Fahrstreifen zu wechseln. Weiterhin müssen Warnhinweise (z. B. Schleudergefahr bei Nässe) erkannt werden. In beiden Fällen betrifft dies die im Seitenraum angeordneten statischen Verkehrszeichen, Fahrbahnmarkierungen, aber auch dynamische Verkehrszeichen an Schilderbrücken oberhalb der Fahrbahn.

Die Richtgeschwindigkeit liegt – sofern unbeschränkt – bei 130 km/h. Während der gesamten Fahrt ist mit anderen Verkehrsteilnehmern vor, hinter und neben dem automatisiert fahrenden Fahrzeug zu rechnen. Diese Fahrzeuge, zu denen longitudinale und laterale Sicherheitsabstände eingehalten werden müssen, können Unterschiede in Höhe, Breite, Länge sowie Geschwindigkeit aufweisen (z. B. Motorrad, Pkw mit Anhänger, Lkw).

Für den Regelfall wird angenommen, dass Fahrbahnmarkierungen (Typ II) und Verkehrszeichen vollständig vorhanden und nicht verdeckt oder verdreht sind. Außerdem soll von Tageslicht und einer niederschlagsfreien Witterung (z. B. Regen, Schnee, Nebel) ausgegangen werden.

Das Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer wird im Standardszenario als regelkonform eingeschätzt, d. h. dass standardmäßig keine grobe Missachtung der Straßenverkehrsordnung zu erwarten ist.

#### 4.3.2 Standardszenario: Pendlerchauffeur

Der Pendlerchauffeur ergänzt die Funktion des Autobahnchauffeurs um weitere Bundes- und Landstraßen aus den Entwurfsklassen 1 bis 3 gemäß RAL (FGSV, 2012b). Dies bezieht sich auf den Bereich außerhalb bebauter Gebiete und umfasst somit keine Ortsdurchfahrten. Im Vergleich zu den Autobahnen weisen die Landstraßen im Detail deutlich veränderte Merkmale auf:

Das Fahrzeug befährt eine einbahnige Straße mit mindestens einem, maximal zwei Fahrstreifen pro Richtung. Die Fahrstreifen der Gegenrichtung sind nicht baulich abgetrennt. Darüber hinaus sind keine

Seitenstreifen vorhanden und auch regelmäßige Nothaltebuchten können nicht vorausgesetzt werden.

Die Knotenpunkte sind i. d. R. plangleich ausgeführt, wodurch Kreuzungsvorgänge unterschiedlicher Verkehrsströme auf derselben Ebene durchgeführt werden müssen. Die üblichen Knotenpunktsysteme sind Kreuzungen, Einmündungen und Kreisverkehre. Die Regelung des Verkehrs erfolgt hier im Regelfall durch entsprechende ortsfeste Verkehrszeichen nach StVO oder durch Lichtsignalanlagen. Besonders hervorzuheben ist, dass laut Kapitel 4.1 und 4.2 der Richtlinien für die Markierung von Straßen (FGSV, 1993) die Fahrbahnmarkierungen in Knotenpunktbereichen außerorts nur für die übergeordnete Straße fortgeführt werden. Daraus folgt, dass für die untergeordnete Straße in Einmündungen oder Kreuzungen kurzzeitig keine Markierung zur Erkennung des Fahrstreifens vorhanden ist (vgl. Bild 4-1). Für den Standardfall wird angenommen, dass das Fahrzeug Knotenpunkte entlang der übergeordneten Straße durchquert. Abweichungen von dieser Annahme werden in den besonderen Szenarien (vgl. Kapitel 4.4) berücksichtigt.

Auf Streckenabschnitten können vollständige Fahrbahn- und Fahrstreifenbegrenzungen angenommen werden. Weitere Verkehrsregeln (z. B. Geschwindigkeitsbeschränkungen) oder Hinweise (z. B. Doppelkurve) werden hier ebenfalls durch statische Verkehrszeichen angezeigt. Die Anwendung von Wechselverkehrszeichen kann im Normalfall ausgeschlossen werden.

Die erlaubte Höchstgeschwindigkeit auf Landstraßen liegt für Pkw bei 100 km/h. Für Lkw und andere Schwerfahrzeuge ist die Geschwindigkeit auf 80 bzw. 60 km/h begrenzt (vgl. dazu § 3 (3) StVO). Ne-



Bild 4-1: Knotenpunkt (außerorts) mit fortlaufenden Leitlinien in übergeordneter Straße (Grundlage: Google Earth Pro, Lizenz Schlothauer & Wauer GmbH)

ben Lkw und anderen Großfahrzeugen sind auf Landstraßen auch Teilnehmer des nicht-motorisierten Verkehrs anzutreffen. Dazu gehören in erster Linie Kleinkrafträder und Fahrräder. Im Bereich von Knotenpunkten ist zudem auch mit Fußgängern zu rechnen.

Analog zum Autobahnchauffeur wird auch hier angenommen, dass alle Fahrbahnmarkierungen in der Regel gut sichtbar vorhanden sind und die Witterung ausreichende Sichtverhältnisse garantiert (Tageslicht). Das Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer wird ebenfalls als regelkonform angenommen.

#### 4.3.3 Herausforderungen durch die Standardszenarien

Die Anforderungen an das automatisiert fahrende Fahrzeug befinden sich in den Standardszenarien des Autobahn- und Pendlerchauffeurs unter Einhaltung der getroffenen Annahmen im beherrschbaren Bereich. Sowohl das Erkennen der Fahrstreifenlage, als auch die Einhaltung der geltenden Verkehrsregeln sind durch vollständige und gut sichtbare Fahrbahnmarkierungen und Verkehrszeichen möglich. Es ist daher zumindest denkbar, dass die betrachteten Fahrfunktionen rein auf Basis der bord-eigenen Sensorik und der vorhandenen Infrastruktur für die beschriebenen Regelfälle umgesetzt werden können. Es ist jedoch zu beachten, dass dabei nur teilweise eine Redundanz der Sensorprinzipien hinsichtlich der Wahrnehmung der Straßeninfrastruktur gegeben ist (vgl. Tabelle 3-16), bspw. können Verkehrszeichen auf Schildern nur über die Kamerasensorik wahrgenommen werden – entsprechende Informationen könnten somit für die geforderte Redundanz zusätzlich in einer geschichteten digitalen Karte verzeichnet sein). Die Einschätzung beruht zudem auf der Annahme von Tageslicht (Licht entgegenkommender Fahrzeuge ausschließend), trockener Witterung und korrektem Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer. Abweichungen von diesen Regelfällen sind in den folgenden besonderen Szenarien beschrieben.

#### 4.4 Szenarien für Fahrfunktionen mit besonderen Herausforderungen

Die sicherheitsrelevanten Eigenschaften der Infrastruktur lassen sich über Szenarien kombiniert mit dem gewünschten Automatisierungsgrad ableiten. In diesem Kapitel werden daher die beiden Fahr-

funktionen Autobahnchauffeur und Pendlerchauffeur betrachtet. Zunächst werden einige allgemeine Herausforderungen beschrieben, bevor dann der Standardfall und besondere Szenarien für die jeweilige Fahrfunktion beschrieben werden. Für jedes Szenario wird die Bedeutung von Infrastrukturelementen und die Herausforderung bei der Wahrnehmung dieser abgeleitet.

#### 4.4.1 Herausforderungen

Neben dem Standardfall für den Betrieb einer Fahrfunktion bestimmen seltene Ereignisse den Aufwand bei der Entwicklung der Automatisierung. Aus den Diskussionen auf dem Workshop wurde deutlich, dass die größten Herausforderungen beim automatisierten Fahren in der Regel immer dann entstehen, wenn Abweichungen vom Standardszenario auftreten. Aufgrund der relativ langen Übergabezeiten an den Fahrer müssen diese Abweichungen vom automatisierten Fahrzeug beherrscht werden. Als Beispiele hierfür sind denkbar:

- fehlende oder nicht erkennbare Fahrbahnmarkierung über einen kürzeren/längeren Streckenabschnitt,
- schlecht bzw. nicht erkennbare Verkehrszeichen (Verwitterung/Verschmutzung),
- schlechter Fahrbahnzustand, der z. B. Schädigungen am Fahrzeug beim Durchfahren führen kann,
- unterschiedliche Folientypen und Reflexionseigenschaften von Verkehrszeichen,
- Verkehrsführung in Arbeitsstellen entspricht gegebenenfalls in Teilen nicht den Regelplänen oder durch Witterungseinflüsse sind einzelne Baken im Bereich der Arbeitsstelle verschoben und/oder verdreht.

Ist beispielsweise die Sicherheit bei der Wahrnehmung eines Fahrstreifens nicht gegeben, so stellt sich die Frage nach den Sicherheitsanforderungen. Diese konnte im Rahmen des ersten Workshops nicht beantwortet werden und wurde im Projekt nicht weiterverfolgt. Dennoch wurde diskutiert, dass die Sicherheitsanforderungen aus der Norm ISO 26262 auch auf funktionale Anforderungen angewendet werden müssen. Dies würde beispielsweise für das unbeabsichtigte Verlassen des Fahrstreifens und somit für die Wahrnehmung des Fahrstreifens ein sehr hohes Automotive Safety Integrity Le-

vel (ASIL) nach Norm ISO 26262 nach sich ziehen – vermutlich ASIL D. Es ist daher eine umfassende Risikoanalyse zur Einstufung von Szenarien nach ASIL und entsprechende Auslegung der Systeme mit höchstwahrscheinlich redundanten funktionalen Komponenten und Hardwarekomponenten der Systeme erforderlich, z. B. können ein Verkehrszeichen und eine digitale Karte für die Information zum Ende eines Fahrstreifens redundant verwendet werden.

Im Zusammenhang mit der Sicherheit wurden die Fahrgeschwindigkeit und Differenzgeschwindigkeiten als maßgebend für erforderliche Sicherheitsmaßnahmen angesehen. Beide bedingen die Reaktionszeit und somit den Reaktionsweg sowie den Bremsweg des Fahrzeugs. Auch die Fahrsituation, in der ein sicherer Fahrzustand in Form eines Anhaltens erreicht wird, hängt von den Differenzgeschwindigkeiten zu anderen Verkehrsteilnehmern ab.

In der Diskussion im ersten Workshop stellte sich heraus, dass die Anforderungen an die Infrastruktur in vielerlei Hinsicht vergleichbar zum Menschen sind. Für den Menschen ist es jedoch ohne direkt sichtbare/wahrnehmbare Merkmale einfacher sich zurecht zu finden. Die noch nicht flächendeckend verfügbare informationstechnische Infrastruktur, die von vielen Experten als unbedingt notwendig für automatisierte Fahrzeuge bewertet wird, ist auch für menschliche Fahrer sinnvoll, z. B. die Warnung vor einem Stauende, einer Arbeitsstelle oder einem Falschfahrer.

Hier stellt sich die Frage, wie das Problem des „ersten Fahrzeugs“ in Kontakt mit bspw. einem Hindernis im Fahrstreifen und an einer herausfordernden Stelle gelöst werden kann. Selbst wenn Informationen an andere Fahrzeuge entweder direkt oder über ein Backend verteilt werden können, kann ein automatisiertes Fahrzeug als erstes ohne vorherige Information an eine herausfordernde Stelle kommen und muss diese sicher durchfahren oder anderweitig darauf reagieren. Eine Konsequenz ist, dass nur dann schneller automatisiert gefahren werden kann, wenn die Reichweite der fahrzeugeigenen Sensorik es zulässt, d. h. wenn ausreichende Informationen auf anderen Quellen (z. B. aus vorausfahrenden Fahrzeugen oder infrastrukturseitiger Sensorik) verfügbar sind. Um zu bewerten, wie herausfordernd eine Stelle ist, sind für die Nutzung in digitalen Karten und über Kommunikationswege Gütekriterien für den Zustand der Infrastruktur hilfreich. Wie in Kapitel 3.6 beschrieben gilt für die Nutzung von zusätzlichen Infrastrukturmaß-

nahmen, dass diese analog zu den bordeigenen Verfahren abgesichert sein müssen. Dies bedeutet, dass der Infrastrukturbetreiber die Qualität und Verfügbarkeit der Infrastruktur mit denselben Sicherheitsanforderungen wie nach Norm ISO 26262 für Fahrzeugsysteme umsetzen muss. Dies gilt auch für die Wartung.

Neben diesen Herausforderungen wurden beim ersten Workshop die folgenden weiteren Fragen aufgeworfen:

- Eine vorausschauende Fahrweise ist auch bei automatisierten Fahrzeugen elementar (z. B. ein rechtzeitiges Einleiten der Fahrerübernahme) → Wie kann dies durch Infrastruktur unterstützt werden bzw. welche Mindest- oder auch Minimalanforderungen sind an die Infrastruktur zu stellen?
- Ist kein Verlass auf die Infrastruktur, muss die Fahrfunktion so ausgelegt werden, als wäre faktisch keine Infrastruktur vorhanden. Was bedeutet das für die bordeigene Technologie?
- Kann die Verlässlichkeit der Infrastruktur sicher garantiert werden oder wird es immer das Problem des „ersten Fahrzeugs“ geben?
- Kann die Infrastruktur die Anzahl der Regelverstöße gegen die Straßenverkehrsordnung oder andere Gesetze und Ordnungen verringern, um den Verkehr für ein automatisiertes Fahrzeug „einfacher“ bzw. „vorhersehbarer“ zu gestalten? (z. B. Durchsetzen eines Überholverbots durch bauliche Trennung).

Als Ergebnis des Workshops lassen sich einige Aussagen formulieren, die allgemein für das Zusammenspiel Fahrzeug – Umwelt – Infrastruktur gelten:

- Infrastrukturmaßnahmen müssen dort ansetzen, wo Mensch bzw. Technik an Grenzen stößt (z. B. Fahrbahn im Dunkeln erkennen → Fahrbahnmarkierung).
- Eine einheitliche Gestaltung aller Infrastruktureinrichtungen ist hilfreich (z. B. Fahrbahnmarkierungen, Verkehrszeichen etc.).
- Eine Präzisierung von Informationen auf Schildern ist hilfreich (z. B. Unebene Fahrbahn in 200 m).
- Informationen sollten redundant an der Straße (Verkehrszeichen) und in einer zugänglichen Datenbank/digitalen Karte verfügbar sein.

- Eine Vernetzung von Fahrzeugen untereinander und mit Infrastruktur ist wünschenswert.

Generell gilt dies für alle Informationen, die nicht zuverlässig über die bordeigenen Komponenten wahrgenommen werden können. Diese müssen zusätzlich von extern bereitgestellt werden. Beispiele für mögliche Maßnahmen zur Erleichterung der Umfeldwahrnehmung und zur Erhöhung des Informationsgrades des automatisierten Fahrzeugs sind:

- Straßenbaulich/Entwurfstechnisch
  - getrennte Fahrbahnen sind hilfreich,
  - der Fahrbahnzustand muss generell gut sein (kein spezielles Problem der Automation),
  - die Straßenquerschnitte sollten einheitlich nach den geltenden Richtlinien der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen umgesetzt werden.
- Verkehrstechnisch
  - Verkehrszeichen und Leiteinrichtungen müssen generell gut wahrnehmbar sein (kein spezielles Problem der Automation).
  - Eine Wahrnehmung nur über einen Informationskanal ist nicht ausreichend. Dies gilt für Markierungen, Wechselverkehrszeichen und Leiteinrichtungen.
- Informationstechnisch
  - Eine digitale Karte kann zweiter Informationskanal sein.
  - Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Kommunikation kann helfen (sowohl Cloud-Dienste als auch lokale Informationsverbreitung).
  - Verkehrsdetektion und Streckenbeeinflussungsanlagen sind nur auf manchen Strecken verfügbar.
  - Die Übertragung der eigentlichen Information (z. B. Position Stauende) und zugehöriger Qualitätsinformationen ist hilfreich (z. B. Aktualität und Genauigkeit der Information).
  - Verkehrslageinformationen sind auch ohne Gefahrenmeldungen hilfreich.

Um die Herausforderungen bzw. Anforderungen an die Infrastruktur für ausgewählte vom Standardszenario abweichende Fahrscenarien zu berücksichtigen, wurden aufbauend auf den Ergebnissen des Workshops die folgenden Szenarien für die Fahrfunktion Autobahnchauffeur entwickelt.

#### 4.4.2 Szenarien für den Autobahnchauffeur

Der Autobahnchauffeur wird als eine der ersten automatisierten Fahrfunktionen gesehen, die im Serieneinsatz verfügbar sein werden. Der Grund hierfür liegt in der relativ guten Beherrschbarkeit der (planbaren) Standardszenarien. Probleme bereiten vor allem (nicht planbare) Szenarien wie zum Beispiel Unfälle, Glätte, fehlende Fahrbahnmarkierungen, Stauenden und andere Vorkommnisse, die nur mit der bordeigenen Sensorik wahrgenommen werden müssen. Bevor auf eine Auswahl dieser eingegangen wird, folgt eine Beschreibung der Herausforderungen des Standardfalls.

Für den Autobahnchauffeur bei Fahrt mit Richtgeschwindigkeit von 130 km/h ist die Wahrnehmung des Umfelds die aktuell noch limitierende Herausforderung. Speziell für höhere Geschwindigkeiten ist der Sicherheitsnachweis für die erforderliche Güte der Umfeldwahrnehmung bisher nicht erbracht. Die Zuverlässigkeit, mit der Fahrstreifen (eigener und weitere), weitere Verkehrsteilnehmer (stehend und fahrend) und Hindernisse und Umweltbedingungen wahrgenommen werden müssen, übersteigt die aktuelle Leistungsfähigkeit von Umfeldwahrnehmungssystemen. Beispielsweise kann die Sensorreichweite automatisierter Fahrzeuge für automatisiertes Fahren mit hohen Geschwindigkeiten (> 80 km/h) nicht ausreichen, wenn auf der Fahrbahn liegende kleinere Objekte (Reifenteile, verlorene Ladung etc.) beim Überfahren z. B. Schädigungen am Fahrzeug führen können. Hier stellt sich die Frage, welche anderen Möglichkeiten der Information über solche Objekte und Ereignisse infrastrukturseitig zur Verfügung gestellt werden können. Für diese infrastrukturseitigen Maßnahmen müssten dann die gleichen Sicherheitsanforderungen an Robustheit und Zuverlässigkeit gestellt werden, wie für bordeigene Systeme.

Im Standard- bzw. Normalfall entstehen bereits hohe Anforderungen an die Zuverlässigkeit der Umfeldwahrnehmung. Für Szenarien, die sich vom Standardfall unterscheiden, gelten diese ebenso. Zusätzlich reduziert sich meist die Reaktionszeit oder die Art und Anzahl der wahrzunehmenden Elemente verändert sich. Die folgende Liste mit denkbaren Sonderfällen bzw. besonderen Eigenschaften von Szenarien verdeutlicht dies:

- Gefahrzeichen nach StVO (z. B. Schnee- oder Eisglätte, Schleuder- oder Rutschgefahr, Ar-

beitsstelle) weisen auf besonders gefährliche Stellen hin.

- Beschaffenheit der Infrastruktur beeinträchtigt deren Wahrnehmung und kann zusätzliche Gefährdungen verursachen
  - Risse, Aufwölbungen oder andere Beschädigungen der Fahrbahn,
  - Qualität/Zustand von Markierungen,
  - Verschmutzung/Sichtbarkeit von Verkehrszeichen,
  - Konsistenz von Verkehrszeichen und Markierungen,
  - schmale Fahrstreifen,
  - fehlender Seitenstreifen,
  - nicht regelkonforme Verkehrsführung in Arbeitsstellen,
  - fehlerhafte Verkehrsführung, z. B. durch verrutschte oder umgefallene Leitbake oder durch zu großen Abständen zwischen Leitelementen.
- Hindernisse auf der Fahrbahn, z. B. verlorene Ladung, können sehr klein und dennoch gefährlich sein,
- Stauenden können an gefährlichen Stellen liegen, z. B. nach Kurven oder hinter Kuppen,
- die Lage von Unfallstellen ist eher zufällig und folgt nicht einer bestimmten Struktur,
- Arbeitsstellen enthalten zusätzliche Verkehrszeichen und Leitelemente,
- Witterungsbedingungen erschweren die Umfeldwahrnehmung und reduzieren zusätzlich die Reibbeiwerte zwischen Reifen und Fahrbahn,
- hohe Geschwindigkeitsdifferenzen beim Fahrstreifenwechsel,
- einfahrende Fahrzeuge im Bereich von Knotenpunkten oder bewirtschafteten und unbewirtschafteten Rastanlagen,
- Fahrstreifenreduktionen mit Reißverschlussverfahren und ggf. geringen Zeitlücken,
- Bildung einer Rettungsgasse für Einsatzfahrzeuge mit Sonderrechten,

- Lkw-Pulks mit geringen Zeitlücken/Sicherheitsabständen zwischen Lkw verhindern/behindern regelkonformes Ein-/Ausfahren.

Die folgenden Szenarien sollen die Herausforderungen beispielhaft zeigen. Für die beispielhaften Szenarien werden anschließend mögliche Infrastrukturmaßnahmen erarbeitet, diskutiert (vgl. Kapitel 5) und abschließend bewertet (vgl. Kapitel 6).

### Szenario A1: Hindernis im eigenen Fahrstreifen

Das automatisierte Fahrzeug fährt auf einem Fahrstreifen einer Autobahn. Vor dem Fahrzeug befindet sich ein Hindernis, das beim Überfahren z. B. Schädigungen am Fahrzeug führt. Das automatisierte Fahrzeug muss in diesem Fall entweder einen Fahrstreifenwechsel ausführen oder vor dem Hindernis anhalten und dann einen Fahrstreifenwechsel ausführen. Beispiele für Hindernisse sind u. a. verlorene Ladung, Fahrzeugteile (z. B. Metall- oder Reifenteile), aber auch Pannenfahrzeuge oder Stauenden.

Von einer rechtzeitigen Übergabe an den menschlichen Fahrer innerhalb von 10 s, kann nicht unter allen Umweltbedingungen ausgegangen werden. Die frühzeitige Hinderniserkennung durch die Umfeldsensorik hängt wesentlich von diesen Bedingungen ab. Darüber hinaus könnten starke Bremsmanöver die Kontrollierbarkeit des nachfolgenden Verkehrs negativ beeinflussen. In (RESCHKA & MAURER, 2015) finden sich einige Beispielrechnungen hierzu.

### Szenario A2: Fehlender Seitenstreifen

Das automatisierte Fahrzeug fährt auf einer Autobahn mit zwei Fahrstreifen und einem Seitenstreifen. Der Seitenstreifen endet an einer bestimmten Stelle (Querschnitt ohne Seitenstreifen). Das Fahrzeug fährt somit automatisch in einen Bereich, in dem ein Verlassen des Fahrstreifens nach rechts nicht möglich ist. Für ein SAE-Level-3-System ist die Übergabe an den Menschen möglich. Eine kurzzeitige Weiterfahrt erscheint akzeptabel. Für ein SAE-Level-4-System kommt eine Übergabe eigentlich nicht infrage. Allerdings ist auch hier der Versuch der Übergabe an den Fahrer sinnvoll. Kann jedoch keine Übergabe erfolgen, muss das Fahrzeug auch ohne Seitenstreifen und somit ohne Möglichkeit die Fahrstreifen zu verlassen weiterfahren. Daraus resultieren sehr hohe Anforderungen

an die Zuverlässigkeit der Fahrfunktion. Ein Anhalten auf einem der Fahrstreifen könnte zu einer Gefährdung für den rückwärtigen Verkehr und die Insassen des Fahrzeugs führen.

### Szenario A3: Arbeitsstelle auf Richtungsfahrbahn

Das Fahrzeug befährt einen Autobahnabschnitt mit zwei Fahrstreifen pro Richtung, die in der betreffenden Fahrtrichtung für eine Arbeitsstelle kürzerer Dauer temporär auf einen Fahrstreifen reduziert werden. Die Maßnahme wird gemäß den Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen (RSA) (BMVBS, 1995/2002) an Straßen abgesichert.

Das umfasst die Ankündigung der Arbeitsstelle in 800 bis 1.600 m Entfernung, die (ggf. stufenweise reduzierte) Geschwindigkeitsbeschränkung beginnt in 800 bis 1.200 m davor. Zudem wird ein blinkender Vorankündigungspfeil in 300 m Entfernung vor Beginn der Arbeitsstelle eingerichtet. In Ergänzung dazu können Verkehrszeichen oder z. B. auch LED-Tafeln (500 – 800 m vor der Arbeitsstelle) auf die eingerichtete Verkehrsführung (i. d. R. also Reduktion eines Fahrstreifens) hinweisen. Zur Absperzung bzw. Markierung kommen Leitkegel oder -baken zum Einsatz. Ein möglicher Regelplan ist beispielhaft in Bild 4-2 dargestellt.

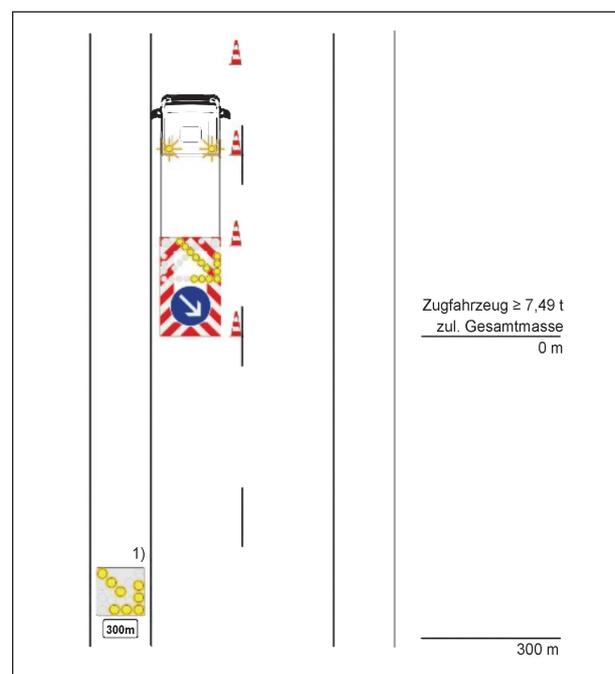


Bild 4-2: Regelplan D III/2I „Arbeitsstelle von kürzerer Dauer auf dem linken Fahrstreifen einer Richtungsfahrbahn“ (Quelle: ARS 6/2014 (VkBfI, 2015, S. 91 ff.))

Je nach Art der Arbeitsstelle sowie ihrer Position im Querschnitt steht kurzzeitig kein Seitenstreifen zur Verfügung. Das bedeutet, dass ein Anhalten in Arbeitsstellen vermieden werden sollte, um den nachfolgenden Verkehr nicht zu gefährden oder zu beeinträchtigen. Bei Befolgung der RSA ist die Arbeitsstelle ca. 1.000 m zuvor anzukündigen. Es ist zu erwähnen, dass Arbeitsstellen kürzerer Dauer auch beweglich sein können (Mäharbeiten etc.), auch bei Absicherung nach D III/2 I. Die bewegliche Arbeitsstelle ist sicherlich schwieriger zu handhaben für das automatisiert fahrende Fahrzeug. Somit liegt der Schluss nahe auch bei einem SAE-Level-4-System eine Fahrerübernahme anzustoßen. Wird diese ignoriert, muss das Fahrzeug selbst in der Lage sein, die Arbeitsstelle sicher zu durchfahren. Dies beinhaltet unter Umständen auch Fahrstreifenwechsel.

#### 4.4.3 Szenarien für den Pendlerchauffeur

Die Einsatzumgebung des Pendlerchauffeurs enthält im Vergleich zum Autobahnchauffeur eine Vielzahl von weiteren Elementen und möglichen Szenarien. Zwar sind die gefahrenen Geschwindigkeiten auf Landstraßen in der Regel geringer als auf Autobahnen, allerdings sind auch die infrastrukturseitigen Sicherheitsmaßnahmen weniger stark ausgeprägt und vielfältiger.

Beispielsweise gibt es auf Landstraßen keine getrennten Richtungsfahrbahnen, wodurch der Gegenverkehr mit geringen lateralen Abständen und hohen relativen Geschwindigkeiten entgegenkommt. Auch ist auf Landstraßen häufiger mit Verschmutzungen zu rechnen, da auch landwirtschaftlicher Verkehr zugelassen sein kann.

Daraus resultieren bereits für den Standardfall höhere Anforderungen an die Fahrfunktion. Gleichzeitig steigt die Anzahl an möglichen Sonderfällen im Vergleich zum Autobahnchauffeur.

Neben den Fertigkeiten des Autobahnchauffeurs benötigt der Pendlerchauffeur daher die folgenden zusätzlichen Fertigkeiten:

- Wahrnehmung einer größeren Anzahl von Verkehrszeichen,
  - Wahrnehmung von Lichtsignalanlagen,
  - Umgang mit fehlenden, erneuerungsbedürftigen, beschädigten oder auch stark verschmutzten Markierungen und Verkehrszeichen,
  - Umgang mit sehr langsam fahrenden Verkehrsteilnehmern (Fußgänger, Radfahrer, Landmaschinen),
  - Reaktion auf Wildwechsel,
  - Überhol- und Abbiegemanöver.
- Der Standardfall benötigt daher eine leistungsfähigere Umfeldwahrnehmung im Hinblick auf die Anzahl der unterschiedlichen wahrzunehmenden Elemente im Vergleich zum Autobahnchauffeur. Hier ergeben sich Elemente, die nur durch ein bordeigenes Verfahren wahrgenommen werden können, wie zum Beispiel die Zustände von Lichtsignalanlagen oder auch plötzlich auftretende Hindernisse. Das Problem des „ersten Fahrzeugs“ ist hier besonders relevant. Alle nachfolgenden und entgegenkommenden Fahrzeuge könnten über Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation gewarnt werden.
- Zu den oben genannten Herausforderungen addieren sich zahlreiche weitere Ereignisse und Eigenschaften von Elementen, die die Anforderungen weiter erhöhen. Die folgende Liste an Sonderfällen und besonderen Eigenschaften von Umfeldelementen und Szenarien soll dies verdeutlichen:
- Risse, Aufwölbungen oder andere Beschädigungen der Fahrbahn, die durch fahrzeugeitige Sensorik nicht erkannt werden können.
  - Lichtsignalanlagen und Verkehrszeichen
    - Verdeckung durch andere Verkehrsteilnehmer/Bäume,
    - Deformierung,
    - Verschmutzung,
    - Reflexionen abhängig von den Lichtverhältnissen,
    - nicht genormte Zusatzschilder, teils mit sicherheitsrelevanten Informationen,
    - „Feindliches Grün“,
    - falsche Verkehrszeichen,
    - Widersprüche.
  - Fahrbahnmarkierungen
    - Erkennbarkeit bei unterschiedlichen Witterungsbedingungen,
    - nicht regelkonforme Markierungen,
    - widersprüchliche Markierungen, z. B. im Bereich einer Arbeitsstelle,

- fehlende Markierungen.
- Arbeitsstellen
  - Leitelemente,
  - Verkehrszeichen,
  - Verschmutzung,
  - Personen auf der Fahrbahn.

Die folgenden vier Szenarien sollen die Herausforderungen beispielhaft zeigen. Auch für diese Szenarien werden anschließend mögliche Infrastrukturmaßnahmen erarbeitet, diskutiert (vgl. Kapitel 5) und abschließend bewertet (vgl. Kapitel 6).

#### **Szenario P1: Fahrt auf einbahniger Straße (Kraftfahrstraße) mit verdeckten oder fehlenden Leitlinien**

Ein Beispiel für ein Szenario mit Gefährdungspotenzial ist bereits die normale Fahrt auf einer einbahnigen Straße mit verdeckten oder fehlenden Leitlinien. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass Markierungen und vertikale Verkehrszeichen vorhanden und sichtbar bzw. erkennbar sind. Eine mögliche Gefährdung könnte sich folgendermaßen ergeben: Der Fahrstreifen kann nicht mehr wahrgenommen werden beziehungsweise wird die Bedeutung einer Markierung falsch interpretiert, da die Markierung beschädigt, verschmutzt oder verdeckt ist. Das Fahrzeug ist daher auf zusätzliche Orientierungshilfen angewiesen, zum Beispiel Leitpfosten oder passive Schutzeinrichtungen (sofern vorhanden). Dabei ist zu beachten, dass der Fahrbahnverlauf anhängig vom verwendeten Sensorprinzip und der Art der vorhandenen Leiteinrichtungen unterschiedlich sicher wahrgenommen werden kann.

#### **Szenario P2: Mischverkehr mit hohen Geschwindigkeitsdifferenzen**

Besonders zu beachten ist der Mischverkehr auf Landstraßen durch die unterschiedlichen Verkehrsteilnehmer. Neben Pkw, Lkw, Motorrädern und Sonderfahrzeugen gibt es eine Vielzahl weiterer Verkehrsteilnehmer, wie zum Beispiel Bau- und Landmaschinen, Leichtkrafträder, Fahrräder und Fußgänger. Hier spielen die Sichtverhältnisse der Umfeldsensorik abhängig von Verdeckungen, Lichtverhältnissen, Geschwindigkeitsdifferenzen und Wetterbedingungen eine entscheidende Rolle, da grundsätzlich jede Klasse von Verkehrsteilnehmern vorkommen kann und somit wahrgenommen werden muss.

#### **Szenario P3: Überholvorgang auf einbahniger Straße**

Auf Landstraßen kommt es zu Überholvorgängen, wenn beispielsweise langsam fahrende Landmaschinen oder Radfahrer überholt werden sollen. Für diesen Fall ist eine hohe Sichtweite der Umfeldwahrnehmung erforderlich, da entgegenkommende Fahrzeuge sehr schnell sein können und das eigene Fahrzeug zum Überholen möglicherweise mit mehr als 40 km/h fahren muss, um zügig und sicher zu überholen. Die resultierenden relativen Geschwindigkeiten stellen eine hohe Gefährdung dar, beispielsweise wenn der Verlauf der Straße nur bedingt erfasst werden kann. Dies kann ein Hemmnis für das automatisierte Fahren ohne verfügbaren Fahrer auf Landstraßen sein, auf denen solche hohen Relativgeschwindigkeiten möglich sind.

#### **Szenario P4: Arbeitsstelle auf einbahniger Straße**

Auf Landstraßen kommt es bei Arbeitsstellen zu einer Beeinträchtigung des Verkehrsflusses, wenn Fahrstreifen und somit eine Fahrtrichtung blockiert wird oder die Fahrstreifenbreite stark verringert ist. In beiden Fällen werden Hinweisschilder auf die Arbeitsstelle in definiertem Abstand zum Anfangspunkt der Maßnahme aufgestellt. Regelungen hierzu sind grundsätzlich in den RSA (BMVBS, 1995/2002) vorhanden.

Besonders die Reduzierung der Geschwindigkeit vor einer Arbeitsstelle erhöht die Sicherheit, da beispielsweise auch Lichtsignalanlagen eingesetzt werden können und somit mit stehenden Fahrzeugen oder entgegenkommenden Fahrzeugen zu rechnen ist. Hieraus resultiert eine mögliche Gefährdung durch eine unzureichende Erkennung der Arbeitsstelle und den Hinweisschildern auf diese bei Annäherung und Fahrt mit höheren Geschwindigkeiten. Besonders die Wahrnehmung der Verkehrszeichen durch bildgebende Verfahren kann bisher nicht durch eine weitere Technologie an Bord des automatisierten Fahrzeugs abgesichert werden.

## **4.5 Fazit**

Basierend auf der Betrachtung der Fahrfunktionen Autobahnchauffeur und Pendlerchauffeur und der damit verbundenen Einsatzgebiete lassen sich die folgenden noch Herausforderungen für automatisierte Fahrzeuge ableiten:

- Die Wahrnehmung der Elemente des Umfelds muss zuverlässig funktionieren und redundant erfolgen. Das ist nach aktuellem Stand der Technik bei ausschließlicher Verwendung bordeigener Sensorik nicht immer möglich. Eine wichtige unterstützende Funktion zur Umfeldwahrnehmung kann eine hochgenaue, geschichtete digitale Karte mit temporären Merkmalen übernehmen.
- Die Reaktionszeit auf plötzlich im Sichtbereich der Sensoren auftretende Hindernisse bedingt zusammen mit der Sensorsichtweite die mögliche Fahrgeschwindigkeit.
- Auf Landstraßen treten aufgrund des Gegenverkehrs sehr hohe Relativgeschwindigkeiten auf. Bei den heute technisch realisierbaren Sensorsichtweiten bleiben automatisierten Fahrzeugen gegebenenfalls nur wenige Sekunden, auf andere Verkehrsteilnehmer zu reagieren.
- In SAE-Level 3 lassen sich viele Szenarien durch eine Übergabe an den Fahrer sicher lösen – ggf. kombiniert mit einem automatischen Verzögern und Anhalten des automatisierten Fahrzeugs. Die Herausforderung ist das rechtzeitige Erkennen der Funktionsgrenze, um mit ausreichender Zeitreserve die erforderliche Übergabe einleiten zu können.
- Beim Autobahnchauffeur ist nur eine Teilmenge der Klasse von Verkehrsteilnehmern, z. B. keine Fahrräder, zu beachten. Dies reduziert die Anforderungen. Im Fall des Pendlerchauffeurs können alle Klassen von Verkehrsteilnehmern auftreten.

## 5 Infrastrukturmaßnahmen zur Förderung/Unterstützung automatisierten Fahrens

### 5.1 Einleitung

Kapitel 4 zeigt, dass ein automatisiertes Fahren unter Normalbedingungen in den definierten Regelfällen ohne zusätzliche Infrastrukturmaßnahmen möglich erscheint. Die Grenzen der Leistungsfähigkeit entstehen durch besondere Situationen, wie z. B. das Auftreten eines Hindernisses oder das Fehlen von Leitlinien. Auch diese Situationen bedürften indes einer Lösung, um automatisiert zu fahren. Im

Folgenden werden deshalb für die vorab detailliert beschriebenen Szenarien mögliche Infrastrukturmaßnahmen zur Förderung bzw. Unterstützung des automatisierten Fahrens zusammengestellt.

Die grundsätzlich möglichen bzw. denkbaren Maßnahmen werden entsprechend der vorgenommenen Einteilung in Maßnahmen der

- entwurfstechnischen Infrastruktur
  - Linienführung,
  - bauliche Elemente,
- verkehrstechnischen Infrastruktur
  - Markierung,
  - Beschilderung,
  - Verkehrsbeeinflussungsanlagen und
  - Lichtsignalanlagen,
- informationstechnischen Infrastruktur
  - digitale Karten und
  - Vehicle-to-X-Kommunikation

differenziert.

Zusätzlich wird an dieser Stelle auch die bordeigene Sensorik und deren möglicher Anteil zur Unterstützung des automatisierten Fahrens betrachtet.

## 5.2 Infrastrukturmaßnahmen für den Autobahnchauffeur

### 5.2.1 Szenario A1: Hindernis im eigenen Fahrstreifen

Das automatisch fahrende Fahrzeug fährt auf einem Fahrstreifen einer Autobahn. Vor dem Fahrzeug taucht ein Hindernis auf, welches beim Überfahren z. B. Schädigungen am Fahrzeug führt. Das automatisch fahrende Fahrzeug muss in diesem Fall entweder rechtzeitig einen Fahrstreifenwechsel ausführen oder vor dem Hindernis anhalten und – sofern möglich – einen Fahrstreifenwechsel aus dem Stillstand ausführen. Wie in Kapitel 3.8 beschrieben, stellt dieses Szenario eine hohe Anforderung an die bordeigene Sensorik dar, da vor al-

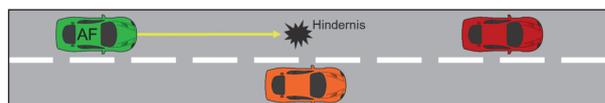


Bild 5-1: Szenario A1 – Hindernis im eigenen Fahrstreifen

lem kleine Hindernisse nicht bzw. nur sehr spät erkannt werden können. Eine Übergabe an den Menschen ist entsprechend nicht innerhalb von 10 s möglich. Auch eine Vollbremsung kann nicht immer sicher durchgeführt werden.

Seitens der entwurfstechnischen bzw. baulichen Infrastruktur sind hier keine unterstützenden Maßnahmen denkbar.

Die verkehrstechnische Infrastruktur könnte hier einen Beitrag leisten, indem beispielsweise vorhandene Videodetektionssysteme automatisiert die Fahrstreifen scannen und ggf. Hindernisse erkennen. Derartige Systeme sind vereinzelt im Bereich von Anlagen zur temporären Seitenstreifenfreigabe vorhanden. Hierfür sind Kameras im Abstand von ca. 2 km im Seitenraum installiert. Mittels geeigneter Software wird die Hindernisfreiheit des Seitenstreifens geprüft. Sofern ein liegengebliebenes Fahrzeug oder ein Hindernis auf dem Seitenstreifen detektiert wird, wird dieser über die vorhandenen Wechselverkehrszeichen gesperrt. Nach Beseitigung des Hindernisses oder auch der Weiterfahrt des Fahrzeuges kann der Seitenstreifen anschließend wieder zur Befahrung freigegeben werden. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass diese bislang installierten Systeme nicht notwendigerweise für die Erkennung aller für das automatisierte Fahren relevanten „kleinen“ Hindernisse ausgelegt sind. Auch stellt sich die Frage nach der Eignung des Installationsabstandes bzw. möglicher Aufrüstung vorhandener Systeme, die bislang nur für den Zweck der Seitenstreifenfreigabe ausgelegt sind.

Eine automatisierte Kontrolle der Hindernisfreiheit auf dem Seitenstreifen stellt grundsätzlich sehr hohe Anforderungen an die technische Verfügbarkeit, die Auflösung und die Zuverlässigkeit des Systems, da die Kameras mindestens das gleiche Sicherheitslevel (vgl. ASIL) wie die bordeigene Sensorik aufweisen müssen. Diese Anforderungen nehmen deutlich zu, wenn das System zur Kontrolle der Hindernisfreiheit auf der gesamten Breite der Richtungsfahrbahn eingesetzt werden soll.

Nach erfolgter Detektion eines Hindernisses kann die Kommunikation der Gefahrenstelle über die ggf. vorhandenen Wechselverkehrszeichen einer Streckenbeeinflussungsanlage erfolgen. Hier könnte dann der betroffene Fahrstreifen temporär gesperrt werden. Zusätzlich könnte die zulässige Höchstgeschwindigkeit beschränkt werden.

Auf Seite der informationstechnischen Infrastruktur ist es denkbar, dass erkannte Gefahrenstellen via Vehicle-to-Vehicle- bzw. Vehicle-to-Infrastructure-Kommunikation (V2V bzw. V2I) an andere Verkehrsteilnehmer im näheren Umfeld gemeldet werden. Darüber hinaus könnte die Position eines Hindernisses nach der Erkennung durch ein vernetztes Fahrzeug oder fahrbahnseitige Videokameras an eine zentrale Stelle übermittelt werden und hier in einer zentralenseitigen dynamischen Datenbank/Karte verwaltet werden. Von der Zentralstelle aus ließe sich die Gefahrenstelle anderen Verkehrsteilnehmern mittels unterschiedlichen Kommunikationsmedien (DAB, Mobilfunk) bereitstellen. Durch eine Georeferenzierung können die Informationen Bestandteil der bordeigenen hoch dynamischen digitalen Karte werden und für das rechtzeitige Erkennen der Gefahrenstelle durch das bordeigene System eingesetzt werden.

Da sämtliche Maßnahmen auf verkehrs- oder informationstechnischer Ebene eine bestimmte Reaktionszeit zwischen Erkennen eines Hindernisses und Bereitstellen der Information benötigen, muss die bordeigene Sensorik eines automatisiert fahrenden Fahrzeugs weiterhin in der Lage sein, Hindernisse im eigenen Fahrstreifen in Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Sichtverhältnissen zu erkennen, sodass sich rechtzeitig ein entsprechendes Fahrmanöver zur Vermeidung bzw. Begrenzung eines Schadens einleiten lässt. Zusätzlich sollte das Fahrzeug über die entsprechenden Kommunikationseinheiten verfügen, damit Warnungen vor Gefahrenstellen versendet oder empfangen werden können.

## 5.2.2 Szenario A2a: Fehlender Seitenstreifen

Das automatisiert fahrende Fahrzeug fährt auf einem Autobahnabschnitt mit zwei oder drei Fahrstreifen und einem Seitenstreifen. An einer Stelle im Netz endet der Seitenstreifen<sup>12</sup>, auch Nothaltebuchten sind nicht in einem regelmäßigen Abstand vorhanden. Rastanlagen können aufgrund des großen Regelabstands von 15 bis 20 km ebenfalls nicht als Rückfallebene betrachtet werden. Das Fahrzeug fährt somit automatisch in einen Streckenabschnitt

<sup>12</sup> Laut BMVI (Stand Januar 2014) sind von 12.917 Autobahnkilometer 10.243 km mit beidseitigem (jeweils ein Seitenstreifen pro Richtung) und weitere 1.102 km mit einseitigem Seitenstreifen ausgestattet.

ein, in dem ein Verlassen des Fahrstreifens nach rechts nicht mehr möglich ist.

Für ein SAE-Level-3-System ist grundsätzlich eine Übergabe an den Menschen möglich. Eine kurzzeitige Weiterfahrt erscheint hier akzeptabel.

Bei einem SAE-Level-4-System muss das Fahrzeug selbstständig in einen sicheren Zustand übergehen. Dennoch ist auch hier der Versuch der Übergabe an den Fahrer sinnvoll. Kommt der Fahrer der Aufforderung nicht nach, muss das Fahrzeug auch ohne Seitenstreifen und somit ohne die Möglichkeit, den Fahrstreifen nach rechts verlassen zu können, weiterfahren. Ein Anhalten auf einem der Fahrstreifen kann zu einer Gefährdung für den rückwärtigen Verkehr und für die Insassen des automatisiert fahrenden Fahrzeugs führen. Daraus resultieren sehr hohe Anforderungen an die Zuverlässigkeit der Fahrfunktion und entsprechend auch an die bordeigene Sensorik. Problematisch erscheint hier v. a. die Kombination mit anderen denkbaren Szenarien, in denen die Sensorik z. B. widersprüchliche Eingaben erhält (redundante Sensoren liefern unterschiedliches Bild), der Fahrer einer Übernahmeaufforderung jedoch nicht nachkommt, das Fahrzeug durch den fehlenden Seitenstreifen aber auch nicht in der Lage ist, einen sicheren Zustand einzunehmen.

Um dieser Problematik entgegenzuwirken, ist es auf der Ebene der entwurfstechnischen Infrastruktur denkbar, bei sämtlichen Neu- und Ausbaumaßnahmen an deutschen Autobahnen einen Seitenstreifen einzurichten. Sofern die erforderliche Querschnittsbreite stellenweise nicht vorhanden sind (z. B. bei Stadtautobahnen), kann ersatzweise die Einrichtung von Nothaltebuchten geprüft werden. Auf diese Weise ließe sich sicherstellen, dass ein automatisiert fahrendes Fahrzeug nahezu jederzeit sicher abgestellt werden kann, sofern eine Fahrerübernahme ausbleibt.

Eine zentrale Maßnahme im Bereich der verkehrstechnischen Infrastruktur ist die rechtzeitige Information des automatisiert fahrenden Fahrzeugs über die vorhandene Infrastruktur auf dem folgenden Streckenabschnitt. Dies kann über ortsfeste Verkehrszeichen erfolgen, die an (mindestens) zwei Punkten vor dem Ende des Seitenstreifens jeweils rechts und links der Fahrbahn aufgestellt werden und die folgende Informationen enthalten sollten:

- Seitenstreifen endet (ggf. mit Piktogramm),

- Entfernung bis Ende (z. B. in 2.000 m) und
- ggf. Entfernung bis zur nächsten Nothaltebucht.

Für den sicheren Betrieb von automatisiert fahrenden Fahrzeugen in SAE-Level 4 muss sichergestellt sein, dass das Fahrzeug die Information rechtzeitig erhält. Darum kann als Ergänzung zu der Beschilderung das Aufbringen einer besonderen Fahrbahnmarkierung (als Strich- oder QR-Code) erwogen werden, welche nur durch das Fahrzeug erkannt und verarbeitet werden kann. Diese Markierung muss dabei so gestaltet sein, dass sie für andere Verkehrsteilnehmer nicht zu Verwirrung und/oder auch Ablenkung führt.

Ein wesentlicher Aspekt bei der Unterstützung des automatisierten Fahrens ist die redundante Übermittlung von Informationen an das Fahrzeug. Diese Redundanz ließe sich durch die informationstechnische Infrastruktur herstellen: In Ergänzung zu den rein optisch wahrnehmbaren Verkehrszeichen und Fahrbahnmarkierungen könnte das Fahrzeug die Informationen über einen demnächst endenden Seitenstreifen via V2I-Kommunikation erhalten. Hierfür sind verschiedene technische Umsetzungen denkbar.

Aufgrund der Langfristigkeit des Szenarios würde sich als weitere Maßnahme anbieten, vorhandenes Kartenmaterial so zu erweitern, dass sich daraus exakte Informationen über Streckenabschnitte mit bzw. ohne Seitenstreifen ziehen lassen. Ergebnis wäre eine hochgenaue (fahrstreifenfeine) Karte, wie sie heute der NDS-Standard<sup>13</sup> bietet. Über eine fahrzeugseitige Detektion können auch Veränderungen erkannt und in einer hochgenauen digitalen Karte berücksichtigt werden. Hierdurch wäre die Information über kritische Abschnitte frühzeitig bekannt, sodass Fahrern und Fahrzeugen eine ausreichende Reaktionszeit eingeräumt werden kann.

Eine wesentliche Anforderung an die bordeigene Sensorik besteht darin, die bereitgestellten Informationen über verschiedene Kanäle aufzunehmen, so dass sich rechtzeitig entsprechende Handlungen (z. B. Fahrerübernahme oder Abstellen auf dem Seitenstreifen vor dessen Ende) einleiten lassen. Zusätzlich sollte das Fahrzeug auch bei einer Fehl-

<sup>13</sup> Navigation Data Standard (NDS) ist ein standardisiertes Format für Kartendatenbanken in Navigationssystemen. Aktuelle Version: 2.4.3 vom 4. Februar 2016.

funktion in der Lage sein, kürzere Strecken sicher zurückzulegen, um z. B. planfreie Knotenpunkte zu durchfahren, in denen der Seitenstreifen abschnittsweise zugunsten von Ein- und Ausfahrten, sowie Verflechtungsstrecken unterbrochen wird. Was für eine entsprechende Überbrückungsfunktion als ausreichend anzusehen wäre, ist klärungsbedürftig und von der konkreten Funktion abhängig.

### 5.2.3 Szenario A2b: Temporäre Seitenstreifenfreigabe

Die temporäre Seitenstreifenfreigabe (TSF) stellt einen Sonderfall des Szenarios A 2 dar: Das automatisiert fahrende Fahrzeug befährt einen Streckenabschnitt mit zwei oder drei Fahrstreifen und einem Seitenstreifen. Der Seitenstreifen kann durch entsprechende Wechselverkehrszeichen temporär als Fahrstreifen freigegeben werden. Die Voraussetzungen nach den RAA (z. B. Nothaltebuchten im Abstand von maximal 1.000 m) werden als erfüllt betrachtet.

Analog zu Szenario A2a (vgl. Kapitel 5.2.2) ist bei aktiver Seitenstreifenfreigabe die Übergabe an den Fahrer sinnvoll, da zu dieser Zeit kein Seitenstreifen zur Verfügung steht. Jedoch muss das Fahrzeug bei SAE-Level 4 auch hier in der Lage sein, aus der Situation selbstständig einen sicheren Zustand abzuleiten und diesen einzunehmen. Sofern der Seitenstreifen freigegeben ist, kann das Fahrzeug dort nicht abgestellt werden, sondern muss die Strecke bis zur nächsten Nothaltebucht automatisiert zurücklegen. Die dadurch entstehenden Herausforderungen an die bordeigene Sensorik sind entsprechend mit denen in Kapitel 5.2.2 vergleichbar.



Bild 5-2: Szenario A2b – Temporäre Seitenstreifenfreigabe  
(Foto: S. Hoffmann)

Auf der Seite der entwurfstechnischen Infrastruktur erscheint es sinnvoll, die Streckenabschnitte, auf denen eine temporäre Freigabe des Seitenstreifens möglich ist, in regelmäßigen Abständen mit Nothaltebuchten auszustatten (vorgegeben nach (Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA))). Damit könnte die Länge der gefahrenen Strecke bis zum Erreichen eines sicheren Zustands (hier: Stillstand in der Nothaltebucht) auf einem beherrschbaren Niveau gehalten werden.

Die verkehrstechnische Infrastruktur stellt für die temporäre Seitenstreifenfreigabe bereits im laufenden Betrieb eine wichtige Voraussetzung dar. Das Aktivieren und das Aufheben der Maßnahme werden den Verkehrsteilnehmern durch Wechselverkehrszeichen angezeigt. Zur Unterstützung des automatisierten Fahrens ist es hier denkbar, die Freigabe des Seitenstreifens durch Verkehrszeichen in einiger Entfernung (z. B. 1.000 m) vor Beginn der Maßnahme anzukündigen, sodass ausreichend Zeit zur Verfügung steht, in der z. B. eine Übernahmeaufforderung oder der Übergang in eine erhöhte Aufmerksamkeit (ggf. mit Geschwindigkeitsreduktion) erfolgen können. Diese Ankündigung könnte alternativ so gestaltet werden, dass sie nur maschinell und nicht für andere Fahrer wahrnehmbar ist (z. B. Strichcode auf Fahrbahnoberfläche o. Ä.). Weiterhin erscheint es sinnvoll, die Entfernung zur nächsten Nothaltebucht per Verkehrszeichen anzuzeigen.

Da bei einer rein optischen Wahrnehmung der Wechselverkehrszeichen Informationslücken auftreten können, sollte auch für diesen Fall eine redundante Lösung vorhanden sein. Diese könnte durch die informationstechnische Infrastruktur analog zu Szenario A2a (vgl. Kapitel 5.2.2) via V2I-Kommunikation erfolgen. Das Fahrzeug würde per Funk Informationen über die Aktivität der Maßnahme, die Entfernung bis zum betreffenden Streckenabschnitt, sowie die Entfernung bis zur nächsten Nothaltebucht erhalten und könnte eine entsprechende Reaktion einleiten.

Damit bereits im Vorfeld bekannt ist, in welchen Streckenabschnitten mit dem Auftreten des Szenarios gerechnet werden kann, besteht die Möglichkeit, die Information über die Ausstattung eines Abschnitts mit der temporären Seitenstreifenfreigabe in eine digitale Karte zu integrieren. Dadurch ließe sich vorausplanen, in welchen Bereichen eine erhöhte Aufmerksamkeit des Fahrzeugs notwendig ist.

Da die Freigabe des Seitenstreifens auch dann erfolgen kann, wenn sich ein automatisiert fahrendes Fahrzeug bereits innerhalb des entsprechenden Streckenabschnitts befindet, müsste die bordeigene Sensorik so ausgelegt sein, dass das Fahrzeug bis zur nächsten Nothaltebucht weiterfahren kann, sofern der Fahrer einer Übernahmeaufforderung nicht nachkommt.

### **Szenario A3: Arbeitsstelle auf Richtungsfahrbahn**

Das automatisiert fahrende Fahrzeug befährt einen Abschnitt mit zwei Fahrstreifen pro Richtung. Aufgrund einer temporären Baumaßnahme wird die Fahrbahn kurzzeitig auf einen Fahrstreifen verengt. Diese Arbeitsstelle wird gemäß den RSA (vgl. Kapitel 4.4.2) eingerichtet, abgesichert und angekündigt. Das automatisierte Fahrzeug muss – je nach Position der Arbeitsstelle – einen Fahrstreifenwechsel mit Einfädung unter Anwendung des Reißverschlussverfahrens ausführen und die Arbeitsstelle mit verminderter Geschwindigkeit (i. d. R. 80 km/h bzw. 60 km/h für nächtliche Arbeitsstellen) durchfahren.

Die Herausforderung für die bordeigene Sensorik besteht dabei in dem korrekten Erkennen der Verkehrsführung am tatsächlichen Arbeitsstellenbeginn sowie im darauffolgenden Bereich der Arbeitsstelle. Hier kann es unter Umständen sein, dass kurzzeitig kein Seitenstreifen oder keine Nothaltebucht vorhanden ist (vgl. Szenario A2a), sodass das Fahrzeug für einen sicheren Zustand erst nach der Arbeitsstelle anhalten könnte.

Da die Arbeitsstelle am Tag oder in der Nacht ein Szenario von stark begrenzter Dauer darstellt, ist seitens der entwurfstechnischen Infrastruktur keine Maßnahme denkbar.

Im Bereich der verkehrstechnischen Infrastruktur lässt sich durch eine Vergrößerung des Abstands zwischen Vorankündigung und Beginn der Arbeitsstelle auf ca. 2.000 m eine ausreichend große Reaktionszeit einräumen. Gleiches gilt für die Einleitung des Geschwindigkeitstrichters. Darüber hinaus sollte die beidseitige Anordnung aller Verkehrszeichen erwogen werden. Laut RSA (BMVBS, 1995/2002) ist eine beidseitige Anordnung lediglich empfohlen, nicht aber zwingend vorgeschrieben. Weiterhin sollte regelmäßig kontrolliert werden, dass die optischen Leiteinrichtungen, wie Baken oder

Leitkegel im korrekten Abstand aufgestellt, nicht verdreht oder umgestürzt und somit gut sichtbar sind. Dies zählt jedoch zur regelmäßigen Wartung und ist als übergreifender Prozess über die komplette Infrastruktur zu betrachten und wird daher nicht als eine eigene Maßnahme des Szenarios bewertet. An dieser Stelle sind auch besondere Verkehrszeichen, die Anfang und Ende einer Arbeitsstelle markieren, denkbar. Um eine kritische Situation durch zu spätes Erkennen des Arbeitsstellenanfangs und -endes zu vermeiden, können darüber hinaus optische Orientierungspunkte (z. B. spezielle Verkehrszeichen) über eine geeignete Position für den automatisierten Fahrstreifenwechsel informieren. Es ist zu klären, wie dies ohne Irritation oder zusätzliche Beanspruchung für nicht-automatisierte Verkehrsteilnehmer umgesetzt werden könnte.

Die informationstechnische Infrastruktur kann in Ergänzung zu den ankündigenden Verkehrszeichen eine redundante Information der automatisiert fahrenden Fahrzeuge über die Arbeitsstelle und die damit verbundene Verkehrsführung gewährleisten. Hierbei ist einerseits die gegenseitige Information vernetzter Fahrzeuge via V2V denkbar, andererseits könnte die Kommunikation der Verkehrssituation auch direkt durch ein Arbeitsstellenfahrzeug (V2I, z. B. Sicherungsfahrzeug) erfolgen. Zusätzlich erscheint die Einrichtung eines standardisierten Arbeitsstelleninformationssystems, z. B. in Form einer dynamischen Karte, sinnvoll. Die Informationen zu Art und Position einer Arbeitsstelle könnten dabei automatisiert durch ein entsprechendes Ortungs- und Kommunikationsmodul am Sicherungsfahrzeug übermittelt werden. Entsprechende Aktivitäten zur Informationsübertragung finden im Cooperative ITS Corridor statt (vgl. Kapitel 3.11.5).

Die Aufgaben der bordeigenen Sensorik bestehen lediglich darin, die vorhandene Arbeitsstelle rechtzeitig anhand der Verkehrszeichen bzw. drahtlos übertragenen Informationen zu erkennen und die entsprechenden Handlungen (Geschwindigkeitsreduktion, Fahrstreifenwechsel) einzuleiten. Bei dem vor der Fahrstreifenreduktion ausgeführten Reißverschlussverfahren müssen andere Fahrzeuge erkannt werden. Im Arbeitsstellenbereich muss zudem ein Verbleib innerhalb des Fahrstreifens gewährleistet werden.

## 5.3 Infrastrukturmaßnahmen für den Pendlerchauffeur

### 5.3.1 Szenario P1: Fahrt auf einbahniger Landstraße mit fehlenden oder verdeckten Fahrbahnmarkierungen

Das automatisiert fahrende Fahrzeug befindet sich auf einem einbahnigen Streckenabschnitt mit einem Fahrstreifen pro Richtung. Die Fahrbahnmarkierungen und sonstige Verkehrszeichen sind vorhanden, aber teilweise durch äußere Einflüsse (z. B. Schnee, Verschmutzung) nicht sichtbar oder Fahrbahnmarkierungen sind verschlissen. Auch bei dem SAE-Level 4 ist die Übergabe an den Fahrer sinnvoll, jedoch muss grundsätzlich damit gerechnet werden, dass der Fahrer nicht rechtzeitig übernehmen kann, sodass das Fahrzeug die Fahraufgabe weiterhin ausführen muss.

Bei diesem Szenario kann die zur sicheren Führung des Fahrzeugs notwendige Fahrstreifenlage nicht mehr eindeutig aus der Fahrbahnmarkierung ermittelt werden. Kann aufgrund von Kontrasteigenschaften nicht mehr zwischen Fahrbahn und Umgebungsterrain unterschieden werden, droht ein Verlassen der Fahrbahn. Ein Anhalten erscheint dabei nicht möglich, da der nachfolgende Verkehr nicht gefährdet werden soll. Entsprechend muss die Lage des Fahrstreifens auf andere Weise erkannt werden. Hierfür stehen als weitere Informationsquelle neben den Markierungen, die in regelmäßigen Abständen vorhandenen Leitpfosten zur Verfügung. Diese sind mit Reflektoren ausgestattet und befinden sich oberhalb der Fahrbahn, sodass auch z. B. bei Schnee die Erkennbarkeit gegeben sein sollte. Soweit vorhanden, könnten Fahrzeugrückhaltesysteme mit Retroreflektoren zur Positionierung genutzt werden. Auch Lösungsansätze über eine hochgenaue digitale Karte sind zu prüfen. Zudem ist zu berücksichtigen, dass die Verfügbarkeit automatisierter Steuerung auch beschränkt sein kann.

Maßnahmen der entwurfstechnischen Infrastruktur erscheinen in diesem Szenario zur Unterstützung des automatisierten Fahrens auf Landstraßen nicht sinnvoll.

Auf der Seite der verkehrstechnischen Infrastruktur könnten die vorhandenen Leiteinrichtungen verdichtet oder durch zusätzliche Leiteinrichtungen oberhalb der Fahrbahn ergänzt werden. Denkbar ist auch, z. B. durch eine kantigere Ausführung oder

eine spezielle Beschichtung die Erkennbarkeit der Leitpfosten zu verbessern. Zur Sicherstellung, dass die Fahrbahnmarkierungen und die optischen Leiteinrichtungen vorhanden und gut wahrnehmbar sind, könnten die existierenden Qualitätssicherungssysteme weiterentwickelt werden. Dies kann von der Intensivierung der bestehenden Streckenkontrollen bis zur Einführung eines standardisierten, systematischen und flächendeckenden Qualitätssicherungssystems umgesetzt werden. Für Letzteres wäre der Einsatz geeigneter Methoden zur flächendeckenden und aktuellen Zustandsbewertung erforderlich (z. B. schnellfahrende Messsysteme).

Aus Sicht der informationstechnischen Infrastruktur könnten aus Gründen der Redundanz zur rein sensorbasierten Wahrnehmung Fahrbahnmarkierungen und weitere Verkehrszeichen in einer hochgenauen digitalen Karte verortet werden. Diese Daten könnten beispielsweise zur Fusion mit Sensordaten genutzt werden und zur Information automatisierter Fahrzeuge über fehlende oder nicht erkennbare Fahrbahnmarkierungen.

Durch zusätzliche Leiteinrichtungen werden automatisiert fahrende Fahrzeuge zwar bei der Erkennung der Fahrbahnlage unterstützt, die Position der Fahrstreifenbegrenzungslinien kann hieraus allerdings nur geschätzt werden, was ausreichend sein kann. Auch an dieser Stelle könnte die informationstechnische Infrastruktur ansetzen.

Wird die Position der Leitlinie mittels V2I-Kommunikation über einen elektronischen, elektromagnetischen oder funkbasierten Kanal ausgesendet, könnte das automatisiert fahrende Fahrzeug diese auch dann wahrnehmen, wenn die optische Wahrnehmbarkeit eingeschränkt ist.

Neben der Fahrbahnmarkierung ist auch die Beschilderung am Fahrbahnrand entscheidend für einen sicheren Verkehrsablauf. Aus diesem Grund erscheint es sinnvoll, auch die Angaben der Verkehrszeichen (z. B. Überholverbot, Geschwindigkeitsbeschränkung) an das Fahrzeug zu senden. Diese Redundanz ließe sich entweder durch V2I-Kommunikation oder auch durch die Verortung der Informationen in einer digitalen Karte herstellen.

Für die bordeigene Sensorik muss sichergestellt sein, dass die bereitgestellten Informationen aus verschiedenen Kanälen sicher empfangen und verarbeitet werden können.

### 5.3.2 Szenario P2: Mischverkehr mit hohen Geschwindigkeitsdifferenzen

Das automatisierte Fahrzeug befährt eine einbahnig zweistreifige Landstraße (EKL 2 oder 3). In gleicher Fahrtrichtung können neben Lkw auch deutlich langsamer fahrende Verkehrsteilnehmer, wie Bau- und Landmaschinen, Leichtkraft- oder Fahrräder unterwegs sein. Außerdem kann mit Fußgängern gerechnet werden.

Da für den Kfz-Verkehr auf einbahnigen Straßen in der Regel eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h gilt, entstehen z. T. sehr hohe Geschwindigkeitsdifferenzen. Bei gegebener Sensorreichweite kann die verfügbare Reaktionszeit in Abhängigkeit dieser Differenzgeschwindigkeiten sehr klein werden. Hinzu kommt, dass die Dynamik von „kleinen Verkehrsteilnehmern“, wie Fußgänger und Radfahrern, gemäß Tabelle 3-15 nur als „mittel“ bewertet werden kann, sodass die Relativgeschwindigkeiten für das Fahrzeug nur eingeschränkt erfassbar sind. Eine Verstärkung des Effekts durch schlechte Sichtverhältnisse (Verdeckung, Nebel o. Ä.) ist ebenfalls möglich.

Auf der Ebene der entwurfstechnischen Infrastruktur ist hier insbesondere die generelle Trennung zwischen den nicht-motorisierten Verkehrsteilnehmern (Fußgänger, Radfahrer) und dem Kraftfahrzeugverkehr zu überdenken. Da Radfahrer und Fußgänger neben ihrer geringen Geschwindigkeit auch durch ihre geringe Größe im Vergleich z. B. Bau- und Landmaschinen gekennzeichnet sind, könnte durch den Bau von Geh- und Radwegen, ggf. auch Radfahrstreifen, das Risiko einer späten Detektion von nicht-motorisierten Verkehrsteilnehmern gesenkt werden. Hiervon betroffen sind die Landstraßen der EKL 3 und 4, da hier der Radverkehr auf der Fahrbahn prinzipiell möglich, bzw. sogar der Regelfall ist.

Seitens der verkehrstechnischen Infrastruktur ist als ein möglicher Ansatz denkbar, die zulässige Höchstgeschwindigkeit auf den betroffenen Abschnitten allgemein bzw. nur für automatisiert fahrende Fahrzeuge herabzusetzen (z. B. auf 70 bis 80 km/h). Dadurch würde sich die Differenzgeschwindigkeit auf ein Niveau reduzieren, das bei der vorhandenen Sensorreichweite eine deutliche Steigerung der Reaktionszeit bewirken könnte. Die daraus resultierenden Konsequenzen wären vor einer Umsetzung jedoch zu klären.

Für die informationstechnische Infrastruktur ist es denkbar, das automatisierte Fahren durch die Kennzeichnung der Streckenabschnitte ohne begleitende Geh- und Radwege zu unterstützen. Diese Informationen sollten auch in digitalen Karten des Fahrzeugs aktuell gehalten werden. Dadurch kann das Fahrzeug vorab Informationen darüber erhalten, auf welchen Abschnitten ggf. eine geringere Geschwindigkeit oder manuelle Steuerung notwendig ist. Dieser Maßnahme liegt die Annahme zugrunde, dass Fußgänger und Radfahrer die Fahrbahn nur dann mitbenutzen, wenn keine gesonderten Verkehrsflächen für die nicht-motorisierten Verkehrsteilnehmer im Seitenraum vorhanden sind.

Darüber hinaus könnten sich vernetzte Fahrzeuge via V2V-Kommunikation gegenseitig über langsame Verkehrsteilnehmer in einem Streckenabschnitt informieren. Dies kann allerdings nur eine ergänzende Maßnahme darstellen, da das erste Fahrzeug i. d. R. ohne Warnung in den Streckenabschnitt einfährt und hierfür bislang nur wenige Lösungsansätze sich abzeichnen.

Die vorgestellten Maßnahmen können für das Szenario keine Garantie der sicheren Erkennung bieten, dementsprechend muss das automatisiert fahrende Fahrzeug weiterhin in der Lage sein, langsame Verkehrsteilnehmer mit der bordeigenen Sensorik frühzeitig zu erkennen.

### 5.3.3 Szenario P3: Überholvorgang auf einbahniger Straße

Das automatisiert fahrende Fahrzeug fährt auf einer einbahnig zweistreifigen Landstraße hinter einem langsam fahrenden Fahrzeug (z. B. Fahrrad, Landmaschine, vgl. Kapitel 5.3.2). Das Fahrzeug soll automatisiert einen Überholvorgang ausführen, bei dem der Fahrstreifen der Gegenrichtung (insbesondere EKL 2 und EKL 3) mitbenutzt werden muss.

An den Überholvorgang sind nach § 5 StVO mehrere Bedingungen geknüpft. So darf z. B. weder der Gegenverkehr, noch das zu überholende Fahrzeug

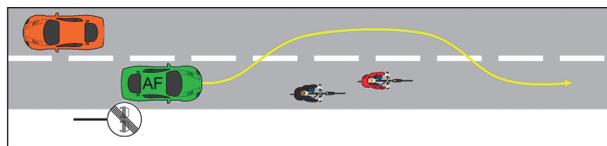


Bild 5-3: Szenario P3 – Überholvorgang auf einbahniger Straße

gefährdet werden. Dies beinhaltet z. B. auch die Anforderung, dass die gesamte Überholstrecke überblickt bzw. durch Sensoren erkannt werden muss. Sensoren wie Laserscanner, Radar und Videokameras können bereits einen Bereich von bis zu 200 m erfassen, was für das Überholen eines langsamen Fahrzeugs (Geschwindigkeitsdifferenz ca. 80 km/h) bereits ausreichen könnte, allerdings wird diese Reichweite i. d. R. durch Umfelleigenschaften (z. B. Bewuchs in Kurven, Kuppen, Wannen etc.) stark eingeschränkt, sodass Erfassungslücken nie ausgeschlossen werden können.

Die Unterstützung des automatisierten Überholens auf zweistreifigen Landstraßen durch Maßnahmen der entwurfstechnischen Infrastruktur erscheint nicht sinnvoll, da hierdurch größere bauliche Eingriffe (z. B. Erweiterung um einen zusätzlichen Fahrstreifen) nötig wären, die sich jedoch anhand der Richtlinien für die integrierte Netzgestaltung (RIN) bzw. auch der Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL) i. d. R. nicht rechtfertigen ließen.

Auf der Seite der verkehrstechnischen Infrastruktur ist es lediglich denkbar, auf sämtlichen Streckenabschnitten mit Überholverbot sicherzustellen, dass die entsprechende Beschilderung (StVO Zeichen 276 bzw. 280) vorhanden und rechtzeitig erkennbar ist. Zusätzlich kann erwogen werden, nur die Bereiche, auf denen ein Überholvorgang durch ausreichende Überschaubarkeit (z. B. lange Gerade) prinzipiell möglich scheint, für automatisiert gefahrene Überholmanöver freizugeben. Dies könnte bspw. dem Fahrzeug durch eine idealerweise nur für das Fahrzeug selbst optisch wahrnehmbare codierte Fahrbahnmarkierung (Strichcode) übermittelt werden.

Auch für die informationstechnische Infrastruktur sind keine Maßnahmen denkbar, durch die das Überholen für automatisierte Fahrzeuge vollständig abgesichert werden könnte. Zur redundanten Auslegung der Informationsübermittlung könnten die Streckenabschnitte mit Überholverbot für alle (automatisierten) Fahrzeuge in eine digitale Karte integriert werden.

Es wird ersichtlich, dass seitens der Infrastruktur keine Maßnahmen denkbar sind, die dem automatisierten Fahrzeug die Überwachung der Überholstrecke abnehmen können. Dementsprechend muss die bordeigene Sensorik in der Lage sein, die in § 5 der StVO gestellten Anforderungen zu erfüllen. Das bedeutet, dass sowohl der eigene, als

auch der Fahrstreifen der Gegenrichtung über einen längeren Abschnitt wahrgenommen werden müssen. Können die fahrzeugseitigen Sensoren dies nicht erfüllen, muss für bzw. vor dem Überholvorgang eine Fahrerübernahme erfolgen.

#### 5.3.4 Szenario P4: Arbeitsstelle auf einbahniger Straße

Das Fahrzeug befährt automatisiert eine einbahnige Landstraße, die an einer Stelle aufgrund von Bauarbeiten auf einen Fahrstreifen verengt ist. Die Arbeitsstelle wird in einiger Entfernung durch entsprechende Verkehrszeichen, sowie eine Geschwindigkeitsreduzierung angekündigt. Der Verkehrsablauf im Bereich der Arbeitsstelle wird entweder durch eine Lichtsignalanlage oder durch Beschilderung geregelt.

Aufgabe des automatisierten Fahrzeugs ist es zunächst, die Arbeitsstelle als Hindernis zu erkennen und sie anhand der ankündigenden Verkehrszeichen als Arbeitsstelle zu identifizieren. Weiterhin muss das Fahrzeug rechtzeitig die Geschwindigkeit reduzieren, um (ohne Gefahrenbremsung) direkt vor der Arbeitsstelle anzuhalten (z. B. bei roter LSA oder Zeichen 208 StVO). Danach ist die Arbeitsstelle ggf. auf dem Fahrstreifen der Gegenrichtung zu durchqueren. Dies kann entweder nach der Freigabe durch die LSA erfolgen, oder sofern sich kein Fahrzeug als der Gegenrichtung nähert. Für die Sensorik entstehen hier diverse Anforderungen: Zunächst müssen alle Verkehrszeichen im Vorfeld sicher erkannt und gedeutet werden, was durch die Sensorik bereits erfüllt werden kann. Eine Schwierigkeit für das automatisierte Fahren ergibt sich durch die geänderte Verkehrsführung, die nicht zwangsläufig durch eine gelbe Leitlinie markiert ist. Hier muss das Fahrzeug die neue Verkehrssituation interpretieren können. Die größte Herausforderung entsteht durch Arbeitsstellen kürzerer Dauer ohne Lichtsignalsteuerung. Hier muss das Fahrzeug den Gegenverkehr rechtzeitig erkennen, um so abschätzen zu können, wann ein sicheres Durchfahren der Arbeitsstelle möglich erscheint. Da die Sicht i. d. R. durch die Arbeitsstelle selbst (Baken, Maschinen, Fahrzeuge etc.) behindert wird, sind hier weitere Maßnahmen notwendig, um ein automatisiertes Durchfahren der Arbeitsstelle zu ermöglichen.

Da Arbeitsstellen eine temporäre Maßnahme darstellen, kann die entwurfstechnische Infrastruktur

als Unterstützung für das automatisierte Fahren ausgeschlossen werden.

Eine wesentliche Maßnahme seitens der verkehrstechnischen Infrastruktur ist die einheitliche Ankündigung durch entsprechende Verkehrszeichen nach StVO (z. B. Arbeitsstelle, Vorrang des Gegenverkehrs etc.). Auch hier liegt es nahe, die Beschilderung in einiger Entfernung vor der Arbeitsstelle aufzustellen, um dem Fahrzeug ausreichend Zeit zur Reaktion einzuräumen.

Weiterhin ist bei der Einrichtung der Arbeitsstelle sicherzustellen, dass andere Verkehrszeichen ausreichend abgedeckt bzw. verdreht werden, um widersprüchliche Angaben zu vermeiden. Für den Bereich innerhalb der Arbeitsstelle könnte zudem die Einrichtung temporärer Leiteinrichtungen (z. B. gelbe Fahrbahnmarkierung, Baken etc.) dazu beitragen, das Fahrzeug auch sicher über den Fahrstreifen der Gegenrichtung zu führen.

Zusätzlich kann die generelle Nutzung einer LSA zur Regelung des Verkehrsflusses während der einspurigen Verkehrsführung erwogen werden. Durch die zeitliche Trennung der „konkurrierenden“ Ströme ließe sich zumindest theoretisch gewährleisten, dass ein Fahrzeug automatisiert durch den Konfliktbereich gesteuert werden kann, ohne entgegenkommende Fahrzeuge zu behindern.

Um auch hier eine Redundanz in der Informationsvermittlung herzustellen, ist es denkbar, den Ort der Arbeitsstelle auf der Ebene der informationstechnischen Infrastruktur darzustellen. Weiterhin können die Schaltzeitpunkte der LSA, sowie die Angaben der Verkehrszeichen via V2I-Kommunikation an das Fahrzeug übermittelt werden. Für die Navigation durch den Arbeitsstellenbereich könnte zudem die Kommunikation mit den ggf. vorhandenen Baken erfolgen, falls die vorangehenden Maßnahmen noch nicht ausreichend sind.

Darüber hinaus kann die Einrichtung eines detaillierten Arbeitsstelleninformationssystems erwogen werden. In diesem könnten u. a. die genaue Position, sowie die Art der Verkehrsführung einer Arbeitsstelle hinterlegt werden. Hierzu ist es denkbar, die Arbeitsstelleneinrichtung (z. B. Lichtsignalgeber) mit einer eigenen Ortungs- und Kommunikationseinheit auszustatten, über welche sich die benötigten Informationen automatisch in die Datenbank bzw. digitale Karte einspeisen ließen.

Die bordeigene Sensorik muss für eine sichere Durchquerung der Arbeitsstelle vor allem in der Lage sein, die geänderte Verkehrsführung, z. B. anhand gelber Fahrbahnmarkierungen oder Baken wahrzunehmen. Weiterhin sollte es möglich sein, bei kleinen Arbeitsstellen, die über keine LSA verfügen (laut RSA bis 50 m Länge), den gesamten Bereich zu erfassen. Andernfalls müsste das Fahrzeug vor der Arbeitsstelle halten (sicherer Zustand) und eine Fahrerübernahme initiieren.

## 5.4 Fazit

Die vorgestellten Möglichkeiten zeigen, dass die Infrastruktur des Straßenverkehrs durchaus Potenzial besitzt, das automatisierte Fahren an ausgewählten Punkten bzw. in speziellen Situationen zu unterstützen. Die Umsetzung einiger Maßnahmen stellt sich jedoch auch als sehr aufwendig dar.

Die Art der Maßnahme (entwurfs-, verkehrs- oder informationstechnisch) ist dabei insbesondere vom Zeithorizont des zugrundeliegenden Szenarios abhängig. Für langfristige Szenarien (z. B. fehlender Seitenstreifen) bieten sich vor allem entwurfstechnische Infrastrukturmaßnahmen an, da hier im Zeitverlauf keine relevanten Veränderungen der Ausgangslage zu erwarten sind. Eine grundsätzliche Maßnahme auf dieser Ebene ist die frühzeitige Ankündigung besonderer Verkehrssituationen, die dem automatisiert fahrenden Fahrzeug eine größere Reaktionszeit einräumt. Für kurzfristig auftretende Szenarien (z. B. plötzliches Hindernis auf der Fahrbahn) können entwurfstechnische Maßnahmen hingegen keine Unterstützung bieten. Hier bieten sich verkehrs- und informationstechnische Maßnahmen an, da diesen Maßnahmen ein gewisses Maß an Flexibilität in Bezug auf dynamische Ausgangssituationen zugerechnet werden kann. Eine vollständige Lösbarkeit solcher Fälle ergibt sich jedoch nicht.

Für den Pendlerchauffeur sind i. d. R. nur informationstechnische Maßnahmen, wie die V2V- bzw. V2I-Kommunikation geeignete Maßnahmen. Dadurch ließen sich einerseits kurz- bis mittelfristige Änderungen der Verkehrssituation an das Fahrzeug übermitteln, andererseits könnte so eine Redundanz bei der Informationsübertragung hergestellt werden.

Für den Autobahnchauffeur kommen unter Nutzung vorhandener Technik (z. B. Streckenbeeinflussungs-

anlagen, Kameradetektion) zusätzliche Maßnahmen auf Ebene der verkehrstechnischen Infrastruktur infrage.

Als zentrale und vielversprechende Maßnahme, die in den meisten Szenarien unterstützend für das automatisierte Fahren wirken kann, hat sich die hochgenaue, geschichtete digitale Referenzkarte herausgestellt. Durch diese lassen sich sowohl langfristige Situationen, als auch mittel- und kurzfristige Änderungen der Verkehrslage darstellen. Die Grundvoraussetzung für eine solche Referenzkarte ist insbesondere ihre Verfügbarkeit, Aktualität und Qualität der temporären Informationen. Das bedeutet zum einen, dass die Ereignisse unmittelbar nach ihrem Auftreten in der Karte verortet werden können und zum anderen, dass ein automatisiert fahrendes Fahrzeug diese Informationen ohne Verzögerung empfangen und verarbeiten kann.

## 6 Bewertung der Infrastrukturmaßnahmen

### 6.1 Einleitung

Um das Potenzial der in Kapitel 5 entwickelten Infrastrukturmaßnahmen für die beispielhaft entwickelten Szenarien erkennen und aufzeigen zu können, ist es erforderlich, diese hinsichtlich verschiedener Kriterien zu bewerten. Die Priorisierung und Empfehlung dieser Maßnahmen wurde durch die Durchführung eines Expertenworkshops mit Teilnehmern aus Industrie und Verwaltung unterstützt.

Das nachfolgende Kapitel beschreibt zunächst das methodische Vorgehen im Rahmen der Bewertung. Anschließend werden die Ergebnisse der Bewertung für jede Maßnahme getrennt und unabhängig voneinander beschrieben. Hierauf aufbauend wird ein Vorschlag für eine mögliche Priorisierung der Maßnahmen formuliert.

Die Basis für die Bewertung der verschiedenen Infrastrukturmaßnahmen wurde auf dem 2. Workshop am 6. Juni 2016 bei der Bundesanstalt für Straßenwesen in Bergisch Gladbach gelegt. Hier diskutierten mehr als 40 Teilnehmer aus der Automobil- und Zulieferindustrie, der Straßenbauverwaltung des Bundes, der Länder und Kommunen sowie weiteren Beteiligten aus der Wissenschaft und Forschung die verschiedenen Szenarien.

### 6.2 Methodik

Nach einer Kurzvorstellung der betrachteten Szenarien auf dem 2. Workshop erfolgte die Bewertung in Kleingruppen. Die Zusammensetzung der Gruppen wurde im Vorfeld durch die Forschungsnehmer anhand der Teilnehmerliste vorgenommen, um eine ausgewogene Zusammensetzung der Gruppen und zugleich differenzierte Bewertung der betrachteten Szenarien sicherstellen zu können.

Alle betrachteten Maßnahmen (vgl. Kapitel 5) wurden grundsätzlich hinsichtlich der folgenden Bewertungskriterien und -stufen bewertet:

- Notwendigkeit
  - zwingend erforderlich,
  - unterstützend,
  - nicht erforderlich.
- Wirksamkeit
  - hoch,
  - mittel,
  - niedrig.
- Technische Realisierbarkeit
  - Technologie vorhanden,
  - Technologie in Entwicklung,
  - Technologie nicht vorhanden.
- Organisatorische Realisierbarkeit
  - Struktur vorhanden,
  - Struktur muss geschaffen werden,
  - Struktur kann nicht geschaffen werden.
- Zeitliche Realisierbarkeit
  - kurzfristig,
  - mittelfristig,
  - langfristig.
- Aufwand/Kosten
  - niedrig,
  - mittel,
  - hoch.

Eine notwendige Maßnahme stellt das Werkzeug dar, um einen bestimmten Zustand erreichen zu können. Es entspricht einer zu erfüllenden Grund-

voraussetzung. Die Notwendigkeit kann zwingend erforderlich oder auch nicht erforderlich sein. Weiterhin kann die Maßnahme auch lediglich eine unterstützende Funktion haben. Die zwingende Notwendigkeit ist gegeben, wenn ein Erreichen des gewünschten Ergebnisses ohne die zu betrachtende Maßnahme nicht möglich ist. Unterstützend bedeutet, dass die Infrastrukturmaßnahme alleine die Anforderungen nicht erfüllen kann, jedoch dazu beiträgt oder die Aufgabe erleichtert. Als nicht erforderlich gilt eine Maßnahme dann, wenn sie keinen Nutzen für die automatisierte Fahrfunktion bereitstellt.

Die Wirksamkeit einer Maßnahme sagt aus, inwieweit die betrachtete Maßnahme ein vorgegebenes Ziel erreicht. Die Wirksamkeit kann hoch, mittel oder niedrig sein.

Ein weiteres Kriterium stellt die technische Realisierbarkeit dar. Diese zeigt ob und inwieweit eine Anforderung im Einklang mit den wissenschaftlichen Erkenntnissen steht. Damit wird festgestellt, ob der heutige Stand der Technik für die Umsetzung der Maßnahme ausreichend ist. Eine vorhandene Technologie bedeutet, dass diese bereits angewendet wird, wobei eine Technologie in Entwicklung nur erste Ansätze und prototypische Tests umfasst.

Mit der organisatorischen Realisierbarkeit wird gezeigt, ob die nötigen Strukturen für die Umsetzung der betrachteten Maßnahmen bereits vorhanden bzw. überhaupt möglich sind. In diesem Zusammenhang wurden vorwiegend organisatorische und verwaltungstechnische Aspekte betrachtet.

Das Kriterium der zeitlichen Realisierbarkeit ordnet die Umsetzung der Maßnahme auf einer groben Zeitskala ein und stellt die Dauer bis zu dessen Umsetzung dar. Die Abschätzung des Zeithorizonts wurde in kurzfristig (1 bis 5 Jahre), mittelfristig (5 bis 10 Jahre) und langfristig (> 10 Jahre) differenziert.

Als letztes wurde versucht, den finanziellen Aufwand abzuschätzen bzw. zu bewerten. Hier wurde lediglich eine grobe Bewertung und Einschätzung des Kostenaufwands vorgenommen.

## 6.3 Ergebnisse Autobahnchauffeur

### 6.3.1 Szenario A1: Hindernis im eigenen Fahrstreifen

Die „Nutzung vorhandener Videodetektionssysteme zum automatischen Erkennung von Hindernissen“ stellt eine verkehrstechnische Maßnahme dar. Mittels vorhandener oder neuer Infrastruktur zur Videodetektion sollten Hindernisse auf der Fahrbahn automatisch erkannt werden.

Das Straßennetz ist aktuell nur zu einem sehr geringen Anteil mit Videodetektion ausgestattet. Eine Ausnahme stellen hier die Tunnel dar. Hier ist eine Videodetektion in der Regel vorhanden. Für eine schnelle Reaktion auf Hindernisse ist die Zeitspanne zwischen der Erkennung eines Hindernisses und der „Ankunft“ der Information im Fahrzeug von entscheidender Bedeutung. Um rechtzeitig reagieren zu können, ist daher auch eine Detektion durch das automatisierte Fahrzeug unerlässlich. Nur so kann eine schnelle Reaktion auf ein Hindernis sichergestellt werden. Aus diesem Grund wurde die Frage nach der Notwendigkeit der Videodetektion mit „unterstützend“ beantwortet.

Wenn man die Videodetektion als solche betrachtet, so kann die Wirksamkeit dieses Systems als hoch eingestuft werden, da es bei ausreichender Qualitätssicherung (Detektion aller Fahrstreifen, wenige Fehlalarme) ein geeignetes Werkzeug für die Erkennung von Hindernissen darstellen kann. Betrachtet man jedoch das System als Infrastruktur des Straßennetzes, so nimmt die Wirksamkeit ab, da die Information erst dem Fahrzeug kommuniziert werden muss, wobei Aspekte wie Übertragungsgeschwindigkeit oder Netzabdeckung zu beachten sind.

Die technische Machbarkeit der Maßnahme entspricht dem Stand der Technik und greift auf marktübliche Systeme zurück. Für die hohen Anforderungen des automatisierten Fahrens besteht allerdings noch Entwicklungsbedarf, u. a. bei der Unterscheidung zwischen Tag und Nacht sowie bei der Qualität der Detektion (z. B. Einsatz von Kameras mit Wärmebilddetektion).

Aus organisatorischer Sicht stellt die Maßnahme eine große Herausforderung dar. Es ist notwendig eine ständige Datenqualitätsprüfung durchzuführen und die Datenqualität einzuhalten. Zudem ist der Ausstattungsgrad der Infrastruktur noch sehr nied-

rig. Vorwiegend finden sich Videodetektionssysteme in Tunneln sowie auf Streckenabschnitten mit temporärer Seitenstreifenfreigabe. Dementsprechend muss ein hoher bzw. sehr hoher organisatorischer und finanzieller Aufwand für die Umrüstung und Ausstattung sowie Anlagenwartung betrieben werden.

Der Stand der Technik erlaubt zwar eine kurzfristige Umsetzung der Maßnahme, jedoch ist der organisatorische Einsatz, der dafür geleistet werden muss, so hoch, dass die zeitliche Realisierbarkeit mit mittelfristig bis langfristig angegeben werden kann. Das führt dazu, dass der Kostenaufwand für den Aufbau und Ausbau der Infrastruktur steigt, obwohl die Funktionalität an sich einen niedrigen finanziellen Aufwand benötigt. Datenschutzrechtliche Bezüge einer solchen Technologie wären zudem zu berücksichtigen.

Die „Kommunikation von Gefahrenstellen über Wechselverkehrszeichen (WVZ)“ stellt eine verkehrstechnische Maßnahme dar, welche die Information über Anzeigequerschnitte (AQ) von ggf. vorhandenen Streckenbeeinflussungsanlagen an das Fahrzeug überträgt. Gefahrenstellen erstrecken sich oft über längere Strecken, wobei es nicht immer möglich ist, diese fahrzeugseitig über die komplette Länge zu erkennen. Sofern Streckenbeeinflussungsanlagen vorhanden sind, können diese unterstützend für die Signalisierung und Kommunikation verwendet werden. Dabei ist zu beachten, dass automatisiertes Fahren in den nächsten Jahren immer im Mischverkehr mit nicht automatisierten Fahrzeugen erfolgen wird. Zu übertragende Informationen müssen daher sowohl von den automatisierten als auch von den nicht automatisierten Fahrzeugen (vom Fahrer) verarbeitet werden können.

Für eine hohe Wirksamkeit der Maßnahme sind eine genaue Lokalisierung der Gefahrenstelle sowie die Signalisierung des betroffenen Fahrstreifens unumgänglich. Die Wirksamkeit dieser verkehrstechnischen Infrastrukturmaßnahme wird mit mittel bewertet.

Die Lokalisierung der Gefahrenstelle könnte ggf. automatisiert oder teilautomatisiert mittels Videodetektion oder Radarsensorik erfolgen. Der derzeitige Technologiestand erlaubt zwar den Einsatz solcher Systeme, diese entsprechen jedoch nicht den sehr hohen Sicherheitsanforderungen für Sensorik und Kommunikation der Automobilindustrie. Daher

kann die Technologie nur mit teilweise vorhanden bewertet werden.

Aus organisatorischer Sicht ergeben sich außerdem einige Herausforderungen. Zum einen sind Streckenbeeinflussungsanlagen mit Wechselverkehrszeichen nicht flächendeckend vorhanden. Zum anderen ist der Abstand der Anzeigequerschnitte von Streckenbeeinflussungsanlagen von i. d. R. 1,5 bis 2 km zu groß, um rechtzeitige Reaktionen auf dem gesamten Streckenabschnitt gewährleisten zu können. Das führt dazu, dass ein Ausbau organisatorisch geplant und durchgeführt werden muss und daher auch die zeitliche Realisierbarkeit auf mittelfristig eingeschätzt wird.

Bei den Kosten stellt die eigentliche Kommunikation der Gefahrenstelle einen niedrigen Aufwand dar. Der wesentlich höhere Anteil liegt im Ausbau bzw. der Nachrüstung der Infrastruktur.

Die „Kommunikation von Gefahrenstellen über V2I bzw. V2V“ ist Teil einer möglichen informationstechnischen Maßnahme. Hinsichtlich der Notwendigkeit wird diese Maßnahme mit unterstützend bewertet, da sie als redundant zur Kommunikation über Wechselverkehrszeichen agiert. Dank der Kommunikation zwischen Fahrzeug und Infrastruktur (V2I) sowie Fahrzeug und Fahrzeug (V2V) weist diese Maßnahme im Gegensatz zur punktuellen Kommunikation über WVZ jedoch eine hohe Wirksamkeit auf.

Auf Seiten der technischen Machbarkeit stehen aktuell verschiedene Technologien zur Informationsübertragung zur Verfügung. Hierzu zählen WLAN, Mobilfunk oder DAB. Über die Technologien ist das Senden und Empfangen von Informationen bereits technisch möglich. Bzgl. der organisatorischen Realisierbarkeit fehlt es jedoch an geeigneten Strukturen. Hier sind Nebenfragen der Haftung infolge von fehlenden oder auch falschen Warnungen auch Fragen der Zuständigkeit bzgl. bei flächendeckender Ausstattung der Infrastruktur für die V2I Kommunikation zu beachten.

Die zeitliche Umsetzung der Maßnahme ist als mittelfristig einzustufen, da mit einer flächendeckenden Nutzung bzw. Umsetzung der Mobilfunkstandards der 4. (4G) bzw. 5. Generation (5G) erst in den nächsten 5 bis 10 Jahren gerechnet werden kann. Kürzer ist die Zeit für eine alternative technische Umsetzung mittels ETSI-G5 einzuschätzen. Hierdurch entsteht auch der Großteil der für diese Maßnahmen anfallenden Kosten. Das eigentliche

Senden und Empfangen von Informationen oder auch die Produktion von Sendern und Empfängern stellt dagegen einen niedrigen Kostenaufwand dar, weil man ohnehin von einer entsprechenden Vernetzung der Fahrzeuge in diesem Zeitraum ausgehen kann, die nicht notwendigerweise mit dem automatisierten Fahren in Verbindung steht.

Zeit- und Kostenaufwände entstehen zudem grundsätzlich auch durch die neu aufzubauenden Organisationsstrukturen bzw. die Standardisierung der Meldungen. Hier sind sowohl auf Seiten der Automobilindustrie als auch auf Seiten der Straßenbaulastträger Abstimmungen erforderlich, um Standards für die Kommunikation der Gefahrenstellen oder auch die Lokalisierung der Gefahrenstelle zu definieren.

Ebenfalls zu den informationstechnischen Maßnahmen gehört die Maßnahme „Bereitstellung der Position eines Hindernisses in Datenbank bzw. digitaler Karte“. Die Maßnahme wurde hinsichtlich der Notwendigkeit auf dem Workshop unterschiedlich bewertet. Ursächlich hierfür ist, ob die Maßnahme isoliert oder in Zusammenhang mit anderen Maßnahmen betrachtet wird. Als Einzelmaßnahme bietet sie eine Unterstützung und Redundanz für weitere Informationskanäle. Gilt sie jedoch als Voraussetzung für die Kommunikation der Gefahrenstellen über WVZ oder V2I, so ist ihre Notwendigkeit zwingend erforderlich.

Dadurch, dass eine zentrale Datenbank durch die Umsetzung dieser Maßnahme geschaffen werden könnte, auf der beliebige Datengeber ihre Informationen standardisiert ablegen und von welcher sich beliebige Datennehmer die Informationen abgreifen und weiter kommunizieren könnten, wird die Wirksamkeit mit hoch bewertet. Die technische Realisierbarkeit ist derzeit nur teilweise vorhanden. Eine dynamische digitale Karte, welche die benötigten Informationen bereitstellt, ist zwar nicht verfügbar, jedoch sind die einzelnen Komponenten technisch realisierbar.

Die organisatorischen Strukturen für die gemeinsame Erstellung und den Betrieb einer dynamischen Karte mit Einbindung der Straßenbauverwaltungen auf der einen und der Automobilindustrie auf der anderen Seite müssen erst geschaffen werden. Aus diesen Gründen ist die zeitliche Realisierbarkeit als mittelfristig einzuschätzen. Der Kostenaufwand hierfür wird ebenfalls als mittel eingestuft, da statische Kartengrundlagen grundsätzlich vorhanden sind.

Dennoch ist ein erheblicher Aufwand für eine ständige Aktualisierung und Qualitätssicherung der Daten erforderlich. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass derzeit kein Stakeholder darauf vorbereitet ist, die – noch zu definierende Mindestqualität – der Daten verantwortlich zu gewährleisten.

Die „Kommunikation (Empfangen und Versenden der Information)“ ist als fahrzeugseitige Maßnahme eine mögliche Maßnahme für das Szenario „Hindernis im eigenen Fahrstreifen“. Sie stellt die Voraussetzung für eine Reaktion des automatisierten Fahrzeugs dar. Diese Maßnahme ist sehr wünschenswert. Zugleich gilt es weitere Untersuchungen in Bezug auf einer bordautonomen Lösung anzustellen. Bordautonome Datenerfassung und über Kommunikation erhaltene Informationen stellen zwei sich ergänzende Informationsquellen dar. Hier kann auch das Ziel der Informationsredundanz verfolgt werden. Das Ziel, verlässliche Informationen über Hindernisse im Fahrtverlauf im Bordsystem des automatisiert fahrenden Fahrzeuges zu erzeugen, kann im Zusammenspiel mit digitalen Karten einen entscheidenden Betrag zur Kommunikation leisten. Die Kommunikation wird daher als eine Maßnahme mit einer hohen Wirksamkeit bewertet.

Der heutige Stand der Technik erlaubt bereits eine V2V oder V2I Kommunikation. Es fehlt jedoch (Stand: Herbst 2016) ein herstellerübergreifender Standard, welcher erforderlich ist, um auch aus organisatorischer Sicht eine Umsetzung möglich zu machen. Daher ist die Maßnahme mit einer mittelfristigen zeitlichen Realisierbarkeit von 5 bis 10 Jahren zu bewerten. Geht es nur um den fahrzeugseitigen Empfang und das Senden von Informationen, so ist der finanzielle Aufwand niedrig. Betrachtet man jedoch die nicht vorhandenen organisatorischen Strukturen, sowie den fehlenden herstellerübergreifenden Standard, dann wird der Kostenaufwand steigen.

### 6.3.2 Szenario A2a: Fehlender Seitenstreifen

Als entwurfstechnische Maßnahme ist die „Einrichtung von Seitenstreifen bei Neu- und Ausbaumaßnahmen an Autobahnabschnitten“ als zwingend erforderlich anzusehen, wenn die automatisierte Fahrfunktion das Vorhandensein eines Seitenstreifens voraussetzt. Das ist dann der Fall, wenn ein Seitenstreifen zur Erhaltung eines sicheren Zustands erforderlich ist. Andernfalls darf eine Automatisierung nur dann aktiviert werden, wenn Seitenstreifen vor-

handen sind. Damit verbunden wäre auch eine hohe Wirksamkeit der betrachteten Maßnahme. Da der Seitenstreifen aus Gründen der Verkehrssicherheit und der Leistungsfähigkeit ein Grundbestandteil eines Autobahnquerschnitts darstellt, kann die technische und organisatorische Realisierbarkeit als gegeben angesehen werden.

Die zeitliche Realisierbarkeit der Maßnahme richtet sich vorrangig nach der Länge der Strecken, welche aktuell im Bestand noch keinen Seitenstreifen aufweisen und erst im Rahmen eines Ausbaus hiermit ausgestattet werden. Mit Stand 2014 waren von den 12.917 km Autobahn 10.243 km mit beidseitigen und 1.102 km mit einem einseitigen Seitenstreifen ausgestattet. Aufgrund des grundsätzlich sehr aufwendigen und sehr langwierigen Verfahrens zum Ausbau von Bundesfernstraßen wird die zeitliche Realisierbarkeit als langfristig eingeschätzt. Der Kostenaufwand ist ebenfalls als hoch zu bewerten.

Als zweite alternative entwurfstechnische Maßnahme bei einem fehlenden Seitenstreifen wurde die „Einrichtung von Nothaltebuchten in regelmäßigen Abständen“ diskutiert. Wird nun von der automatisierten Fahrfunktion zur Erreichung eines sicheren Zustands ein Seitenstreifen vorausgesetzt, so ist im Falle des fehlenden Seitenstreifens die Notwendigkeit einer Nothaltebucht zwingend erforderlich. Die Wirksamkeit dieser Maßnahme ist jedoch aufgrund der Abstände (ca. 1.000 bis 2.000 m) als niedriger zu bewerten. Im Falle einer temporären Seitenstreifenfreigabe (TSF) muss die Einrichtung einer Nothaltebucht in Abhängigkeit von Länge der TSF oder Dauer der Freigabe geprüft werden.

Die technischen und organisatorischen Rahmenbedingungen für den Bau von Nothaltebuchten sind gegeben. Die flächendeckende Umsetzung ist nur langfristig möglich mit einem hohen Kostenaufwand, abhängig von der Anzahl der einzurichtenden Nothaltebuchten.

Im Bereich der verkehrstechnischen Maßnahmen ist die „Rechtzeitige Ankündigung des endenden Seitenstreifens durch Verkehrszeichen“ denkbar. Die Maßnahme stellt eine Redundanz zu den informationstechnischen Maßnahmen der Übermittlung von Verkehrszeicheninformationen dar und wird als unterstützend betrachtet. Die Technologie, eine entsprechende fahrzeuglesbare Codierung (bspw. der Fahrstreifenmarkierung) zu erstellen, ist grundsätzlich vorhanden. Angemerkt werden sollte an dieser

Stelle aber auch die vielerorts seitens der Straßenverwaltungen angestrebte Reduzierung der Anzahl von Verkehrszeichen, was einer solchen alternativen Lösung über Verkehrszeichen voraussichtlich entgegensteht.

Der Zeithorizont für die Umsetzbarkeit der Maßnahme vom Entwurf über den Beschluss bis zum Aufstellen kann als kurzfristig bis mittelfristig bewertet werden. Der Kostenaufwand hängt von Art und Anzahl der notwendigen infrastrukturseitig anzubringenden Codierungen ab und wird mit gering bis mittel bewertet, zumal bereits ein erheblicher Anteil des Autobahnnetzes mit Seitenstreifen ausgestattet ist.

Als weitere verkehrstechnische Maßnahme wird die „Ausschilderung der Nothaltebuchten rechtzeitig vor endendem bzw. nicht vorhandenem Seitenstreifen“ betrachtet. Diese Maßnahme wird aufgrund der statischen Informationsart ebenfalls als unterstützend mit einer eingeschränkten Wirksamkeit bewertet. Sowohl technisch als auch organisatorisch werden die Voraussetzungen erfüllt. Eine Umsetzung ist abhängig von der Art und Anzahl der Verkehrszeichen kurzfristig bis mittelfristig möglich. Der Aufwand hierfür ist als gering bis mittel einzustufen.

Die „Redundante Auslegung der ortsfesten Verkehrszeichen über V2I-Kommunikation“ stellt eine informationstechnische Maßnahme dar. Die Notwendigkeit wird von den Experten als zwingend erforderlich eingestuft, da die Erkennung von Verkehrszeichen aufgrund von Witterungseinflüssen oder anderen Ereignissen nicht jederzeit gewährleistet werden kann. Die Wirksamkeit dieser Maßnahme wird als hoch bewertet. Die technische Machbarkeit ist grundsätzlich gegeben.

Bzgl. der organisatorischen Strukturen für die Anordnung, Qualitätssicherung oder auch der Kostenteilung fehlen hier noch die Rahmenbedingungen. Aus diesem Grund ist eine Umsetzung im mittelfristigen Zeithorizont abschätzbar und mit einem niedrigen bis mittleren Kostenaufwand verbunden.

Die Maßnahme „Markierung der Streckenabschnitte mit/ohne Seitenstreifen und Nothaltebuchten in statischer digitaler Karte (fahrstreifenfein)“ ist ebenfalls als informationstechnische Maßnahme zu betrachten. Die Verortung dieser Punkte bzw. Elemente in einer digitalen Karte wird als zwingend notwendig beurteilt. Hierbei ist auch eine durchgehende Qualitätssicherung und Datenpflege zwingend erforderlich.

Der aktuelle Stand der Technik ermöglicht es grundsätzlich, eine statische digitale Karte mit fahstreifenfeinen Informationen zu erstellen. Flächendeckend verfügbar sind fahstreifenfeine Karten am Markt aktuell jedoch nicht. Sobald derartige Karten zur Verfügung stehen, werden diese statischen Informationen auch in automatisiert fahrenden Fahrzeugen bereitgestellt werden können.

Organisatorisch stellt dies zudem einen relativ hohen Aufwand dar, da Strukturen für die Realisierbarkeit der Maßnahme noch geschaffen werden müssen. In diesem Zusammenhang stellt sich auch die Frage nach der Zuständigkeit, Qualitätssicherung oder Erweiterung und Pflege einer solchen Datenbank. Eine Abschätzung der zeitlichen Realisierbarkeit wird mit mittelfristig bewertet. Der finanzielle Aufwand hält sich durch die niedrigen Kosten für Serverkapazitäten oder Kommunikation in Grenzen und ist als gering abzuschätzen.

### 6.3.3 Szenario A2b: Temporäre Seitenstreifenfreigabe

Als eine mögliche entwurfstechnische Maßnahme im Szenario A2b wird die „Einrichtung von Nothaltebuchten in regelmäßigen Abständen“ diskutiert. Die vorgenommene Bewertung unterscheidet sich nicht von der im Szenario A2a (vgl. Kapitel 6.3.2).

Aus verkehrstechnischer Sicht ist die „Einheitliche beidseitige Aufstellung der Verkehrszeichen“, wie dies die VwV-StVO zu den Zeichen 223.1 ff. ohnehin verlangt, eine zwingend erforderliche Maßnahme für die verlässliche Erkennung von temporären Seitenstreifenfreigaben. Die Wirksamkeit wird als hoch beurteilt. Die Technologie für die technische Realisierbarkeit ist vorhanden, jedoch soll aus organisatorischer Sicht eine Standardisierung der Anzeigen angestrebt werden. Die zeitliche Umsetzung kann auf einen Zeithorizont von bis zu fünf Jahren abgeschätzt und damit als kurzfristig bewertet werden. Der Kostenaufwand ist niedrig.

Die denkbare verkehrstechnische Maßnahme „Rechtzeitige Vorankündigung, wenn folgender Streckenabschnitt für die temporäre Seitenstreifenfreigabe eingerichtet ist“ entspricht der Maßnahme aus Kapitel 6.3.2. Die vorgenommene Bewertung unterscheidet sich nicht.

Eine Umsetzung der verkehrstechnischen Maßnahme „Angabe der Entfernung bis zur nächsten Not-

haltebuch“ stellt eine Redundanz zu den informationstechnischen Maßnahmen der Übermittlung von Verkehrszeicheninformationen dar und hat einen unterstützenden Charakter mit eingeschränkter Wirksamkeit. Es soll außerdem auf die Art der Anzeige geachtet werden, da eine Erkennung von vertikalen Verkehrszeichen unter bestimmten Bedingungen (abgedeckte Verkehrszeichen) nicht gewährleistet werden kann. Weiterhin ist das Aufstellen von zusätzlichen Verkehrszeichen häufig nicht im Sinne der Straßenbauverwaltungen, die in der Regel eine Reduzierung der Anzahl von Verkehrszeichen anstreben. Die Hinweise und Bewertung für diese Maßnahme gelten ebenfalls für die verkehrstechnische Maßnahme „Ankündigung der temporären Seitenstreifenfreigabe in bestimmtem Abstand vor Beginn der Maßnahme (ausreichende Reaktionszeit)“.

Die informationstechnische Maßnahme „Redundante Auslegung der ankündigenden Verkehrszeichen über V2I-Kommunikation“ wurde bereits im Kapitel 6.3.2 behandelt.

Die informationstechnische Maßnahme „Verortung relevanter Informationen zur temporären Seitenstreifenfreigabe in digitaler Karte“ wurde ebenfalls bereits im Wesentlichen in Kapitel 6.3.2 behandelt. Abweichend davon wird bei dieser Maßnahme eine noch höhere Anforderung an die Datenqualität und vor allem an die Datenaktualität gestellt, da dynamische Informationen, wie beispielsweise der Zustand der Freigabe, verlässlich sein müssen, um eine hohe Wirksamkeit zu erreichen. Die im Fahrzeug zugrundeliegende Information stellt die Entscheidungsgrundlage dar, ob automatisiert gefahren werden kann oder nicht. Bei aktiver Seitenstreifenfreigabe ist von einer automatisierten Fahrt abzusehen, da der Seitenstreifen von Fahrzeugen befahren wird und nicht mehr als Raum für einen Halt zur Verfügung steht.

### 6.3.4 Szenario A3: Arbeitsstelle kurzer Dauer auf Richtungsfahrbahn

Die Arbeitsstelle auf einer Richtungsfahrbahn kann ein statisches Szenario darstellen, welches im Vorfeld i. d. R. bekannt ist oder auch eine sich kontinuierlich fortbewegende Arbeitsstelle sein, wie das z. B. bei Mäharbeiten der Fall ist. In beiden Fällen muss das automatisierte Fahrzeug für eine sichere Durchführung der Fahraufgabe rechtzeitig die Geschwindigkeit herabsetzen, ggf. den Fahstreifen

wechseln und die Arbeitsstelle durchfahren. Ein Anhalten ist nur vor der Arbeitsstelle (auf dem Seitenstreifen) möglich.

Die veränderte Verkehrsführung muss in Abhängigkeit von der zuvor gefahrenen Geschwindigkeit frühzeitig detektiert werden bzw. bekannt sein, um ein rechtzeitiges und sicheres Herabbremsen zu ermöglichen.

Seitens der verkehrstechnischen Infrastruktur wurden drei Maßnahmen vorgeschlagen.

Die beidseitige Anordnung aller betreffenden Verkehrszeichen (Ankündigung Arbeitsstelle, Fahrstreifenreduzierung, Geschwindigkeitsbeschränkungen etc.) wurde bereits in Kapitel 6.3.3 behandelt.

Zur Erhöhung der Reaktionszeit wird zudem die Vergrößerung der in den RSA vorgeschlagenen Abstände zwischen der Vorankündigung und dem eigentlichen Beginn der Arbeitsstelle vorgeschlagen. Die nötigen Abstände wären Gegenstand einer Untersuchung, welche in enger Zusammenarbeit mit den Fahrzeugherstellern stattfinden sollte. Da dies eine Redundanz zu den informationstechnischen Maßnahmen (V2I) darstellt, wird diese Maßnahme als unterstützend angesehen. Da die Vorankündigungen bereits heute gemäß RSA vorhanden sind, wird die Wirksamkeit der Maßnahme mit mittel bewertet.

Die technischen und organisatorischen Strukturen zum Herstellen und Einrichten der Verkehrszeichen sind entsprechend bereits vorhanden. Die Anpassung des Regelwerkes bzw. Aktualisierung der Regelpläne kann zudem in einem kurz- bis mittelfristigen Zeitrahmen erfolgen. Der Aufwand bzw. die Kosten werden als niedrig eingestuft, da keine zusätzlichen Maßnahmen, sondern eine Anpassung der bestehenden vorliegt.

Als dritte verkehrstechnische Maßnahme ist darüber hinaus die Kennzeichnung der exakten Positionen von Beginn und Ende einer Arbeitsstelle (bzw. der Fahrstreifenreduzierung) denkbar. Da sich auch diese Information redundant in einer Karte darstellen lässt, wird die Maßnahme analog zur vorhergehenden als unterstützend eingeordnet. Die Wirksamkeit wird ebenfalls als mittel angesehen. Die Kennzeichnung kann durch ein entsprechendes Verkehrs- oder standardisiertes Zusatzzeichen erfolgen. Die Technologie zum Herstellen von Verkehrszeichen, sowie die beteiligten Strukturen sind

bereits vorhanden. Unter der Annahme, dass die nach StVO vorhandenen Verkehrszeichen die Möglichkeit bieten, die Kennzeichnung vorzunehmen, ist der Aufwand verhältnismäßig niedrig und der zeitliche Horizont kurz- bis mittelfristig, da auch hier lediglich eine Aktualisierung der Regelpläne der RSA erfolgen müsste.

Zwei weitere Maßnahmenvorschläge beziehen sich auf die informationstechnische Infrastruktur: Die „Kommunikation der Arbeitsstellen via V2V bzw. V2I“ stellt die redundante Auslegung der ortsfesten Verkehrszeichen, welche die Arbeitsstelle ankündigen, die erlaubte Höchstgeschwindigkeit reduzieren und die Verkehrsführung (Fahrstreifensperrung) anzeigen, dar. Werden diese nicht erkannt, bildet die Informationsübermittlung von anderen Fahrzeugen oder von den Infrastrukturelementen selbst eine Rückfallebene. Die Maßnahme wird entsprechend als zwingend notwendig eingeordnet. Die Wirkung der Maßnahme ist ebenfalls hoch. Vor allem bei sich bewegenden Arbeitsstellen erhält diese Maßnahmen eine entscheidende Bedeutung.

Aus technischer Sicht erscheint das Übertragen der statischen Informationen sowohl via V2V als auch durch V2I bereits heute machbar, da die entsprechenden Technologien vorhanden sind. Organisatorische Strukturen für die Festlegung von Zuständigkeiten und Pflichten (z. B. für die Ausrüstung von Verkehrszeichen oder Arbeitsstellenfahrzeugen mit Sendeeinheiten) müssen noch geschaffen werden, was jedoch in einem kurzfristigen Rahmen erfolgen könnte. Die Voraussetzungen für V2V sind bereits in vielen Fahrzeugen gegeben, der Aufwand bzw. die Kosten für die Ausstattung von Arbeitsstellenfahrzeugen bzw. Verkehrszeichen kann darüber hinaus als niedrig eingestuft werden.

Eine Einrichtung und laufende Aktualisierung eines Arbeitsstelleninformationssystems mit Ankündigung von Arbeitsstellenposition, Art der geänderten Verkehrsführung etc. kann die automatisierte Fahrfunktion mit Informationen unterstützen. Aktuelle Informationen über Arbeitsstellen längerer Dauer werden aktuell über die Bundesländer bzw. die Bundesanstalt für Straßenwesen auf dem Mobilitäts Daten Marktplatz (MDM) zur Verfügung gestellt. Diese Informationen ersetzen das bisherige Baustelleninformationssystem (BIS) des Bundes. Für die Kommunikation von Arbeitsstellen längerer Dauer könnte dieses System demnach grundsätzlich verwendet werden. Dies setzt zwingend voraus, dass die Informationen verlässlich und standardi-

siert eingepflegt und auch wieder entfernt werden. Für Arbeitsstellen kürzerer Dauer (Tagesbaustelle) wird das System in der Regel nicht genutzt. Auch bei einer laufenden Aktualisierung der Daten ist hier immer mit einer Zeitverzögerung der Information zu rechnen, sodass zeitnahe Reaktionen des Fahrzeugs nicht immer möglich wären. Daher ist auch die Wirkung der Maßnahme mit mittel zu bewerten.

Aufgrund der vorhandenen Technologien und der organisatorischen Strukturen ist eine Realisierung grundsätzlich möglich. Aufgrund des hohen Umfangs der Maßnahme ist mit einer mittelfristigen Umsetzung zu rechnen, was auch zu einem mittleren Kostenaufwand für die Planung, Umsetzung, Pflege, Wartung oder Aktualisierung führt.

### 6.3.5 Zusammenfassung Autobahnchauffeur

Die Bewertungen der entwickelten Maßnahmen für die Szenarien des Autobahnchauffeurs zeigen die Vielfalt und Komplexität der betrachteten Thematik. Durch die Bewertungen wird deutlich, dass die Ableitung von geeigneten Maßnahmen zur Unterstützung des automatisierten Fahrens nicht einfach möglich ist. Die Bewertung der verschiedenen Maßnahmen in den beispielhaft betrachteten Szenarien basiert dabei immer auf vorhandenen bzw. in Entwicklung befindlichen Technologien. Diese gilt sowohl für die fahrzeugseitigen Maßnahmen als auch für Straßenverkehrsinfrastruktur.

Mit der Weiterentwicklung einzelner Technologien, z. B. der Fahrzeugsensorik, der Situationsinterpretation oder auch der Datenübertragung, können einzelne Maßnahmen ihre Wirksamkeit verlieren bzw. zukünftig nicht mehr notwendig sein. Dies gilt vor allem für die fahrzeugseitigen Maßnahmen, da besonders in der Umfeldwahrnehmung bzw. der Sensorik eine hohe Dynamik in der Forschung und Entwicklung herrscht. Hier sei beispielhaft die Erkennung geänderter Verkehrsführung in Baustellen genannt, welche in Zukunft komplett vom Fahrzeug übernommen werden könnte. Hieraus resultiert die Bewertung der Maßnahmen, speziell der Notwendigkeit der Maßnahmen, nach dem heutigen Stand der Technik der fahrzeugseitigen Technologie.

Die verschiedenen betrachteten Maßnahmen im Bereich der entwurfstechnischen bzw. straßenbaulichen Infrastruktur werden als zwingend erforderlich mit einer hohen oder auch mittleren Wirksamkeit bewertet. Trotz der für eine Umsetzung vorhan-

denen technischen und organisatorischen Rahmenbedingungen ist mit den Maßnahmen immer ein hoher zeitlicher und finanzieller Aufwand verbunden.

Maßnahmen im Bereich der verkehrstechnischen Infrastruktur werden zum Großteil als unterstützend, vereinzelt auch als zwingend erforderlich, eingeschätzt. Die Wirksamkeit wird in der Regel als mittel bewertet. Lediglich das einheitliche beidseitige Aufstellen von Verkehrszeichen wird als verkehrstechnische Maßnahme mit einer hohen Wirksamkeit z. B. bei statischen Arbeitsstellen bewertet. Andere mögliche Maßnahmen im Bereich der verkehrstechnischen Infrastruktur, wie z. B. eine verbesserte Beschilderung von Nothaltebuchten oder auch eine verbesserte Kennzeichnung und Verortung von Arbeitsstellen, zeigen mittlere Wirksamkeiten. Für diese Maßnahmen sind die Techniken und Organisationen vorhanden, um eine schnelle Umsetzung mit geringen bis mittleren finanziellen Aufwänden zu ermöglichen.

Die für den Autobahnchauffeur erarbeiteten verkehrstechnischen Maßnahmen werden dabei in der Regel als redundante Maßnahmen betrachtet bzw. eingesetzt. Für das automatisierte Fahren ist dies von entscheidender Bedeutung, da durch das Vorhandensein einer redundanten Information für ein Ereignis oder eine bauliche bzw. betriebliche Gegebenheit ein Mehrwert für automatisierte Fahrzeuge generiert wird.

Die zusätzlich verfügbaren Informationen reduzieren die Unsicherheit in den Fahrentscheidungen und somit auch das Risiko des Betriebs eines Fahrzeugs. Dabei ist zu beachten, dass eine echte Redundanz der Informationsgewinnung nur dann gegeben ist, wenn der Nachweis der funktionalen Sicherheit der betrachteten Maßnahmen analog zu fahrzeugseitiger Technologie erbracht werden kann. Da derzeit kein einheitliches Vorgehen besteht, wie diese Nachweise zu führen sind, um eine echte Redundanz herzustellen ist auf diesem Gebiet von weiterem Forschungs- und vor allem auch Abstimmungsbedarf auszugehen.

Die verschiedenen Maßnahmen der informationstechnischen Infrastruktur werden vorwiegend als zwingend notwendig für das automatisierte Fahren bewertet, da diese Maßnahmen in der Regel eine zweite bzw. redundante Informationsebene für ein Ereignis oder auch eine lokale Besonderheit kommunizieren. Die Wirksamkeit der Maßnahmen ist in

der Regel hoch. Die Techniken sind zum Großteil vorhanden bzw. in der Entwicklung. Auch hier spielt der Nachweis der funktionalen Sicherheit eine entscheidende Rolle.

Nicht vorhanden sind bzw. noch geschaffen werden müssen die Organisationsstrukturen, um die Maßnahmen der informationstechnischen Infrastruktur umsetzen zu können. In diesem Zusammenhang ist vor allem eine einheitliche digitale Kartenbasis zu nennen, die den funktionalen Sicherheits- und Qualitätsansprüchen genügen muss. Sollen neben statischen Informationen (Standorte von Verkehrszeichen oder Besonderheit der entwurfstechnischen/baulichen Infrastruktur) auch dynamische (z. B. Verkehrsunfälle oder Arbeitsstellen) bzw. hoch dynamische (z. B. Stauenden) Informationen kommuniziert werden, müssen hierfür seitens der Straßenbaulastträger und der Automobilindustrie die entsprechenden Rahmenbedingungen, Standards und Qualitätskriterien geschaffen werden. Ebenso sind Verfahren zu etablieren, welche die Einhaltung definierter Qualitätsansprüche sicherstellen. Insbesondere die notwendigen Schnittstellen und Standards einer digitalen Karte, ihre Kosten, Betreibermodelle etc. sind derzeit völlig offen.

Hieraus resultiert dann auch, dass eine zeitliche Umsetzung nur mittelfristig erreicht werden kann. Die beidseitige (sowohl infrastrukturseitig als auch fahrzeugseitig) funktionale Absicherung der Maßnahmen ist ein essenzieller Baustein für ein funktionierendes und geregeltes Miteinander von Fahrzeug und Straße im automatisierten Umfeld. Weitere Forschungsarbeiten und Abstimmungsaktivitäten sind hierfür ein zwingendes Muss.

## 6.4 Ergebnisse Pendlerchauffeur

### 6.4.1 Szenario P1: Einbahnige Straße mit verdeckten oder fehlenden Fahrbahnmarkierungen

Es ist anzunehmen, dass Fahrbahnmarkierungen auf absehbare Zeit für die Querpositionierung automatisierter Fahrzeuge erforderlich sein werden. Daher könnten vorrangig verkehrstechnische Maßnahmen zur Qualitätssicherung, wie z. B. erweiterte Streckenkontrollen zur „Sicherstellung maschinell erkennbarer Markierungen“ erforderlich werden. Eine weitergehende Bewertung der in Kapitel 5.3.1 erörterten verkehrstechnischen Maßnahmen ist angesichts offener Fragen derzeit jedoch nicht mög-

lich. Beispielsweise kann bisher keine Aussage zur erforderlichen Mindestqualität von Fahrbahnmarkierungen für das automatisierte Fahren getroffen werden. Auch ist bislang unklar, welche Kenngrößen für die sensorbasierte Fahrzeugführung relevant sind und wie diese im Zusammenhang mit den Anforderungen menschlicher Fahrer stehen. Regelmäßige Streckenkontrollen werden bereits heute durchgeführt. Derzeit ist aber nicht belegt, dass über den Status quo hinausgehende Anforderungen an die Häufigkeit, den Umfang, die Methodik, Einheitlichkeit etc. aus den automatisierten Fahrten resultieren. Prozesse sind jedoch zu etablieren, die etwa neue verkehrsregelnde Maßnahmen oder Baumaßnahmen (bspw. Anordnung neuer Verkehrszeichen, Einrichtung von Arbeitsstellen) einheitlich erfassen, wenn diese für eine hochgenaue, geschichtete digitale Karte zur Verfügung gestellt werden sollen. Hinsichtlich der Frage der technischen Realisierbarkeit ist u. a. zu berücksichtigen, dass Methoden zur systematischen, schnellfahrenden Zustandserfassung von Markierungen für alle relevanten Parameter bisher nicht entwickelt wurden.

Weiterhin stellt sich die Frage, ob als Redundanz eine Überwachung des Vorhandenseins maschinell lesbarer Markierungen durch das automatisierte Fahrzeug ebenfalls notwendig ist. Die Technologien für die fahrzeugseitige Kontrolle und Erkennung sind in Entwicklung. Aussagen bezüglich des Entwicklungsstandes der Automobilindustrie fehlen derzeit, um eine Zeitangabe machen zu können und die Maßnahme entsprechend aussagekräftig bewerten zu können. Der Kostenaufwand ist dabei grundsätzlich von der geforderten Qualität der Kontrolle bzw. den zu erhebenden Qualitätskenngrößen abhängig.

Hierbei ist der Aspekt von kurzfristig auftretenden Störungen, wie Verschmutzung oder Schneeabdeckung der Markierung, zu berücksichtigen, die durch reguläre Streckenkontrollen nur bedingt erfasst werden können. Werden bei Streckenkontrollen Beschädigungen an der Markierung festgestellt, so trägt es zur Wirksamkeit der Maßnahme bei, diese Information so zeitnah wie möglich an die Fahrzeuge zu senden (vgl. digitale Karte).

Seitens der Infrastruktur ist die organisatorische Realisierbarkeit durch vorgeschriebene Streckenkontrollen, welche in fest definiertem Zeitabstand erfolgen, grundsätzlich gegeben. Derzeit ist es jedoch noch unklar, welcher Standard für die Kontrol-

le erforderlich ist, und ebenso besteht Unklarheit, ob dies in den bestehenden Strukturen der Straßenbauverwaltung gelöst werden kann bzw. welche Anpassungen notwendig sind. Hier besteht Bedarf an weiteren Analysen und Untersuchungen.

Offene Fragen bestehen auch hinsichtlich der verkehrstechnischen Maßnahme „Einrichtung weiterer optischer Leiteinrichtungen“. Aus Gründen der Redundanz könnte diese Maßnahme erforderlich sein. Derzeit besteht noch Forschungsbedarf, ob eine Lokalisierung des Fahrzeugs alleine anhand der vorhandenen Leitpfosten möglich ist oder ob z. B. technische Modifikationen der Leitpfosten oder eine engmaschigere Aufstellung notwendig sind. Da Leitpfosten verdreht, verschmutzt oder beschädigt sein können, könnte z. B. Bedarf an einer Intensivierung der Streckenkontrollen und/oder neuen Materialien bestehen, was derzeit noch unklar ist. Hinsichtlich der Nutzung von Fahrzeugrückhaltesystemen zur Lokalisierung des Fahrzeugs ist zu berücksichtigen, dass permanent eingesetzte Fahrzeug-Rückhaltesysteme (FGSV, 2008e) nicht kontinuierlich und im gleichbleibenden Abstand zum Verkehrsraum eingerichtet sind (HFL), sondern nur unter definierten Bedingungen<sup>14</sup> gemäß den Richtlinien für passiven Schutz an Straßen durch Fahrzeug-Rückhaltesysteme (FGSV, 2009) eingerichtet werden dürfen. Sie sind damit als Träger i. d. R. nicht vorhanden. Zudem können Fahrzeug-Rückhaltesysteme nach einem Fahrzeuganprall verformt sein, was sich als problematisch für die Lokalisierung erweisen könnte. Des Weiteren sind Leitpfosten und Rückhaltesysteme nach Verordnung (EU) Nr. 305/2011 CE-kennzeichnungspflichtig. Technische Modifikationen könnten eine erneute Prüfung erforderlich machen. Das schlägt sich sowohl in der zeitlichen Realisierbarkeit als auch in den Kosten nieder.

Die informationstechnische Maßnahme „Kommunikation der Fahrbahnmarkierung per V2I“ setzt dort an, wo die Erkennung der Fahrbahnlage durch optische Leiteinrichtungen ihre Grenzen hat. Grundsätzlich stehen verschiedene Technologien zur Verfügung, um die Markierungen informationstech-

nisch zu erkennen. RFID-Tags könnten als passives System für fahrzeugseitig entsprechende Lesegeräte eingesetzt werden. Grundsätzlich ermöglicht der Stand der Technik die Realisierbarkeit. Für eine V2X Kommunikation stellt jedoch die Sicherstellung der durchgängigen Energieversorgung eine Herausforderung dar, da diese in der Regel an einbahnigen Straßen außerhalb bebauter Gebiete nicht vorhanden ist bzw. nur mit erheblichem Aufwand hergestellt werden könnte. Da angesichts der zuvor beschriebenen offenen Fragen derzeit ein klarer Bedarf für diese Maßnahme nicht abgeleitet werden kann und der Aufwand für den Ausbau und die Unterhaltung bei dieser Maßnahme als sehr hoch eingeschätzt wird, wird hier auf die Ableitung einer Anforderung verzichtet.

Als informationstechnische Maßnahme hat die „Übertragung der Beschilderung per V2I an das Fahrzeug“ die Aufgabe vertikale Verkehrszeichen, wie etwa Überholverbote oder Geschwindigkeitsbegrenzungen, als Information über die Infrastruktur auf das Fahrzeug zu senden. Dabei stellt das Verkehrszeichen die Sendeeinheit dar. Die Lösung hat eine unterstützende und redundante Funktion für das automatisiert fahrende Fahrzeug, welche eine hohe Wirksamkeit aufweisen kann. Sowohl die Kommunikation über WLAN oder Mobilfunk als auch die Sende- und Empfangseinheiten stellen vorhandene Technologien dar. Im Rahmen der aca-tech Studie wurde ein Zeithorizont bis 2020 genannt, in welchem die Mobilfunktechnologien LTE, 5G und LTE V2X ein sehr weites Spektrum von Kommunikationsanforderungen bezüglich Bandbreite, Latenz, Zuverlässigkeit und Sicherheit abdecken können (LEMMER, 2016). Auch hier stellt jedoch wieder die Sicherstellung einer durchgängigen Energieversorgung eine große Herausforderung dar. Organisatorisch müssten die notwendigen Strukturen geschaffen werden, um die Fragen nach Wartung, Pflege oder Einbau abstimmen zu können. Die zeitliche Realisierbarkeit des Vorhabens kann daher als mittelfristig verbunden mit einem mittleren Kostenaufwand für den Ausbau abgeschätzt werden.

Die „Verortung der Informationen von vertikalen Verkehrszeichen in digitaler Karte“ ist eine alternative Maßnahme der informationstechnischen Infrastruktur. Die Notwendigkeit der Maßnahme ist abhängig von der Nutzung und dem Inhalt der digitalen Karte. Werden nur dauerhafte statische Verkehrszeichen aufgenommen, so hat sie eine unter-

<sup>14</sup> Schutzbedürftige Bereiche (z. B. intensiv genutzte Aufenthaltsbereiche), Hindernisse (nicht verformbare Einzelhindernisse), Geschwindigkeit (> 50 km/h), erhöhte Abkommenswahrscheinlichkeit (z. B. Strecken mit untypisch großen Richtungsänderungen), DTV (Kfz/24h)

stützende Funktion. Sind dagegen auch Verkehrszeichen enthalten, die nur zeitlich befristet aufgestellt werden, steigt die Anforderung an Datenaktualität. Diese Maßnahme wird als zwingend erforderlich bewertet. Dies kann bei Straßen mit neuem Belag der Fall sein. In beiden Fällen jedoch kann die Wirksamkeit als hoch eingeschätzt werden. Die Technologie ist teilweise vorhanden, da es digitale Verkehrskarten mit referenzierten Objekten bereits gibt und die Möglichkeit der Verortung eines Objektes grundsätzlich gegeben ist. Die Fusion der Informationen mit dem Fahrzeug wird noch erprobt. Die organisatorischen Strukturen für die Erstellung und Pflege einer solchen Karte, die Festlegung der Zuständigkeiten sowie die Funktion der Weitergabe an automatisierte Fahrzeuge müssen noch geschaffen werden. Im Projekt Ko-HAF wurde eine Strecke von 100 km bereits abgedeckt. Die zeitliche Realisierbarkeit wird auf einen Horizont von 10 Jahren und mehr abgeschätzt. Aufgrund des hohen organisatorischen Aufwands wird die Maßnahme mit mittleren Kosten verbunden.

Aus heutiger Sicht wird die Notwendigkeit der „Verortung von Fahrbahnmarkierungen in einer hochgenauen digitalen Referenzkarte“ als informationstechnische Maßnahme gesehen. Eine kurzzeitig fehlende Markierung sollte von der bordeigenen Sensorik erkannt und kompensiert werden können. Dafür müssen Lücken in der Fahrbahnmarkierung deutlich kürzer sein als die Reichweite der zur Erkennung der Fahrbahnmarkierung verwendeten Sensorik. Über längere Lücken, nicht erkennbare Markierungen etc. müssen die automatisierten Fahrzeuge z. B. über die digitale Karte informiert werden. Zum Aufwand und Realisierbarkeit gelten die o. g. Aussagen; es besteht jedoch noch Forschungsbedarf u. a. hinsichtlich der Aktualisierung der Kartendaten.

Als fahrzeugseitige Maßnahme wurde die „Verlässliche Bestimmung der Fahrstreifenlage aus unterschiedlichen Quellen“ entwickelt. Hierbei handelt es sich um eine unterstützende Maßnahme für das automatisierte Fahren. Da die unterschiedlichen Quellen auch unterschiedliche Datenqualitäten aufweisen können, ist eine sichere Information nicht gewährleistet. Die technische Machbarkeit stellt eine Herausforderung aufgrund der vielen unterschiedlichen Quellen dar. Daten und Informationen unterschiedlicher Art lassen sich nur mit hohem Aufwand verarbeiten und auswerten. Die nötigen organisatorischen Strukturen müssen erst geschaffen werden,

um diese Art von Informationen verarbeiten zu können. Die zeitliche Realisierbarkeit für eine solche Maßnahme wird daher als langfristig eingeschätzt, verbunden mit mittleren Entwicklungskosten.

#### **6.4.2 Szenario P2: Mischverkehr mit hohen Geschwindigkeitsdifferenzen**

Bei der Maßnahme „Trennung von motorisiertem und nicht-motorisiertem Verkehr durch generelle Einrichtung straßenbegleitender Geh- und Radwege“ handelt es sich um eine Lösung aus dem entwurfstechnischen Bereich. Die Anordnung von straßenbegleitenden Geh- und Radwegen an Außerortsstraßen ist in den Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (FGSV, 2012b) und den Empfehlungen für Radverkehrsanlagen (FGSV, 2010b) der FGSV eindeutig festgelegt. Da eine Nutzung der Fahrbahn trotz eines vorhandenen Radweges dennoch grundsätzlich vorkommen kann, ist die Notwendigkeit der Maßnahme als unterstützend einzustufen und mit einer mittleren bis niedrigen Wirksamkeit zu bewerten.

Die technische und organisatorische Realisierbarkeit ist zwar vorhanden, kann aber erst langfristig aufgrund des Bauaufwands umgesetzt werden. Dementsprechend bewegen sich auch die damit verbundenen Kosten im mittleren Bereich.

Die verkehrstechnische Infrastrukturmaßnahme „Einrichtung eines generellen Tempolimits für automatisiert fahrende Fahrzeuge“ strebt eine Einführung von unterschiedlichen Geschwindigkeiten von „normalen“ und automatisiert fahrenden Fahrzeugen an. Diese Entwicklung ist jedoch nicht erwünscht, da eine solche Regelung zwar nur für einen Typ Fahrzeug gilt, trotzdem aber Einfluss auch auf andere Fahrzeugtypen und deren Fahrverhalten hat. Des Weiteren wird angestrebt, dass ein System selbstständig seine Wunschgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Umfelds einschätzen soll. Basierend darauf ergibt sich keine Notwendigkeit für diese Maßnahme. Aus technischer und organisatorischer Sicht wäre die Maßnahme mittelfristig realisierbar und mit mittleren Kosten verbunden.

Die „Kennzeichnung der Strecken mit bzw. ohne getrennten Geh- und Radwegen in digitaler Karte“ als informationstechnische Maßnahme verfolgt das selbe Prinzip, wie die vorab beschriebene Maßnahme. Für die Redundanz der Information ist die Notwendigkeit als zwingend zu beurteilen. Die Wirk-

samkeit der dynamischen Informationen ist stark von der Zeit abhängig, bis diese in die digitale Karte eingepflegt werden. Die Wirksamkeit der Maßnahme aus Sicht der Informationsverfügung ist bei regelmäßiger Qualitätskontrolle hoch. Auch hier stellt sich wieder die Frage des noch zu definierenden Standards der Qualität und welche Institution für die Einhaltung des Standards verantwortlich ist. Dennoch kann eine mögliche Nutzung der Fahrbahn durch Radfahrer trotz eines vorhandenen Geh- und Radwegs nicht ausgeschlossen werden.

Die Technologie für die Realisierbarkeit des Vorhabens ist grundsätzlich vorhanden. Der Schritt der Informationspflege im Fahrzeug wird derzeit noch getestet. Einen möglichen Weg stellen hier die Daten- bzw. Informationsplattformen Mobilitäts Daten Marktplatz (MDM) oder auch die mCLOUD dar. Herausforderungen stellen außerdem die Qualität der Daten und der Zeitversatz vom Eintreten des Ereignisses und bis zur Umsetzung in der digitalen Karte dar. Es wird hier ganz klar die Empfehlung ausgesprochen, auf Basis von Anforderungen durch das automatisierte Fahren zu prüfen, inwieweit bestehende Dienste, wie z. B. der MDM, für die Bereitstellung und Übermittlung von Informationen an die digitale Referenzkarte geeignet sind bzw. diese Funktion bereits im Einzelnen erfüllen.

Als informationstechnische Maßnahme wurde die „Gegenseitige Information vernetzter Fahrzeuge (V2V) über langsame Verkehrsteilnehmer (ggf. mit straßenseitiger Zwischenspeicherung via V2I)“ vorgestellt. Für die Funktionalität des automatisierten Fahrens ist es wünschenswert dynamische Informationen so aktuell wie möglich zu erhalten. Ein Fahrzeug, welches gerade auf einen langsamen Verkehrsteilnehmer trifft, kann somit diese Information zeitnah weiterreichen, entweder über V2V an andere Fahrzeuge oder über V2I für die Zwischenspeicherung an die Infrastruktur (z. B. kleine RSU). Eine derart schnelle Informationsverbreitung weist eine hohe Wirksamkeit auf.

Aus technischer Sicht sind die Einzelkomponenten des Systems bereits realisierbar. Derzeit wird die Funktionalität des Gesamtsystems entwickelt und getestet. Außerdem muss die Information herstellerübergreifend gesendet und empfangen werden können, was derzeit nicht der Fall ist und eine organisatorische Realisierbarkeit verhindert. Zeitlich ist technologieabhängig eine kurzfristige bis mittelfristige Umsetzung abschätzbar. Der Kostenaufwand für die V2V-Kommunikation (Entwicklung und Um-

setzung) wird hauptsächlich durch den Fahrzeugpreis abgedeckt. Die V2I-Kommunikation verursacht Kosten, die in der Anschaffung als niedrig angesehen werden können, da Funktechnologie als Massenprodukt günstig ist. Zugleich gilt es die Installationskosten zu berücksichtigen, welche bei einer flächendeckenden Ausstattung der Infrastruktur nicht zu unterschätzen sind, als auch die Frage der Kostenträgerschaft.

### 6.4.3 Szenario P3: Überholvorgang auf einbahniger Straße

Die verkehrstechnische Maßnahme „Sicherstellung maschinell erkennbarer Fahrbahnmarkierung und Verkehrszeichen“ wurde bereits im Kapitel 6.5.1 behandelt und stimmt mit dessen Bewertung überein.

Die verkehrstechnische Maßnahme „Einführung eines Überholverbots für automatisiert fahrende Fahrzeuge“ wurde als nicht erforderlich identifiziert, da seitens der Fahrzeughersteller eine Entscheidung des automatisiert fahrenden Fahrzeugs bzgl. des Überholens angestrebt wird. Das automatisiert fahrende Fahrzeug soll einen sicheren Überholvorgang erkennen und durchführen können. Die Wirksamkeit der Maßnahme wird daher als niedrig bewertet.

Die Technologie und die organisatorischen Strukturen sind grundsätzlich vorhanden, jedoch wäre eine Änderung der Straßenverkehrsordnung dahingehend für die Umsetzung erforderlich, dass automatisierte Fahrzeuge abweichende Verkehrsregeln beachten müssten. Das würde einen erheblichen zeitlichen Aufwand nach sich ziehen und eine theoretische Realisierbarkeit erst mittelfristig ermöglichen. Des Weiteren entstehen dafür hohe Kosten.

Die „Verortung der Streckenabschnitte mit bzw. ohne Erlaubnis zum Überholen in digitaler Karte“ bildet eine informationstechnische Maßnahme zur Unterstützung des automatisierten Fahrens. Die Maßnahme ist als Redundanz und zusätzliche Informationsquelle geeignet, kann jedoch auch entbehrlich sein. Wenn die Situation nicht eindeutig ist, beispielsweise wenn keine Informationen über ein mögliches Überholverbot vorhanden sind, so wird das Fahrzeug den Überholvorgang nicht starten. Die Technologie ist im Wesentlichen vorhanden, jedoch müssen die organisatorischen Strukturen für die Erstellung und Pflege der Karte noch geschaffen werden. Zeitlich ist die Umsetzung mit kurzfristig

bis mittelfristig möglich. Dies verursacht geringe bis mittlere Kosten (vorwiegend durch den hohen organisatorischen Aufwand).

#### 6.4.4 Szenario P4: Arbeitsstelle auf einbahniger Straße

Dieses Szenario beschreibt die Situation eines stationären, im Normalfall bekannten Hindernisses in Form einer Arbeitsstelle auf einer einbahnigen Straße. Es ist demnach für das automatisiert fahrende Fahrzeug erforderlich rechtzeitig Handlungen einzuleiten. Das kann beispielsweise das Durchfahren der Arbeitsstelle unter Benutzung der Gegenfahrbahn oder rechtzeitiges Halten vor dem Hindernis sein. Dazu muss die frühzeitige Erkennung einer Arbeitsstelle verlässlich sein.

Auf Seite der verkehrstechnischen Infrastruktur wurden fünf Maßnahmen im Rahmen des Workshops diskutiert. Im Einzelnen sind dies:

- „Rechtzeitige Herabsetzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit“ um die zur Verfügung stehende Reaktionszeit zu verlängern und günstigere Bedingungen für die Detektion zu schaffen,
- „frühzeitige und eindeutige Ankündigung der veränderten Verkehrsführung (min. 1.000 m)“ zur Verlängerung einer möglichen Reaktionszeit,
- „Einrichtung temporärer Leiteinrichtungen für die Benutzung der Gegenfahrbahn“ um eine sichere Benutzung der Fahrbahn des Gegenverkehrs (Arbeitsstellendurchfahrt) für automatisiert fahrende Fahrzeuge zu ermöglichen,
- „Abdecken oder Drehen von Verkehrszeichen mit widersprüchlichen Weisungen“ um Falschinformationen für automatisiert fahrende Fahrzeuge zu vermeiden, sowie das auch bei manuell gefahrenen Fahrzeugen der Fall ist und
- „generelle Einrichtung einer Lichtsignalanlage (LSA) zur Sicherung der einstreifigen Verkehrsführung“ um grundsätzlich eine Absicherung der Gegenverkehrsführung an Arbeitsstellen auf einbahnigen Straßen vorzunehmen.

Die ersten vier genannten Maßnahmen sind jede für sich für eine korrekte Funktionalität der automatisierten Fahrfunktion von zwingender Notwendig-

keit. Sie stellen grundlegende Informationen dem Fahrzeug zur Verfügung, welche für die Einleitung von Handlungen und deren Durchführung erforderlich sind. Die Wirksamkeit hängt von der Qualität der Detektion ab und ist für verlässliche Erkennungsraten hoch.

Die Infrastrukturmaßnahme, welche eine generelle Verkehrsführung und Absicherung der Arbeitsstelle mit einer LSA anstrebt, stellt keine zwingende Notwendigkeit dar und besitzt eine unterstützende Funktion, wenn sie umgesetzt wird. Das hat den Hintergrund, dass ein automatisiert fahrendes Fahrzeug auch die Möglichkeit bieten muss, selbstständig die Situation auf der Gegenfahrbahn einzuschätzen, um die Arbeitsstelle durchfahren zu können. Der Einsatz einer LSA soll nur dann für automatisierte Fahrzeuge erforderlich sein, wenn die Fahrzeugsensorik nicht die gesamte Länge der Arbeitsstelle erfassen kann. Aus diesem Grund stellt sich auch die Wirksamkeit der Maßnahme als niedrig heraus, da die Wirkung im Falle einer weiten Sichtweite der bordeigenen Sensorik nicht gegeben ist.

Alle fünf genannten verkehrstechnischen Infrastrukturmaßnahmen werden derzeit je nach Bedarf unter Berücksichtigung der geltenden Regelungen und Richtlinien für die Absicherung und Verkehrsführung von Arbeitsstellen von den Straßenbauverwaltungen umgesetzt. Es sind Vorkehrungen, welche auch für nicht automatisiert fahrenden Fahrzeuge erforderlich sind. Diese werden nicht immer mit aller Konsequenz in der Praxis umgesetzt bzw. sind nicht in allen Fällen notwendig, außer der Maßnahme 4, da weder eine Ankündigung im Abstand von mind. 1.000 m jederzeit erfolgt, noch temporäre Leiteinrichtungen stets vorhanden sind. Im Fall der automatisiert fahrenden Fahrzeuge ist sicherzustellen, welche Auswirkung das Fehlen einer Maßnahme hat und wie das Fahrzeug damit umgeht.

Daher ist die technische und organisatorische Realisierbarkeit gegeben und wird mit vorhanden bewertet. Weiterhin ist auch die Umsetzung kurzfristig mit einem geringen Kostenaufwand möglich.

Als informationstechnische Maßnahmen wurden vier exemplarische Vorschläge erarbeitet. Die „Redundante Auslegung der ankündigenden Verkehrszeichen und Kommunikation der Signalwechselzeiten einer LSA über V2I“ wird als Rückfallebene für eine fehlerhafte oder nicht vorhandene bordautonome Erkennung von Verkehrszeichen und LSA als wünschenswert angesehen. LSA an Landstraßen

sind jedoch ein Standardfall, mit dem das automatisierte Fahren zurecht kommen muss (mit Tempo 70 km/h nach VwV-StVO). Bei einer Bremsverzögerung von  $2,5 \text{ m/s}^2$ , die auf einem nassen und schmierigen Asphalt erreicht werden kann, haben wir eine Verzögerungsstrecke von 75 m. Es ist zu untersuchen, ob die bordautonome Erkennung von Verkehrszeichen und LSA diese Anforderung abdecken kann. Mit der redundanten Kommunikation des Signalisierungszustandes kann ein Ausfall der bordautonomen Detektion abgefedert werden. Daher wird die Wirkung dieser Maßnahme als hoch angesehen.

Aus technischer Sicht ist die Realisierbarkeit bereits möglich, um Signalzustände von LSA mit einfachen Steuerungen beispielsweise über V2I an Fahrzeuge zu übertragen. Die organisatorischen Strukturen für die Festlegung von Zuständigkeiten und Pflichten (z. B. für die Ausrüstung von Verkehrszeichen mit Sendeeinheiten) müssen noch geschaffen werden. Dies könnte kurzfristig erfolgen. Da es sich dabei um Verkehrszeichen und Lichtsignalanlagen für Arbeitsstellen handelt, halten sich der Umfang und damit die Kosten in Grenzen (geringer finanzieller Aufwand). Die generelle redundante Kommunikation des Signalisierungszustandes jeder LSA auf Landstraßen ist ein Themenfeld, welches weiteren Forschungsbedarf und Analysen der Notwendigkeit bedarf.

Die „Kommunikation mit Baken zur Führung durch den Arbeitsstellenbereich“ stellt eine unterstützende Maßnahme für die fahrzeugseitige Erkennung von Verkehrsbaken mit einer hohen Wirksamkeit dar. Von technologischer Seite aus wird die Realisierbarkeit bereits ermöglicht, jedoch müssen von der organisatorischen Seite die benötigten Strukturen festgelegt werden, um eine eindeutige Zuständigkeit und eine reibungslose Umsetzung sicherstellen zu können. Der zeitliche und finanzielle Aufwand ist als niedrig zu bewerten, da es sich um eine Baustelle handelt und damit um eine begrenzte Straßenlänge.

Die Maßnahme „Einrichtung und laufende Aktualisierung eines Arbeitsstelleninformationssystems“ wurde bereits für das Szenario der Arbeitsstelle auf der Richtungsfahrbahn einer Autobahn in Kapitel 6.3.4 behandelt. Die Bewertungen sind für die Arbeitsstelle auf Landstraßen identisch.

Die „Versorgung des Informationssystems“ durch beispielsweise Ortungs- und Kommunikationseinheit in Lichtsignalanlagen oder Sicherungsfahrzeug

ist für die Funktionalität eines Arbeitsstelleninformationssystems zwingend erforderlich. Die Wirksamkeit ist bei umfangreicher und konsequenter Umsetzung hoch. Der technische Stand von Ortung und Kommunikation macht die Realisierbarkeit der Maßnahme möglich. Die organisatorische Machbarkeit ist teilweise bereits vorhanden, da Arbeitsstellenfahrzeuge vereinzelt mit Ortungs- und Kommunikationseinheiten ausgerüstet sind. Daher ist eine kurzfristige Umsetzung mit niedrigen Kosten realistisch.

#### 6.4.5 Zusammenfassung Pendlerchauffeur

Auch für die beispielhaft ausgewählten Szenarien des Pendlerchauffeurs werden erwartungsgemäß die Maßnahmen im Bereich der entwurfstechnischen bzw. straßenbaulichen Infrastruktur als zwingend erforderlich mit einer hohen oder auch mittleren Wirksamkeit bewertet. Auch hier sind die technischen und organisatorischen Rahmenbedingungen für eine Umsetzung der Maßnahmen grundsätzlich vorhanden. Aufgrund der langen Planungs- und Bauzeiten sind alle entwurfstechnischen bzw. straßenbaulichen Maßnahmen auch für die Landstraßen immer mit einem hohen zeitlichen und finanziellen Aufwand verbunden.

Ein Großteil der verkehrstechnischen Maßnahmen wird als zwingend erforderlich bzw. unterstützend für das automatisierte Fahren eingeschätzt. Die Wirksamkeit wird in der Regel als hoch, vereinzelt auch nur als mittel bewertet. Für die Umsetzung vieler verkehrstechnischen Maßnahmen sind die technischen und organisatorischen Randbedingungen grundsätzlich gegeben. An einbahnigen Straßen muss jedoch beachtet werden, dass eine durchgehende Stromversorgung im Gegensatz zu den Autobahnen nicht gegeben ist. Hieraus resultiert eine längerfristige Umsetzung mit niedrigen oder auch mittleren Aufwänden. Dies gilt vor allem für die betrachteten Maßnahmen für das Szenario P4 „Arbeitsstelle auf einbahniger Straße“.

Als vorrangig werden auch die verkehrstechnischen Maßnahmen eingestuft, welche die Einhaltung bzw. Erhaltung der Qualitätsstandards (z. B. der Fahrbahn oder der Verkehrszeichen) sicherstellen. Hinsichtlich der konkreten Ausgestaltung gibt es derzeit jedoch noch viele grundsätzliche Fragen, die einer Klärung bedürfen, sodass eine abschließende Bewertung im Rahmen des vorliegenden Grundlagentextes nicht möglich ist.

Auch die für den Pendlerchauffeur erarbeiteten verkehrstechnischen Maßnahmen werden dabei häufig als redundante Maßnahmen betrachtet bzw. eingesetzt. Für das automatisierte Fahren ist dies von entscheidender Bedeutung, da durch das Vorhandensein einer redundanten Information für ein Ereignis oder eine bauliche bzw. betriebliche Gegebenheit, deutliche Vorteile für das automatisierte Fahren auftreten. Für die möglichst genaue Erfassung des Umfelds sind Lösungen umzusetzen, welche zusätzliche Informationen zur fahrzeugseitigen Erstellung eines Umfeldmodells liefern. Fehlende Fahrbahnmarkierungen, Hindernisse oder auch Gefahrenstellen müssen dem automatisiert fahrenden Fahrzeug für eine geeignete und rechtzeitige Reaktion bekannt sein. Wie auch beim Autobahnchauffeur müssen zusätzliche Informationen analog zu fahrzeugseitigen Technologien funktional abgesichert werden.

Maßnahmen der informationstechnischen Infrastruktur werden für den Pendlerchauffeur zum Teil als unterstützend und zum Teil als zwingend notwendig für das automatisierte Fahren bewertet. Auch die Wirksamkeit der Maßnahmen wird differenziert bewertet. Die Techniken für die Umsetzung der Maßnahmen sind in der Regel vorhanden bzw. befinden sich in der Entwicklung.

Nicht vorhanden sind bzw. noch geschaffen werden müssen auch beim Pendlerchauffeur die Organisationsstrukturen, um die Maßnahmen umzusetzen. Auch für den Pendlerchauffeur bildet eine einheitliche hochgenaue, geschichtete digitale Referenzkarte die Grundlage für eine Vielzahl der Maßnahmen. Die digitale Karte bildet somit einen zentralen Bestandteil und ein Themenfeld, welches noch eine Vielzahl anfragen offenlässt, wie unter anderem die Aktualität, Qualität, Sicherstellung der Qualität, Verantwortlichkeiten oder Schnittstellenbeschreibung. Besonderes Augenmerk ist bei der Umsetzung einer Referenzkarte auf ihre Funktionssicherheit zu legen, da sie im sicherheitsrelevanten Bereich automatisierter Fahrzeugsteuerung zur Anwendung kommt.

## 7 Zusammenfassung

### 7.1 Ausgangslage und Aufgabenstellung

Schon heute sind in vielen Neufahrzeugen Assistenzfunktionen zu finden, welche den Fahrer bei der Durchführung der Fahraufgabe unterstützen. Eine Vielzahl von Forschungsvorhaben beschäftigt sich in diesem Zusammenhang mit hoch- und vollautomatisierten Fahrzeugen, die künftig vermehrt am Straßenverkehr teilnehmen werden. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass automatisiertes Fahren künftig zum Großteil auf der vorhandenen Infrastruktur zusammen mit nicht-automatisierten Fahrzeugen erfolgen wird. Nur so kann der Aufbau eines für den Mischverkehr geeigneten großen und zusammenhängenden Straßennetzes schnell erfolgen. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, ob mit der Verbreitung automatisierten Fahrens auch besondere Anforderungen an die Infrastruktur entstehen bzw. wie die Infrastruktur ggf. weiterentwickelt werden sollte. In diesem Zusammenhang ist auch zu klären, mit welchen Maßnahmen die Infrastrukturbetreiber (Bund, Länder und Kommunen) ggf. diesen neuen Anforderungen begegnen müssen.

Dabei darf automatisiertes Fahren zu keinen Einbußen bei der Sicherheit oder der Effizienz des Straßenverkehrs führen. Die Anforderungen an die Zuverlässigkeit und die Verkehrssicherheit automatisierter Fahrzeuge sind sogar besonders hoch, da mit fehlenden Einflussmöglichkeiten durch den Fahrer bzw. Fahrgast die Verantwortung vollständig auf das Fahrzeug verlagert wird. Heutige Assistenzsysteme im Fahrzeug unterstützen dagegen den Fahrer bei der Bewältigung der Fahraufgabe. Ein automatisiertes Fahrzeug nimmt dem Fahrer diese Aufgabe zu großen Teilen ab und bedarf unter Umständen stattdessen in bestimmten Situationen der Übernahme durch den Fahrer.

Das übergeordnete Ziel des vorliegenden Grundlagenprojektes war daher die Beantwortung der Frage, welche Infrastrukturmaßnahmen (straßenbaulich, verkehrs- und informationstechnisch) für das automatisierte Fahren nach heutigem Stand der Fahrzeugtechnologie erforderlich sind. Das Projekt fokussierte hierbei auf die Fahrt auf der Autobahn (Autobahnchauffeur) und der Landstraße (Pendlerchauffeur). Das automatisierte Fahren im komplexen Stadtverkehr mit einer Vielzahl von zusätzlichen Randbedingungen und zum Großteil nicht-mo-

torisierten Verkehrsteilnehmern wurde hier bewusst nicht betrachtet.

Den Einstieg in das Projekt bildete eine zusammenfassende Darstellung des Regelwerkes für den Bau und Betrieb von Straßenverkehrsanlagen. Für die Ableitung eines möglichen Infrastrukturbedarfs aufgrund künftiger automatisierter Fahrfunktionen ist auch die Kenntnis bzw. Definition der verschiedenen Automatisierungsgrade von entscheidender Bedeutung. Diese wurde zusammen mit der Terminologie und dem Stand der Technik zum automatisierten Fahren zusammenfassend dargestellt.

Aufbauend auf diesen Grundlagen wurden anschließend die bzgl. des automatisierten Fahrens auftretenden Herausforderungen für ein Standardszenario Autobahn (Autobahnchauffeur) und Landstraße (Pendlerchauffeur) erarbeitet. Weiterhin wurden beispielhafte Szenarien mit besonderen Herausforderungen an den Fahrer bzw. das automatisiert fahrende Fahrzeug entwickelt. Die Entwicklung der Fahrszenarien erfolgte u. a. bei einem Workshop, an dem neben Vertretern der Straßenbauverwaltung (Infrastrukturbetreiber) auch Vertreter der Automobil- und Zulieferindustrie teilgenommen haben.

Für die verschiedenen Fahrsituationen bzw. Fahrszenarien wurden anschließend Infrastrukturmaßnahmen abgeleitet, welche zur Unterstützung des automatisierten Fahrens denkbar sind. Die Bewertung der Infrastrukturmaßnahmen wurde durch einen weiteren Workshop unterstützt. Bewertet wurden hierbei die einzelnen Maßnahmen nach verschiedenen Kriterien.

Die Bewertung der verschiedenen Maßnahmen in den beispielhaft betrachteten Szenarien basiert dabei immer auf vorhandenen bzw. in der Entwicklung befindlichen Technologien. Mit der Weiterentwicklung einzelner Technologien, z. B. der Fahrzeugsensorik, der Situationsinterpretation oder auch der Datenübertragung, können einzelne Maßnahmen ihre Wirksamkeit verlieren bzw. zukünftig nicht mehr notwendig sein.

## 7.2 Bewertung der Infrastrukturmaßnahmen

Automatisiertes Fahren erscheint unter Normalbedingungen für die im Projekt definierten Regelfälle grundsätzlich ohne zusätzliche Infrastrukturmaß-

nahmen möglich. Unter Idealbedingungen sind Fahrgeschwindigkeiten von 130 km/h auf Autobahnen und somit Relativgeschwindigkeiten zu stehenden Objekten von 130 km/h mit bordeigener Sensorik vorstellbar, wenn auch sehr herausfordernd und noch nicht erreicht. Auf Landstraßen können aufgrund des Gegenverkehrs noch höhere Relativgeschwindigkeiten auftreten. Dadurch stellt die Landstraße nochmals höhere Anforderungen.

Die Bewertung der entwickelten Infrastrukturmaßnahmen für die ausgewählten beispielhaften Szenarien mit besonderen Herausforderungen erfolgte getrennt für den Autobahn- und den Pendlerchauffeur. Hier zeigte sich, dass aufgrund der Vielzahl von Randbedingungen eine einfache Ableitung von Maßnahmen sowohl für den Autobahnchauffeur als auch für den Pendlerchauffeur nicht ohne weiteres möglich ist. Generell ist zu berücksichtigen, dass die Zielsetzung des Projektes in einer exemplarischen Behandlung priorisierter Szenarien bestand. Die Auswahl der Szenarien bildet nicht die Gesamtheit von Szenarien ab, d. h., dass weitere, hier nicht betrachtete Maßnahmen für das automatisierte Fahren auf Autobahnen und Landstraßen erforderlich sein können.

Die entwurfstechnischen Maßnahmen „Einrichtung eines Seitenstreifens“ sowie die „Einrichtung von Nothaltebuchten bei Seitenstreifenfreigaben“ werden für den Autobahnchauffeur als zwingend erforderlich angesehen.

Bei den verkehrstechnischen Maßnahmen wurden die Notwendigkeit und Realisierbarkeit in Abhängigkeit der betrachteten Szenarien unterschiedlich bewertet. Hervorzuheben sind verkehrstechnische Maßnahmen im Bereich von Arbeitsstellen und offene Fragen hinsichtlich zusätzlicher Anforderungen an Fahrbahnmarkierungen sowie deren Qualitätssicherung und Verfügbarkeit, wobei die für den Pendlerchauffeur betrachteten Maßnahmen im Szenario P1 weitgehend auf den Autobahnchauffeur übertragen werden können.

Die für den Autobahnchauffeur erarbeiteten verkehrstechnischen Maßnahmen werden in der Regel als redundante Maßnahmen betrachtet bzw. eingesetzt, um durch die zusätzlich verfügbaren Informationen die Unsicherheiten in den Fahrentscheidungen eines automatisiert fahrenden Fahrzeugs zu minimieren. Dies gilt auch für die verkehrstechnischen Maßnahmen, die für den Pendlerchauffeur erarbeitet wurden. Auch hier ist es für das auto-

matisierte Fahren von entscheidender Bedeutung, redundante Informationen für ein Ereignis oder eine bauliche bzw. betriebliche Gegebenheit zu erhalten. Ohne derartige Informationen ist beispielsweise das automatisierte Befahren des Gegenfahrstreifens im Bereich einer Arbeitsstelle nicht möglich.

Die Maßnahmen der informationstechnischen Infrastruktur, wie z. B. die Kommunikation von Verkehrszeichen oder auch von Arbeitsstellen über Vernetzung wird als zwingend erforderlich bewertet. Die Basis hierfür bildet beispielsweise auch eine digitale Karte, in der dann alle vorhandenen Informationen verfügbar sein müssten. Neben statischen Informationen, wie z. B. aus Bestandsdatenbanken des Bundes und der Länder, sind hier auch die Darstellung von dynamischen Informationen aus Streckenbeeinflussungsanlagen (V2I bzw. I2V) oder auch hochdynamischen Informationen (V2V) denkbar. Derartige Maßnahmen zeigen in der Regel eine hohe Wirksamkeit bzgl. der Unterstützung des automatisierten Fahrens.

Auch wenn die Techniken für die Umsetzung der Maßnahmen grundsätzlich vorhanden bzw. in der Entwicklung sind, ist hier noch ein hoher organisatorischer und zeitlicher Aufwand erforderlich, um die vielen vorhandenen Daten und Standards der Straßenbauverwaltungen und Automobil- und Zulieferindustrie zu vereinheitlichen und für alle nutzbar zu machen.

Die Sicherheitsanforderungen der Maßnahmen müssen sich an den Anforderungen für bordeigene Systeme orientieren. Die Norm ISO 26262 und die darin enthaltenen Empfehlungen und Vorgehensweisen zur Ableitung von Sicherheitsanforderungen müssen auf alle Elemente des Gesamtsystems Infrastruktur – Fahrzeug übertragen werden.

### 7.3 Fazit

Grundsätzlich wird eine erfolgreiche Integration des automatisierten Fahrens in das bestehende Mobilitätssystem nur dann gelingen, wenn die vorhandene Straßenverkehrsinfrastruktur in Verbindung mit einer zeitlich und finanziell überschaubaren Weiterentwicklung genutzt werden kann.

Mit dem heutigen Stand der fahrzeugseitigen Technologie sowie der vorhandenen Straßeninfrastruktur erscheint hochautomatisiertes Fahren auf Autobahnen grundsätzlich vorstellbar. Hochautomati-

siertes Fahren wird jedoch nicht dauerhaft bzw. permanent im gesamten Autobahnnetz möglich sein. Besonders herausfordernd ist die Fähigkeit der fahrzeugseitigen Technologie zur Wahrnehmung des Straßenverlaufs und anderer Verkehrsteilnehmer. Je schlechter diese Wahrnehmung ist, umso langsamer muss ein automatisiertes Fahrzeug fahren. So können bestimmte Autobahnabschnitte oder auch bestimmte Verkehrs- bzw. Witterungsverhältnisse aber auch dazu führen, dass abschnittsweise nicht automatisiert gefahren werden kann, d. h. eine Übergabe an den Fahrer erforderlich ist. Dies kann auch dann der Fall sein, wenn dem automatisiert fahrenden Fahrzeug eine zweite redundante Information zur Situationsbewertung fehlt bzw. in der besonderen Situation nicht zur Verfügung steht.

Besondere Herausforderungen stellen in diesem Zusammenhang die Erkennung von Stauenden und anderen plötzlich auftretenden Hindernissen dar. Auch derartige Ereignisse müssten zuverlässig wahrgenommen werden. Aufgrund der möglichen Übergabe an den Fahrer in Level-3-Systemen, steht eine Alternative für Situationen zur Verfügung, die außerhalb der Leistungsgrenzen eines Fahrzeugs liegen. Dies funktioniert jedoch nur, wenn diese frühzeitig genug erkannt werden. Aufgrund des technologischen Fortschritts in den letzten Jahren, ist eine Lösung dieser Herausforderungen fahrzeugseitig vorstellbar. In Level-4-Systemen müssen dagegen alle Szenarien vom automatisierten Fahrzeug beherrscht werden, da eine Weiterfahrt ansonsten in diesen Szenarien nicht möglich ist. Einer zuverlässigen und redundanten Umfeldwahrnehmung kommt daher hier eine übergeordnete Bedeutung zu.

Auf einbahnigen Landstraßen, auf denen mit Gegenverkehr zu rechnen ist und sich auch nicht-motorisierte Verkehrsteilnehmer am Verkehrsgeschehen beteiligen, erscheint hochautomatisiertes Fahren ohne Veränderungen bzw. Anpassungen der Infrastruktur auf aktuell dagegen nur bedingt vorstellbar. Hier liegen die Anforderungen an die Umfeldwahrnehmung und die Entscheidungsfunktionen deutlich höher.

Die im Projekt betrachteten entwurfstechnischen Maßnahmen sind grundsätzlich Bestandteil von Neu- und Ausbauplanungen von Straßen. Sowohl Seitenstreifen an Autobahnen als auch Nothaltebuchten bei fehlenden Seitenstreifen sind für einen leistungsfähigen und sicheren Betrieb von Autobah-

nen unbedingt erforderlich (und bereits im geltenden Regelwerk implementiert). Auch die Trennung des schnelleren und langsameren Verkehrs auf Landstraßen ist bereits im Regelwerk verankert.

Da ein Ausbau von Autobahnen sowohl zeitlich als auch finanziell grundsätzlich hohe Aufwände erfordert, ist hier in naher Zukunft der zusätzliche Einsatz verkehrstechnischer und/oder informationstechnischer Maßnahmen erforderlich, um ggf. vorhandene Defizite in der entwurfstechnischen Infrastruktur zu kommunizieren.

Vor dem Hintergrund der ständig fortschreitenden technischen Entwicklung erfahren verkehrstechnische und auch informationstechnische Maßnahmen zur Unterstützung des automatisierten Fahrens eine zunehmend wachsende Bedeutung. Derartige Ansätze können aufwendige entwurfstechnische Maßnahmen im Einzelfall überflüssig machen. Um dies zu erreichen, sind an vielen Stellen jedoch noch die entsprechenden Strukturen, Standards oder auch Regelungen zu schaffen bzw. zu entwickeln. Dies erfordert sowohl seitens der Straßenbauverwaltungen als auch seitens der Automobil- und Zulieferindustrie umfangreiche Abstimmungen und zeitlichen Vorlauf. Bei anderen diskutierten Maßnahmen der verkehrstechnischen Infrastruktur fehlen derzeit noch grundlegende Kenntnisse.

Die Integration des automatisierten Fahrens wird durch eine regelkonforme Ausbildung der verkehrstechnischen und straßenbaulichen Infrastruktur erleichtert. Derzeit fehlen jedoch Kenntnisse, bis zu welchem Grad (unvermeidbare) Abweichungen vom regelwerkskonformen Zustand in der Praxis vom automatisierten Fahrzeug noch kompensiert werden können. In diesem Zusammenhang ist die Frage nach der kontinuierlichen Qualitätsüberwachung zu erörtern, vor allem nach den notwendigen Standards auch in Bezug auf die Funktionssicherheit. Hierfür wird dem Aufbau eines systematischen und gegenseitig abgestimmten Qualitätsmanagements eine hohe Bedeutung zugeschrieben.

Vorhandene Daten und verkehrlich relevante Informationen sollten mit verfügbaren einfachen Technologien digital und somit maschinell auswertbar zur Verfügung gestellt werden. Eine Orientierung an hierfür existierenden Datenplattformen, wie beispielsweise dem Mobilitäts Daten Marktplatz (MDM) oder auch dem Datenportal mCLOUD, ist hier zu empfehlen. Auf Basis von Anforderungen

durch das automatisierte Fahren wird ebenso klar die Empfehlung ausgesprochen zu überprüfen, inwieweit die genannten bestehenden Dienste und Datenplattformen, diese Anforderungen bereits erfüllen. Besonders zu beachten sind in diesem Zusammenhang vor allem die Datenqualität, Aktualität und die Verlässlichkeit der bereitgestellten Informationen. Die entsprechenden Verantwortlichkeiten zur Sicherstellung dieser Ansprüche an die digitale Datengrundlage bedürfen einer klaren Zuweisung.

Besonders informationstechnische Maßnahmen, wie Kommunikationstechnologien und digitale Karten, bieten die Möglichkeit, die Menge von Informationen über das Umfeld in einem automatisierten Fahrzeug zu erhöhen. Digitale Karten sind als Träger georeferenzierter statischer und dynamischer Informationen das hochaktuelle digitale Abbild des Mobilitätssystems. Um die Aktualität der digitalen Karten und damit deren Verlässlichkeit für das automatisierte Fahren sicherzustellen, sind insbesondere die Informationen zu Maßnahmen des Verkehrsmanagements transparent zur Verfügung zu stellen. Voraussetzung für die Ausführung einer kartenbasierten automatisierten Fahrfunktion ist die Aktualität/Korrektheit der digitalen Karte sowie eine hinreichend genaue kartenrelative Lokalisierung.

Eine Verteilung von Kartendaten über eine informationstechnische Infrastruktur ist grundsätzlich umsetzbar. Die Aktualität bzw. Korrektheit der Kartendaten ist zu verifizieren, beispielsweise durch die bordeigene Wahrnehmung. Um dies sicherstellen zu können, sind die erforderlichen Strukturen und Standards zu definieren und einzuhalten. Es sind Vorgehensweisen zu etablieren, um Veränderungen baulicher oder straßenverkehrsrechtlicher Art frühzeitig als solche zu erkennen. Der Prozess, wie die Daten eines Kartenproviders aktuell gehalten werden, könnte z. B. einer staatlich geregelten Qualitätssicherung unterliegen. Bereits absehbar sind Möglichkeiten zur Aktualisierung der digitalen Karten, basierend auf der Einspeisung von Daten aus fahrzeuggestützter Erkennung. Abweichungen zwischen straßenseitiger Infrastruktur und digitaler Referenzkarte sollen somit durch die Fahrzeugsensoren erfasst und als entsprechende Information weitergegeben werden. Der Austausch zwischen der Referenzkarte und dem automatisierten Fahrzeug findet somit bidirektional statt. Der Datenaustausch zwischen Instanzen der digitalen Karte bedarf auch hierfür entsprechender Schnittstellen und

Standards. Auch in diesem Zusammenhang ist wieder zu beachten, dass bei einer fehlenden oder fehlerbehafteten Information, automatisiertes Fahren unter Umständen nicht mehr möglich ist und der Fahrer das Fahrzeug übernehmen muss.

Ein wesentlicher Bestandteil ist in diesem Zusammenhang eine leistungsfähige Datenkommunikation. Ausgehend von bestehenden Mobilfunkstandards muss diese flächendeckend im vorgesehenen Straßennetz oder auf den für das automatisierte Fahren vorgesehenen Strecken zur Verfügung gestellt werden. Hierfür müssen die entsprechenden Standards definiert werden.

Neben der Abstimmung über technische und organisatorische Standards, Prozesse und Strukturen muss in diesem Zusammenhang auch die Frage der Finanzierung der verkehrsinformationstechnischen Infrastruktur erörtert werden. Während fahrerseitige Einrichtungen in der Regel über den Kaufpreis des Fahrzeugs finanziert werden, ist die Finanzierung der öffentlichen Infrastruktur bislang nicht abschließend diskutiert. Für die Schaffung einer zusammenhängenden und Baulastträgerübergreifenden Infrastruktur für das automatisierte Fahren und vor allem auch der Qualitätsstandards und Anforderungen entsprechender Wartung erscheint dies jedoch notwendig.

Aufgrund der hochdynamischen Entwicklung im Bereich des automatisierten Fahrens und der zugehörigen Technologien besteht weiterhin die Möglichkeit, dass der Status Quo der Infrastruktur bereits ausreicht und es nur eine Frage der Zeit ist, bis die erforderlichen fahrerseitigen Technologien die notwendige Leistungsfähigkeit erreichen. Dies führt zu einer riskanten Situation für die Infrastrukturbetreiber: Einerseits könnten jetzt initiierte Maßnahmen in wenigen Jahren obsolet sein, andererseits könnten nicht initiierte Maßnahmen zu einer Verhinderung oder verzögerten Einführung von automatisierten Fahrfunktionen in bestimmten Domänen und Ausprägungen in der Zukunft führen.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass das Zusammenspiel vor allem auf einer organisatorischen Ebene von Automobilindustrie und Straßenbetreibern als auch Diensteanbietern unerlässlich für den Erfolg der weiteren Automatisierung des Verkehrs ist.

## 7.4 Forschungsbedarf

Zur Vermeidung von Insellösungen einzelner Länder ist es erstrebenswert, Nachrichten die über V2I und V2V verteilt werden, zu standardisieren. Hierfür gibt es bereits Bestrebungen, jedoch müssen diese europä- und weltweit weitergeführt werden. Dies kommt auch nicht-automatisierten Fahrzeugen zu Gute, wenn durch diese Informationen der Fahrer gewarnt und ihm weitere Informationen angeboten werden können.

Weiterer Forschungsbedarf wird bzgl. der Maschinenlesbarkeit von Verkehrszeichen und insbesondere auch von Markierungen gesehen. Unklar ist in diesem Zusammenhang wie die Maschinenlesbarkeit gestaltet werden soll. Hieraus lässt sich ein deutlicher Forschungsbedarf ableiten. Ebenso besteht bei den Leitposten ergänzender Forschungsbedarf hinsichtlich der Fragestellung einer Lokalisierung des automatisierten Fahrzeugs mithilfe von modifizierten Leitposten, z. B. im Fall nicht sichtbarer Fahrbahnmarkierungen.

Auch bzgl. der Umsetzung einer digitalen Karte mit einheitlichen, korrekten und verlässlichen Kartendaten wird noch erheblicher Forschungsbedarf gesehen. Es ist ein einheitlicher Prozess zur qualitätssichereren Inhaltsanreicherung der digitalen Karte zur Verwendung für das automatisierte Fahren zu gestalten. So kann die Funktionssicherheit gewährleistet werden. Hier ist derzeit unklar, wie die Bestrebungen bzgl. der Einführung des Navigation-Data-Standards auch die Anforderungen bzw. Daten auf Seiten der Straßenbaulastträger berücksichtigen. Eine Rolle bei der Aktualisierung der Kartendaten sollten die Straßenverkehrsbehörden und der Straßenbetrieb und zu einem verbleibenden Anteil Kartendatenlieferanten spielen. Verkehrsinformationen sind, als temporäre Merkmale dem hier verfolgten Ansatz entsprechend, integraler Bestandteil der digitalen Karte. Diese Punkte bedürfen noch einer detaillierten Ausarbeitung und Definition. Insbesondere die notwendigen Schnittstellen und Standards einer digitalen Karte, ihre Kosten, Betreibermodelle etc. sind derzeit völlig offen. Besonderes Augenmerk ist bei der Umsetzung einer hochgenauen, geschichteten digitalen Referenzkarte auf ihre Funktionssicherheit zu legen, da sie im sicherheitsrelevanten Bereich automatisierter Fahrzeugsteuerung zur Anwendung kommt und somit ein integraler Bestandteil der Funktionssicherheit des automatisiert fahrenden Fahrzeugs ist. In diesem Zu-

sammenhang sind nicht nur die hier vorhandenen Daten zu berücksichtigen, sondern auch die sich hieraus ergebenden Wechselwirkungen zur kollektiven Verkehrsbeeinflussung.

Für die Durchführung von regelmäßigen Streckenkontrollen, die einem systematischen und kontinuierlichen Qualitätsmanagement – welches noch zu definieren ist – unterliegen, ist es vorstellbar, dass Fahrzeuge mit moderner und leistungsfähiger Umfeldsensorik ausgerüstet werden. Dies ermöglicht eine automatisierte Aufzeichnung und Auswertung des Zustands der verkehrstechnischen Infrastruktur. Wie diese Streckenkontrollen durchgeführt werden können und welche Daten verlässlich erhoben und automatisiert ausgewertet werden können, ist derzeit noch nicht erforscht. Hier ist Forschungsbedarf vorhanden. In diesem Zusammenhang wäre auch zu untersuchen, inwieweit ggf. die Informationen der Sensorik von automatisiert fahrenden Fahrzeugen hierfür verwendet werden können und auch für die Straßenbauverwaltungen nutzbar gemacht werden können.

Weiterhin wurde im Rahmen des Projektes deutlich, dass bzgl. der Leistungsfähigkeit der unterschiedlichen Sensoren zur Umfelderkennung bzw. Umfeldwahrnehmung häufig unterschiedliche Sichtweisen vorhanden sind. Eindeutige Aussagen der Automobilindustrie oder auch der Zulieferer zur Leistungsfähigkeit und Verlässlichkeit der eingesetzten Sensorik konnten im Rahmen des Projektes nur ansatzweise ermittelt werden. Weiterer Forschungs- bzw. Klärungsbedarf ist daher vorhanden.

## Literatur

- (ISO), I. O. (2011): {ISO 26262:2011 Road vehicles – Functional safety}. {ISO 26262:2011 Road vehicles – Functional safety} (ISO 26262). Genf, Schweiz
- ARDELT, M.; WALDMANN, P. (2011): Hybrides Steuerungs- und Regelungskonzept für das hochautomatisierte Fahren auf Autobahnen. In: at-Automatisierungstechnik, 59 (12), S. 738-750. Retrieved from <http://www.olderbourg-link.com/doi/abs/10.1524/auto.2011.0961>
- AUDI AG (2015): 550 Meilen pilotiert vom Silicon Valley nach Las Vegas: Langstrecken-Test im Audi A 7 Sportback piloted driving concept. Retrieved from [https://www.audi-mediaservices.com/public/pressmitteilungen/2015/01/04/550\\_meilen\\_pilotiert.html](https://www.audi-mediaservices.com/public/pressmitteilungen/2015/01/04/550_meilen_pilotiert.html)
- BAR HILLEL, A.; LERNER, R.; LEVI, D. & RAZ, G. (2014): Recent progress in road and lane detection: a survey. In: Machine Vision and Applications, 25(3), pp. 727-745
- BARTELS, A.; EBERLE, U. & KNAPP, A. (2015): Adaptive Deliverable D2.1 // System Classification and Glossary. Adaptive
- BAST (1999): Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen (MARZ 99). Bergisch Gladbach
- BAST (2012): Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLS 2012). Bergisch Gladbach
- BAYERL, S. F. & WUENSCHKE, H.-J. (2014): Detection and Tracking of Rural Crossroads Combining Vision and LiDAR Measurements. Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2014 IEEE 17<sup>th</sup> International Conference on, pp. 1274-1279
- BMVBS (1995/2002): Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen (RSA). Dortmund: Verkehrsblatt-Verlag
- BMVBS (1997a): Richtlinien für Wechselverkehrszeichenanlagen an Bundesfernstraßen (RWVA). Dortmund: Verkehrsblatt-Verlag
- BMVBS (1997b): Richtlinien für den Verkehrslärmschutz an Bundesfernstraßen in der Baulast des Bundes (VLärmSchR-97). Bonn
- BMVI (2015): Bericht zum Forschungsbedarf Runder Tisch Automatisiertes Fahren – AG Forschung
- BMVI, F. B. (2015): Innovationscharta Digitales Testfeld Autobahn auf der Bundesautobahn A 9. Berlin
- BROGGI, A.; BERTOZZI, M. & FASCIOLI, A. (1999): ARGO and the MilleMiglia in Automatico Tour. In: Intelligent Systems and their Applications, IEEE, 14(1), pp. 55-64

- BROGGI, A.; CERRI, P.; DEBATTISTI, S.; LAGHI, M. C.; MEDICI, P.; PANCIROLI, M. & PRIOLETTI, A. (2014): PROUD-Public road urban driverless test: Architecture and results. In: Intelligent Vehicles Symposium Proceedings, 2014 IEEE, pp. 648-654
- BUSCHARDT, B.; DONNER, E.; GRAAB, B.; HÖRAUF, U. & WINKLE, T. (2006): Analyse von Verkehrsunfällen mit FAS. Potenzialeinschätzung am Beispiel des FAS Lane Departure Warning. In: Tagung Aktive Sicherheit 2006. München: Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, TU München
- CHIELLINO, U.; WINKLE, T.; GRAAB, B.; ERNSTBERGER, A.; DONNER, E. & NERLICH, M. (2010): Was können Fahrerassistenzsysteme im Unfallgeschehen leisten. In: Zeitschrift für Verkehrssicherheit (3), S. 131-137
- DAMBÖCK, D. (2013): Automationseffekte im Fahrzeug – von der Reaktion zur Übernahme. München
- Delphi Automotive PLC. (2015): Delphi Successfully Completes First Coast-to-Coast Automated Drive. Retrieved from <http://www.delphi.com/media/pressreleases/2015/04/02/delphi-successfully-completes-first-coast-to-coast-automated-drive>
- DICKMANN, E.; BEHRINGER, R.; HILDEBRANDT, T.; MAURER, M.; THOMANEK, F. & SCHIEHLEN, J. (1994, Oct): The seeing passenger car 'VaMoRs-P'. In: Intelligent Vehicles '94 Symposium, Proceedings of the, pp. 68-73
- DIETMAYER, K. (2015): Prädiktion von maschineller Wahrnehmungsleistung beim automatisierten Fahren. In: M. MAURER; J. C. GERDES; B. LENZ & H. WINNER (Hrsg.), Autonomes Fahren (S. 419-438). Springer
- DIN 67527-1. (2001): Lichttechnische Eigenschaften von Signallichtern im Verkehr, Teil 1: Ortsfeste Signallichter im Straßenverkehr. DIN e. V., Berlin
- DIN EN 12368. (2006; Entwurf 2015): Anlagen zur Verkehrssteuerung – Signalleuchten. DIN e. V., Berlin
- DIN EN 12675. (2015): Steuergeräte für Lichtzeichenanlagen – Funktionale Sicherheitsanforderungen. DIN e. V., Berlin
- DIN EN 50293; VDE 0832-200. (2013): Straßenverkehrs-Signalanlagen. Elektromagnetische Verträglichkeit. DIN e. V. Berlin
- DIN EN 50556; VDE 0832-100. (2011): Straßenverkehrs-Signalanlagen. DIN e. V., Berlin
- DIN V VDE V 0832-400. (2008): Straßenverkehrs-Signalanlagen – Teil 400: Verkehrsbeeinflussungsanlagen. DIN e. V., Berlin
- DIN V VDE V 0832-500 (2008): Straßenverkehrs-Signalanlagen – Teil 500: Sicherheitsrelevante Software für Straßenverkehrs-Signalanlagen. DIN e. V., Berlin
- DIN VDE V 0832-300 (2014): Straßenverkehrs-Signalanlagen – Teil 300: Technische Festlegungen für LED-Signalgeber. DIN e. V., Berlin
- DONGES, E. (1982): Aspekte der aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. AUTOMOB-IND, 27(2)
- DONGES, E. (2015): Fahrerhaltensmodelle. In: Handbuch Fahrerassistenzsysteme (S. 17-26). Springer
- Eisenbahnbundesamt (2002): BÜ-Leitfaden. Verkehrssicherheit an Bahnübergängen. Leitfaden zur Durchführung von Bahnübergangsschauen. Minden
- FENTON, R. (1970, Feb): Automatic vehicle guidance and control – A state of the art survey. In: Vehicular Technology, IEEE Transactions on, 19(1), pp. 153-161
- FGSV (1980): Richtlinien für die Markierung von Straßen (RMS) – Teil 2: Anwendung von Fahrbahnmarkierungen (RMS-2). Köln: FGSV-Verlag
- FGSV (1990/1992): Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen (RLS). Köln: FGSV-Verlag
- FGSV (1992): Hinweise für die Anordnung und Ausführung von senkrechten Leiteinrichtungen auf Bundesfernstraßen (HLB). Berlin: Erich Schmidt Verlag

- FGSV (1992a): Hinweise zur Verkehrsflussanalyse, Störfallentdeckung und Verkehrsflussprognose für die Verkehrsbeeinflussung in Außerortsbereichen. Köln: FGSV-Verlag
- FGSV (1992b): Hinweise für die Steuerungsmodelle von Wechselverkehrszeichenanlagen in Außerortsbereichen. Köln: FGSV-Verlag
- FGSV (1993): Richtlinien für die Markierung von Straßen (RMS) – Teil 1: Abmessung und geometrische Anordnung von Markierungszeichen (RMS-1). Köln: FGSV-Verlag
- FGSV (2000): Hinweise für neue Verfahren zur Verkehrsbeeinflussung auf Außerortsstraßen. Köln: FGSV-Verlag
- FGSV (2001): Hinweise zu Verkehrsrechnern als Bestandteil der innerörtlichen Lichtsignalsteuerung. Köln: FGSV-Verlag
- FGSV (2003a): Hinweise zur Strategieentwicklung im dynamischen Verkehrsmanagement. Köln: FGSV-Verlag
- FGSV (2003b): Hinweise zu Variablen Fahrstreifenzeileteilungen – Anwendungsbeispiele und Einsatzmöglichkeiten. Köln: FGSV-Verlag
- FGSV (2004): Technische Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen Teil: Messverfahren SRT (TP Griff-StB (SRT)). Köln: FGSV-Verlag
- FGSV (2006a): Hinweise zur Qualitätsanforderung und Qualitätssicherung der lokalen Verkehrsdatenerfassung für Verkehrsbeeinflussungsanlagen. Köln: FGSV-Verlag
- FGSV (2006b): Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen (RASt). Köln: FGSV-Verlag
- FGSV (2006c): Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT). Köln: FGSV-Verlag
- FGSV (2007): Hinweise zur Wirksamkeitsschätzung und Wirksamkeitsberechnung von Verkehrsbeeinflussungsanlagen. Köln: FGSV-Verlag
- FGSV (2008a): Hinweise zu Planung und Betrieb von betreiberübergreifenden Netzsteuerungen in der Verkehrsbeeinflussung. Köln: FGSV-Verlag
- FGSV (2008b): Hinweise für Zuflussregelungsanlagen (H ZRA). Köln: FGSV-Verlag
- FGSV (2008c): Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA). Köln: FGSV-Verlag
- FGSV (2008d): Richtlinien für integrierte Netzgestaltung (RIN). Köln: FGSV-Verlag
- FGSV (2008e): Hinweise zur Nutzung von Fahrzeug-Rückhaltesystemen als Träger von Leiteinrichtungen (H FL). Köln: FGSV-Verlag
- FGSV (2009): Richtlinien für passiven Schutz an Straßen durch Fahrzeug-Rückhaltesysteme (RPS). Köln: FGSV-Verlag
- FGSV (2010a): Hinweise zur Erfassung und Nutzung von Umfelddaten in Streckenbeeinflussungsanlagen. Köln: FGSV-Verlag
- FGSV (2010b): Empfehlungen für Radverkehrsanlagen (ERA). Köln: FGSV-Verlag
- FGSV (2011a): Technische Liefer- und Prüfbedingungen für vertikale Verkehrszeichen (TLP VZ). Köln: FGSV-Verlag
- FGSV (2011b): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für vertikale Verkehrszeichen (ZTV VZ). Köln: FGSV-Verlag
- FGSV (2011c): Merkblatt für die Wahl der lichttechnischen Leistungsklasse von vertikalen Verkehrszeichen und Verkehrseinrichtungen (M LV). Köln: FGSV-Verlag
- FGSV (2012a): Hinweise zum Einsatz von Steuerungsverfahren in der Verkehrsbeeinflussung. Köln: FGSV-Verlag
- FGSV (2012b): Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL). Köln: FGSV-Verlag
- FGSV (2012c): Begriffsbestimmungen – Teil: Verkehrsplanung, Straßenentwurf und Straßenbetrieb. Köln: FGSV-Verlag
- FGSV (2013a): Merkblatt für die Durchführung von Verkehrsschauen (M DV). Köln: FGSV-Verlag
- FGSV (2013b): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Markierungen auf Straßen (ZTV M 13). Köln: FGSV-Verlag
- FGSV (2015a): Merkblatt für die Überarbeitung des Prinzips der Entwurfsklassen nach den RAL auf

- bestehenden Straßen (M EKLBest); Entwurf, Stand: 10.6.2015 (unveröffentlicht)
- FGSV (2015b): RiLSA – Richtlinien für Lichtsignalanlagen – Lichtzeichenanlagen für den Straßenverkehr. Köln: FGSV-Verlag
- FGSV (2015c, August 18): FGSV: 3.5.7 TLP Leitpfosten. Retrieved from FGSV: <http://www.fgsv.de/777.html>
- GASSER, T. M.; ARZT, C.; AYOUBI, M.; BARTELS, A.; BÜRKLE, L.; EIER, J.; VOGT, W. (2012): Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung: gemeinsamer Schlussbericht der Projektgruppe. (Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft)
- GEIGER, A.; LAUER, M.; WOJEK, C.; STILLER, C. & URTASUN, R. (2014): 3D traffic scene understanding from movable platforms. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 36(5), pp. 1012-1025
- GOEBL, M.; ALTHOFF, M.; BUSS, M.; FARBER, G.; HECKER, F.; HEISSING, B. et al. (2008): Design and capabilities of the Munich cognitive automobile. In: *Intelligent Vehicles Symposium, 2008 IEEE*, pp. 1101-1107
- H. WINNER, S. H. (2015): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. In: H. GOTZIG & G. GEDULD, *LIDAR-Sensorik*, S. 317-420. Wiesbaden: Springer Fachmedien
- KNAPP, A.; NEUMANN, M.; BROCKMANN, M.; WALZ, R. & WINKLE, T. (2009): *Code of Practice for the Design and Evaluation of ADAS*. Response 3 consortium
- LEMMER, K. (2016): *Neue autoMobilität. Automatisierter Straßenverkehr der Zukunft (acatech STUDIE)*. München: Herbert Utz Verlag
- LEONARD, J.; HOW, J.; TELLER, S.; BERGER, M.; CAMPBELL, S.; FIORE, G. et al. (2009): A perception-driven autonomous urban vehicle. In: *The DARPA Urban Challenge*, pp. 163-230. Springer. Retrieved from [http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-03991-1\\_5](http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-03991-1_5)
- LEVINSON, J.; ASKELAND, J.; BECKER, J.; DOLSON, J.; HELD, D.; KAMMEL, S.; THRUN, S. (2011): Towards fully autonomous driving: Systems and algorithms. In: *2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, pp. 163-168. Baden-Baden, Deutschland
- MANZ, M.; HIMMELSBACH, M.; LUETTEL, T. & WUENSCH, H.-J. (2011): Detection and tracking of road networks in rural terrain by fusing vision and {LIDAR}. In: *Proc. IEEE/RSJ Int Intelligent Robots and Systems (IROS) Conf*, pp. 4562-4568
- MATTHAEI, R. (2015): *Wahrnehmungsgestützte Lokalisierung in fahrstreifengenauen Karten für Assistenzsysteme und automatisches Fahren in urbaner Umgebung*. PhD. Dissertation, Technische Universität Braunschweig
- MATTHAEI, R. & MAURER, M. (2015): *Autonomous Driving – A Top-Down-Approach*. In: *at – Automatisierungstechnik*, 63(3), pp. 155-167
- MATTHAEI, R.; RESCHKA, A.; RIEKEN, J.; DIERKES, F.; ULBRICH, S.; WINKLE, T. & MAURER, M. (2015): *Autonomes Fahren*. In: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, S. 1139-1165, Springer
- MAURER, M.; BEHRINGER, R.; FÜRST, S.; THOMANEK, F. & DICKMANN, E. (1996): A Compact Vision System for Road Vehicle Guidance. In: *Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Conference on Pattern Recognition*
- MAURER, M.; GERDES, J.; LENZ, B. & WINNER, H. (Hrsg.) (2015): *Autonomes Fahren*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- MONTEMERLO, M.; BECKER, J.; BHAT, S.; DAHLKAMP, H.; DOLGOV, D.; ETTINGER, S. et al. (2008): Junior: The stanford entry in the urban challenge. In: *Journal of Field Robotics*, 25(9), pp. 569-597. Retrieved from <http://online.library.wiley.com/doi/10.1002/rob.20258/abstract>
- Niedersächsisches Ministerium für Wirtschaft (2016): *Mobilitätskonzept Niedersachsen – Mobilität braucht Perspektiven*. Hannover
- NOLL, M. & RAPPS, P. (2015): *Ultraschallsensorik*. In: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, S. 243-258, Springer

- POMERLEAU, D. & JOCHEM, T. (1996, Apr): Rapidly adapting machine vision for automated vehicle steering. In: *IEEE Expert*, 11(2), pp. 19-27
- REINSBERG, H. & FRANK, H. (2014): Leitfaden Fahrbahnmarkierung. Bonn: Deutscher Verkehrssicherheitsrat e. V., Deutsche Studiengesellschaft für Straßenmarkierungen e. V.
- RESCHKA, A. (2016): Fertigkeiten- und Fähigkeitsgraphen als Grundlage des sicheren Betriebs von automatisierten Fahrzeugen im öffentlichen Straßenverkehr in städtischer Umgebung. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig
- RESCHKA, A. & MAURER, M. (2015): Conditions for a safe state of automated road vehicles. In: *it – information technology*, 57(4), pp. 215-222
- SAE International. (2014 (überarbeitet 2016)): Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems (J3016). SAE International
- SHLADOVER, S. (2007, Dec): PATH at 20 – History and Major Milestones. In: *Intelligent Transportation Systems*, *IEEE Transactions on*, 8(4), pp. 584-592
- SINGH, S. (ed.) (2006): *Journal of Field Robotics – Special Issue on the DARPA Grand Challenge*, 23(9), pp. 655-835. Wiley Subscription Services, Inc., A Wiley Company
- SINGH, S. (ed.) (2008): Special Issue on the 2007 DARPA Urban Challenge Part I, 25(8), pp. 423-424. Wiley Subscription Services, Inc., A Wiley Company
- SINGH, S. (ed.) (2008): Special Issue on the 2007 DARPA Urban Challenge Part II, 25(9), pp. 567-724. Wiley Subscription Services, Inc., A Wiley Company
- SINGH, S. (ed.) (2008): Special Issue on the 2007 DARPA Urban Challenge Part III, 25(10), pp. 725-860. Wiley Subscription Services, Inc., A Wiley Company
- StVO (2014): Straßenverkehrs-Ordnung in der Fassung des Inkrafttretens vom 30.10.2014. Letzte Änderung durch: Neunundvierzigste Verordnung zur Änderung straßenverkehrsrechtlicher Vorschriften vom 22.10.2014 (BGBl. Jahrgang 2014 Teil I Nr. 48 S. 1635 Art. 1). Bonn
- THORPE, C.; JOCHEM, T. & POMERLEAU, D. (1997, Nov): The 1997 automated highway free agent demonstration. In: *Intelligent Transportation System, 1997. ITSC '97*, *IEEE Conference on*, pp. 496-501
- THRUN, S. (2010): What we're driving at. What we're driving at. The Official Google Blog. Retrieved from <http://googleblog.blogspot.de/2010/10/what-were-driving-at.html>
- THRUN, S.; MONTEMERLO, M.; DAHLKAMP, H.; STAVENS, D.; ARON, A.; DIEBEL, J.; MAHONEY, P. (2006): Stanley: The robot that won the DARPA Grand Challenge. In: *Journal of Field Robotics*, 23(9), pp. 661-692. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1002/rob.20147>
- TÖPFER, D.; SPEHR, J.; EFFERTZ, J. & STILLER, C. (2015): Efficient Road Scene Understanding for Intelligent Vehicles Using Compositional Hierarchical Models. In: *Intelligent Transportation Systems*, *IEEE Transactions on*, 16(1), pp. 441-451
- ULBRICH, S.; RESCHKA, A.; MENZEL, T.; SCHULDT, F. & MAURER, M. (2015): Defining and Substantiating the Terms Scene, Situation and Scenario for Automated Driving. In: 2015 IEEE International Annual Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Las Palmas, Spanien
- ULMER, B. (1994, Oct): VITA II-active collision avoidance in real traffic. In: *Intelligent Vehicles '94 Symposium, Proceedings of the*, pp. 1-6
- URMSON, C.; ANHALT, J.; BAGNELL, D.; BAKER, C.; BITTNER, R.; CLARK, M. et al. (2008): Autonomous driving in urban environments: Boss and the urban challenge. In: *Journal of Field Robotics*, 25(8), 425-466. Retrieved from <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/rob.20255/abstract>
- VwV-StVO. (2014): Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrs-Ordnung (VwV-StVO). Vom 22. Oktober 1998 in der Fassung vom 11. November 2014

- WILLE, J. M.; SAUST, F. & MAURER, M. (2010): Stadtpilot: Driving autonomously on Braunschweig's inner ring road. In: 2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), pp. 506-511. San Diego, CA, USA
- ZHANG, W.-B.; PARSONS, R. E. & WEST, T. (1990, May): An Intelligent Roadway Reference System for Vehicle Lateral Guidance/Control. In: American Control Conference, 1990, pp. 281-286
- ZIEGLER, J.; BENDER, P.; SCHREIBER, M., LATEGAHN, H., STRAUSS, T., STILLER, C. et al. (2014): Making Bertha Drive – An Autonomous Journey on a Historic Route. In: Intelligent Transportation Systems Magazine, IEEE, 6(2), pp. 8-20

## Bilder

- Bild 3-1: Differenzierung der Straßeninfrastruktur in Anlehnung an den Runden Tisch Automatisiertes Fahren (BMVI, 2015)
- Bild 3-2: Einordnung der RIN in das Regelwerk für den Entwurf und Betrieb von Straßen (FGSV, 2008d)
- Bild 3-3: Kategoriengruppen der Verkehrswege für den Kraftfahrzeugverkehr nach den RIN (FGSV, 2008d)
- Bild 3-4: Regelquerschnitt RQ 15,5 nach den RAL – Abmessungen in [m] (FGSV, 2012b)
- Bild 3-5: Regelquerschnitt RQ 11,5+ nach den RAL – Abmessungen in [m] (FGSV, 2012b)
- Bild 3-6: Regelquerschnitt RQ 11 nach den RAL – Abmessungen in [m] (FGSV, 2012b)
- Bild 3-7: Regelquerschnitt RQ 9 nach den RAL – Abmessungen in [m] (FGSV, 2012b)
- Bild 3-8: Richtzeichen Leitlinie (Zeichen 340) (StVO, 2014)
- Bild 3-9: Vorschriftzeichen Fahrstreifen- und Fahrbahnbegrenzung (Zeichen 295) (StVO, 2014)
- Bild 3-10: Markierung der Knotenpunktbereiche an zweistreifigen Straßen mit Linksabbiegestreifen außerhalb bebauter Gebiete (FGSV, 1980)
- Bild 3-11: Anzeigequerschnitt einer Streckenbeeinflussungsanlage mit grundsätzlich möglichen Anzeigen (eigene Darstellung)
- Bild 3-12: Funktionale Systemarchitektur für automatisierte Fahrzeuge; Diskussionsstand am Institut für Regelungstechnik, TU Braunschweig
- Bild 4-1: Knotenpunkt (außerorts) mit fortlaufenden Leitlinien in übergeordneter Straße (Grundlage: Google Earth Pro, Lizenz Schlothauer & Wauer GmbH)
- Bild 4-2: Regelplan D III/2I „Arbeitsstelle von kürzerer Dauer auf dem linken Fahrstreifen einer Richtungsfahrbahn“ (Quelle: ARS 6/2014 (VkB1. 2015, S. 91 ff.))
- Bild 5-1: Szenario A1 – Hindernis im eigenen Fahrstreifen
- Bild 5-2: Szenario A2b – Temporäre Seitenstreifenfreigabe (Foto: S. Hoffmann)
- Bild 5-3: Szenario P3 – Überholvorgang auf einbahniger Straße

## Tabellen

- Tab. 3-1: Entwurfsklassen für Straßen der Kategorie AS (FGSV, 2008c)
- Tab. 3-2: Entwurfsklassen, Gestaltungsmerkmale und Zusammenfassung der Betriebs- und Entwurfsmerkmale von Autobahnen (FGSV, 2008c)
- Tab. 3-3: Breiten der Bestandteile der Regelquerschnitte von Autobahnen (Darstellung nach (FGSV, 2008c))
- Tab. 3-4: Entwurfsklassen für Landstraßen in Abhängigkeit von der Straßenkategorie (FGSV, 2012b)
- Tab. 3-5: Entwurfsklassen und Gestaltungsmerkmale nach den RAL (FGSV, 2012b)

- 
- Tab. 3-6: Grundformen von Leit- und Begrenzungslinien (FGSV, 1993)
- Tab. 3-7: Anforderungen an Fahrbahnmarkierungen nach ZTV M (FGSV, 2013b)
- Tab. 3-8: Auswahl der Verkehrsklassen für endgültige Markierungen nach ZTV M (FGSV, 2013b)
- Tab. 3-9: Spezifische Rückstrahlwerte RA [ $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$ ]: RA1 nach ZTV VZ (FGSV, 2011b)
- Tab. 3-10: Spezifische Rückstrahlwerte RA [ $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$ ]: RA2 nach ZTV VZ (FGSV, 2011b)
- Tab. 3-11: Spezifische Rückstrahlwerte RA [ $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$ ]: RA3 nach ZTV VZ (FGSV, 2011b)
- Tab. 3-12: Wahl der Leistungsklasse bezüglich Retroreflexion und/oder Leuchtdichte nach M LV (FGSV, 2011c)
- Tab. 3-13: Aufgaben und Turnus von Verkehrsschauen nach dem M DV (FGSV, 2013a)
- Tab. 3-14: Benennung und Klassifizierung automatisierter Fahrfunktionen aus (GASSER et al., 2012)
- Tab 3-15: Wahrnehmungsmöglichkeiten anderer Verkehrsteilnehmer
- Tab 3-16: Wahrnehmungsmöglichkeiten von Infrastrukturelementen

## 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: 5<sup>th</sup> 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: 6<sup>th</sup> 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 CO<sub>2</sub>-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 Fahr Simulator 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 CO<sub>2</sub>-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: Motorradsschutzhelme – 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.

F 129: Anforderungen an die dynamische Leuchtweitenregelung zur Vermeidung der Blendung entgegenkommender Verkehrsteilnehmer  
Kosmas, Kobbart, Khan € 15,50

F 130: Infrastrukturbedarf automatisierten Fahrens – Grundlagenprojekt  
Dierkes, Friedrich, Heinrich, Hoffmann, Maurer, Reschka, Schendzielorz, Ungureanu, Vogt  
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](http://www.schuenemann-verlag.de)

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.